
DIS Projekt- Nr.: 38'046
DIS Vertrags- Nr.: 77'823

Programm
Geothermie

Erneuerbarkeit von Erdwärme - gemeinsame Erklärung

ausgearbeitet durch

Walter J. Eugster

Polydynamics Engineering, Malojaweg 19, CH-8048 Zürich

Arthur Huber

Huber Energietechnik, Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Oktober 2000

Schlussbericht

Erneuerbarkeit von Erdwärme - gemeinsame Erklärung

Walter J. Eugster¹ und Arthur Huber²

¹ Polydynamics Engineering Zürich, Malojaweg 19, 8048 Zürich
E-mail: wje@polydynamics.ch

² Huber Energietechnik, Jupiterstrasse 26, 8006 Zürich
E-mail: huber@igjzh.com

1 EINLEITUNG

Der natürliche Wärmehaushalt der oberflächennahen Schichten unserer Erde wird durch zwei Effekte beeinflusst:

- die Sonneneinstrahlung
- der geothermische Wärmefluss aus dem Erdinnern

Daneben kann ebenfalls das Grundwasser sowie die Grundwasserneubildung (z.B. versickerndes Regenwasser) lokal eine wesentliche Rolle einnehmen.

Der geothermische Wärmefluss ist durch die lokalen Untergrundverhältnisse gegeben und ist praktisch gleichbleibend, d.h. tags und nachts sowie im Sommer und im Winter andauernd vorhanden. Er beträgt im Raum Zürich rund 0.085 W/m^2 bzw. 0.745 kWh/m^2 und Jahr.

Die Strahlungsenergie der Sonne ist demgegenüber mehr als tausend Mal höher. Für Zürich beträgt dieser Wert rund $1'000 \text{ kWh/m}^2$ und Jahr. Je nach Bodenbeschaffenheit dringt jedoch nur ein Teil dieser Energie in den Untergrund ein. Bei geteerten Strassen ist der Anteil höher als auf Wiesen oder in Wäldern. Trotzdem bleibt die Energiebilanz der Sonneneinstrahlung für die Erde bei Null. Die Wärme, die im Sommer in den Untergrund eindringt, geht im Winter wieder verloren. Für die Energiebilanz der Erde ist im ungestörten Zustand also einzig der natürliche geothermische Wärmefluss massgebend.

Dies ändert jedoch, sobald dem Untergrund mit künstlichen Systemen Wärme entzogen wird:

Sobald Erdwärme genutzt wird, wird dem Untergrund Wärme entnommen. Dies kann mit offenen oder geschlossenen Systemen erfolgen. Zur letzteren Kategorie gehört die heute sehr weit verbreitete Erdwärmesonde (BFE, 1998). Sobald also Erdwärme entnommen wird, kühlt sich der Untergrund am Ort der Entnahme ab. Bei Erdwärmesonden bis auf Temperaturen von 0°C . Durch diese Abkühlung wird künstlich ein starkes Temperaturgefälle aufgebaut.

Wärme hat die Eigenschaft, solche Temperaturunterschiede so schnell wie möglich wieder auszugleichen in dem Wärme von heisseren Gebieten zu den kalten Gebieten fliesst bis sich die Temperaturunterschiede ausgeglichen haben. Diese Eigenschaft wird auch beim Kochen genutzt. Von der heissen Kochstelle fliesst solange Wärme ins kalte Kochgut bis alles die gleiche Temperatur aufweist (oder bis die Wärmezufuhr von der Kochstelle abgeschaltet wird). Beim Kochvorgang werden weitere wichtige Eigenschaften sichtbar: Die Stahlpfanne wird schneller heiss als das Kochgut (höhere Wärmeleitfähigkeit). Umgekehrt kühlt auf dem Tisch das Kochgut in der Stahlpfanne deutlich schneller ab als im Glasgefäss (höhere Speicherfähigkeit = $\rho \cdot c_p$).

Eine hohe Wärmeleitfähigkeit beschleunigt also den Temperatenausgleich, eine hohe Speicherfähigkeit ($\rho \cdot c_p$) bremst diesen Ausgleich. Die gleichen Vorgänge finden auch im Untergrund bei der Erdwärmenutzung statt. Sobald sich ein Temperaturgefälle ausgebildet hat, fliesst Wärme von den wärmeren Orten der räumlichen Umgebung nach. Je nach den örtlichen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Dichte ρ , c_p) kann die Wärme in unterschiedlichen Anteilen aus den einzelnen Richtungen (von unten, von oben, horizontal aus allen Seiten) nachfliessen.

