

Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt:

Geothermie in 100% Erneuerbare Energie-Regionen

1 100% Erneuerbare Energie-Region

Energiekrisen, ungelöste Probleme der Atomkraft, unübersehbare Anzeichen des Klimawandels - in den vergangenen Jahrzehnten wurden vielfältige Bestrebungen ausgelöst, um Rohstoffengpässe und Umweltschädigung zu mildern - mit effizienter Energieverwendung und zunehmender Nutzung erneuerbarer Energien.

Inzwischen wächst aber das Bewusstsein, dass es mit einzelnen graduellen Verbesserungen nicht getan sein wird. Der weitergehende Ansatz der "100% Erneuerbare-Energie-Region" wird vielerorts intensiv verfolgt. Dabei geht es um eine dauerhaft aufrecht zu erhaltende Vollversorgung von Regionen ausschließlich mit erneuerbaren Energien aus heimischen Quellen. Die Attraktivität dieses Ansatzes liegt in folgender Überlegung:

1. Eine dauerhaft zukunftssichere Energieversorgung wird zwangsläufig völlig ohne fossile und atomare Energien allein mit erneuerbaren Energien auskommen müssen.
2. Die absehbar drastischen Rückgänge von Fördermengen, die ungelöste Atommüllfrage und die dramatische Entwicklung des Klimawandels machen einen schnellen Abschied von fossilen und atomaren Energien unausweichlich. Dafür bleiben nur wenige Jahrzehnte. Diese Spanne ist zu kurz, um noch Zeit und Mittel mit 'Brückentechnologien' zu verschwenden, alle Kräfte müssen auf zukunftsweisende Lösungen konzentriert werden.
3. Durch Vollversorgung aus heimischen Quellen besteht neben einer Stärkung der regionalen Wirtschaft die historische Chance, die hochgradige Abhängigkeit von Importenergien und das damit verbundene Konfliktpotenzial zu überwinden.

Ziel der vorliegenden Betrachtung ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Geothermie unter den Bedingungen von 100% Erneuerbare Energie-Regionen auszuloten.

2 Geothermie

Wegen der grundlegend andersartigen Bedingungen ist es sinnvoll, die übliche und beispielsweise in der VDI-Richtlinie 4640 [KALT, S. 396] festgelegte Unterscheidung zwischen oberflächennaher Geothermie bis in eine Tiefe von 400 m und Tiefen-Geothermie in tieferen Erdschichten zu übernehmen.

Für die vorliegende Betrachtung wurde die oberflächennahe Geothermie mit der Wärmegewinnung aus Umgebungsluft unter dem Begriff 'Umgebungswärme' zusammengefasst, da die Energie wegen des niedrigen Temperaturniveaus in beiden Fällen nur durch Einsatz von Wärmepumpen nutzbar gemacht werden kann.

2.1 Umgebungswärme (Wärmepumpe)

Viele Befürworter erneuerbarer Energien lehnen elektrische Wärmepumpen für Gebäudebeheizung zurzeit als nicht zielführend ab, an prominenter Stelle beispielsweise der Bund für Umwelt- und Naturschutz [BUND, S. 5, 10]. Und tatsächlich: Weder ökologisch noch ökonomisch konnte die elektrische Wärmepumpe bisher überzeugen.

Unter den heutigen Bedingungen sind signifikante Vorteile nicht erkennbar, im Vergleich zu modernen Erdgasheizungen beispielsweise. Bei der vorherrschenden Speisung mit Strom aus konventionellen Kraftwerken ist die Primärenergiebilanz wegen der niedrigen Kraftwerkswirkungsgrade und der in der Praxis schlechten Wärmepumpen-Jahresarbeitszahlen oft negativ. Außerdem wird befürchtet, dass durch vermehrte Installation elektrisch betriebener Wärmepumpen die Stromnachfrage steigt und dass dies den Atomausstieg verzögert oder zum Neubau weiterer Kohlekraftwerke führt.

Völlig anders dürfte sich die Situation allerdings unter den veränderten Randbedingungen künftiger 100% Erneuerbare Energie-Regionen darstellen:

- ❖ Die bestmögliche Nutzung sämtlicher heimischen Quellen wird erforderlich sein, da die Summe der technischen Potenziale nach heutigem Erkenntnisstand erheblich unter dem gegenwärtigen Verbrauch liegen dürfte.
- ❖ Die häufig als Alternative zur elektrischen Wärmepumpe empfohlenen Quellen können nur begrenzte Beiträge liefern, zum Beispiel: Die größtenteils im Sommer anfallende Solarwärme muss in großen, aufwändigen und verlustbehafteten Speichern für den Winter bevorratet

werden; das vorhandene Brennstoffangebot der Region für Holzpellet- und andere Biomasseheizungen wird sich nicht wesentlich steigern lassen und nur bescheidene Beiträge zur Wärmeversorgung bringen; Erdgas zum Betrieb von Blockheizkraftwerken oder Kesseln wird in einer 100% Erneuerbare Energie-Region ohnehin nicht mehr zur Verfügung stehen.