Wie stark die Wärme von den einzelnen Seiten zufließen kann (Wärmemenge pro Zeit = Leistung) wird durch zwei weitere Grössen bestimmt: der Temperaturunterschied und der „Wärmevorrat“. Dies wird durch den Wärmefluss ausgedrückt: Je höher die Temperaturdifferenz desto

höher die Leistung des Wärmenachflusses aus dieser Richtung und desto höher der Energieanteil, der aus dieser Richtung zugeführt wird. Beim Beispiel des Kochens beträgt der Temperaturunterschied zwischen Herdplatte und Kochgut mehrere hundert Grad und der Wärmevorrat ist unendlich.

Letzteres ist im natürlichen Untergrund leider nicht der Fall. In horizontaler Richtung existiert keine unendliche Wärmequelle, sondern einzig ein riesiges Volumen (360°) mit gleicher Temperatur wie vor dem Anlegen des Temperaturgefälles. Hier wird sich mit dem Lauf der Zeit der Wärmenachfluss verringern, d.h. die abgekühlte Bereich wird immer grösser.

In vertikaler Richtung ist dies anders:

- von „oben“: der unerschöpfliche Wärmevorrat Globalstrahlung der Sonne. Die Sonnenwärme dringt im ungestörten Zustand bis ca. 20 m in den Untergrund ein. Diese Tiefe von 20 m gilt als atmosphärische Pufferzone. Im Sommer dringt Wärme ein, im Winter geht Wärme verloren. Je nach Beschaffenheit der Erdoberfläche (Strasse, Fels, Gras, Wald, Schnee) dringt ein mehr oder weniger grosser Teil der Sonnenstrahlung in den Untergrund ein. Sobald sich jedoch eine künstliche Wärmesenke im Untergrund befindet (Erdwärmesonde) wird die Tiefe dieser Pufferzone vergrössert. Die Pufferzone gilt in diesem Fall ebenfalls als Wärmevorrat zum Ausgleich des Temperaturgefälles.
- von „unten“: Als unerschöpflicher Vorrat gilt hier die kontinuierliche Wärmeproduktion in den obersten rund 30 km (natürlicher Zerfall von Radioisotopen) und der Wärmeabfluss aus dem heissen Erdkern: 99% des Erdballs sind heisser als 1000°C! Durch die künstliche Wärmesenke wird ein Teil dieses natürlichen Wärmeflusses eingesammelt.

Ein weiterer, sehr wichtiger, aber bisher nicht erwähnter Vorgang zur Ausgleichung der Temperatursenke ist der advective Wärmetransport, d.h. das Zuführen von Wärme durch Wasserbewegung (Grundwasser, Sickerwasser, Wasserdampfdiffusion im gesättigten Untergrund etc.). Dieser Vorgang hat einen wesentlich stärkeren Effekt auf die Wärmezufuhr als die bisher beschriebenen reinen Wärmeleitungsvorgänge. Allerdings stehen diese Advektionsvorgänge nicht immer über die ganze Ausdehnung der Wärmesenke zur Verfügung.

Die effektiv im Untergrund während und nach einem Wärmeentzug stattfindenden Temperaturausgleichsvorgänge sind also sehr komplex. Kommt hinzu, dass der Wärmeentzug in unterschiedlichen Abständen während unterschiedlichen Zeiten erfolgt.

2 ERNEUERBARKEIT

Nach Inbetriebnahme einer Wärmepumpenanlage mit Erdwärmesonden wird zunächst einmal das Erdreich rund um die Erdwärmesonde abgekühlt. Dadurch entsteht ein Temperaturtrichter in der Erde, der sich mit zunehmendem Energieentzug vergrössert. In einer ersten Betriebsphase einer Erdwärmesonde wird also die im Nahbereich der Sonde in der Erde gespeicherte Wärme genutzt. Wird der Wärmeentzug eingestellt (z. B. im nächsten Sommer), so verflacht sich der Temperaturtrichter, d.h. die Wärme fliesst in dieser Zeit zunächst horizontal aus den weiter entfernten Erdschichten nach, an der Energiebilanz für die Erde ändert sich auch in dieser 2. Betriebsphase noch wenig. Diese Vergrösserung des Temperaturtrichters kann mehrere Jahre, bei sehr langen Erdwärmesonden und fehlendem Grundwasserstrom sogar Jahrzehnte dauern. Glücklicherweise gibt es aber nicht nur ein horizontales, sondern auch ein vertikales Nachströmen von Wärme. Und je grösser der Radius des Temperaturtrichters wird, um so grösser wird auch der vertikale Wärmefluss, bis in einer 3. Phase des Wärmeentzugs ein neuer Gleichgewichtszustand (=Beharrungszustand) erreicht wird, bei dem im Jahresschnitt gleich viel Wärme vertikal nachfliesst, wie mit der Sonde entzogen wird.

Woher kommt im Beharrungszustand nun aber die Wärme? Von da, wo der Wärmenachfluss besser ist (schnellerer Wärmenachfluss, grössere Temperaturdifferenz, grösseres Reservoir)! Die Vorgänge lassen sich mit einem vereinfachten Bild beschreiben: Im Kleinmassstab wird im untersten Teil der Erdwärmesonde der geothermische Wärmefluss massiv verstärkt durch Ein-

sammeln der nachfliessenden Wärme über einen grösseren Bereich. Wird wiederum das Gesamtsystem betrachtet, so fehlt gewissermassen diese weiter unten abgezogene Wärme in den oberen Schichten. Hier springt die Sonne ein! Das entstandene Defizit wird von der Erdoberfläche her aufgefüllt. Die atmosphärische Pufferzone wird also massiv vergrössert.

Verglichen mit dem unbeeinflussten Erdreich provozieren wir mit unserem Temperaturtrichter im Gleichgewichtszustand also einen zusätzlichen Wärmestrom von der Erdoberfläche ins Erdreich, dessen Grösse in etwa identisch ist mit dem Wärmeentzug aus der Sonde. Dieses Nachfliessen von oben ist natürlich nur dann möglich, wenn die Oberflächentemperaturen der Erde höher sind als die tieferen Erdschichten. Dies ist bei uns nur im Sommerhalbjahr der Fall. Insofern könnte man bei der Nutzung der untiefen Geothermie auch von passiver, saisonaler Wärmespeicherung sprechen. In diesem Sinne ist die untiefe Geothermie auch eine der wichtigsten Formen der erneuerbaren Energien.

3 MODELLRECHNUNGEN

Von verschiedenen Exponenten aus ganz Europa und Amerika wurde in den vergangenen 25 Jahren immer wieder versucht, diese komplexen Vorgänge um die Erdwärmesonde in mathematische Formeln zu packen. Das Spektrum reicht dabei von der Handberechnung mit analytischen Lösungen bis hin zu dreidimensionalen Finite-Elemente-Programmen.

Für die meisten Fragestellungen reichen aber in der Regel einfachere Ansätze, die sich auf die reine Wärmeleitung im Erdreich beschränken. Allen Ansätzen gemeinsam ist die Notwendigkeit, Randbedingungen zu setzen. Auch die komplexesten Modelle brechen die Berechnung räumlich irgendwo ab. Und dort muss entweder eine Temperatur oder ein Wärmestrom vorgegeben werden. Durch das Setzen dieser Randbedingungen kann die Energiebilanz bereits vorgegeben werden. Nicht immer liefern komplexe Ansätze für jede Fragestellung eine genauere Lösung. Interessiert z. B. die gegenseitige Wechselwirkung von verschiedenen Erdwärmesonden in einem Sondenfeld, so liefert die Überlagerung von 2-dimensional berechneten Einzelsonden die genaueren Ergebnisse als 3-dimensionalen Rechenmodelle. Sobald aber die Symetrie durch Grundwasserströme gebrochen wird, kommen die 3-dimensionalen Ansätze wieder zum Zug. Die Tauglichkeit einer Rechenmethode ist also immer bezüglich einer konkreten Fragestellung zu prüfen.

4 REFERENZEN

- BFE (1998): Geothermie. Praktische Nutzung von Erdwärme. Bundesamt für Energie. EDMZ-Nr. 805.016d.
- Eugster, W. (1991): Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. Diss. ETH Nr. 9524.
- Eugster, W.; Hopkirk, J.; Rybach, L.; (1999): Ist untiefe Geothermie erneuerbar? Bundesamt für Energie, Programm Geothermie, Bern.
- Huber, A.; Pahud, D. (1999): Erweiterung des Programms EWS. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern.
- Huber, A.; Pahud, D. (1999): Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie? Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Geothermie, Bern.