- ❖ Die beheizten Gebäude werden durch Dämmung überwiegend auf Passivhaus-Standard gebracht worden sein, um auch bei dem begrenzten regionalen Energieangebot angenehme Innentemperaturen zu erreichen; hier erzielen Wärmepumpen hohe Jahresarbeitszahlen durch Nutzung der Wärme in der Abluft.
- ❖ Der Strom wird vollständig aus erneuerbaren Quellen stammen, bei denen, mit Ausnahme von Biomasse, keine derartig hohen Umwandlungsverluste wie bei den heutigen Wärmekraftwerken auftreten.
- ❖ Ein großer, wenn nicht sogar der größte Beitrag an der Stromerzeugung wird von Windkraftanlagen kommen, deren Energieerzeugung abhängig vom Wind stark schwankt.

Unter diesen veränderten Randbedingungen könnte sich die elektrische Wärmepumpe als hochwillkommener Baustein für eine auf Zukunftsfähigkeit ausgerichtete Energieversorgung erweisen. Und zwar, um mit überschüssigem Windstrom in Starkwindzeiten Umweltwärme zu gewinnen, die viel einfacher und kostengünstiger gespeichert werden kann, als Strom. Angebot und Nachfrage passen gut zusammen, da die Starkwindzeiten überwiegend in die kalte Jahreszeit fallen. Saisonspeicher zur Aufnahme der sommerlichen Solarwärme für die Heizperiode, die in Starkwindzeiten mit Umweltwärme nachgeladen werden, könnten kleiner und damit kostengünstiger ausgelegt werden.

Solange der Wärmeentzug auf die Umgebungsluft und die dicht unter der Erdoberfläche in Boden und Grundwasser gespeicherte Solarwärme beschränkt ist, handelt es sich um erneuerbare Energie, die bei der heute üblichen Auslegung auf lange Sicht ohne Erschöpfung gewonnen werden kann (siehe Anhang A: Leistung und Flächenbedarf der oberflächennahen Geothermie).

Luftwärmepumpen weisen vergleichsweise niedrigere Jahresarbeitszahlen auf. Das liegt an der Temperatur der Energiequellen, während der Heizperiode ist die Umgebungsluft kälter als das Erdreich. Um den Strombedarf zu minimieren, wird hier deshalb ausschließlich oberflächennahe Geothermie betrachtet.

Wegen der hohen erzielbaren Leistung pro Fläche bräuchten nur wenige Prozent der Gebäude- und Freiflächen mit Erdkollektoren belegt werden, um dauerhaft erhebliche Beiträge zur Energieversorgung zu liefern (siehe Exemplarische Betrachtung im Anhang A). Begrenzender Faktor für den Wärmepumpeneinsatz ist demnach weniger die Verfügbarkeit von Flächen sondern eher die Verfügbarkeit von anderweitig schlecht nutzbaren Stromüberschüssen als Antriebsenergie.

Die Gewinnung von Umgebungswärme mit Elektro-Wärmepumpen könnte somit zu einem wertvollen Baustein der Energiegewinnung werden, dafür müssten aber die folgenden Bedingungen erfüllt sein: Hochgedämmte Gebäude mit niedrigem Wärmebedarf, Ausbau der Stromerzeugungs-Kapazitäten parallel zur Installation weiterer Wärmepumpen, Lastregelung zur Nutzung von überschüssigem Strom und geeignete Speicher zur Aufnahme der damit gewonnenen Wärme. Dabei ist besonderes Augenmerk auf die Entwicklung geeigneter Speicher zu richten, die praktikable Speicherdichten auch bei den durch die Wärmepumpen vorgegebenen geringen Temperaturdifferenzen erreichen; in Frage kommen Latentspeicher, bei denen die Schmelzwärme bestimmter Materialien genutzt wird, und Sorptionsspeicher, die auf chemischer Reaktionswärme basieren. [BINE19, S. 2]

2.2 Tiefen-Geothermie

Tiefen-Geothermie nutzt den Erdwärmestrom, der vom heißen Erdkern und aus radioaktiven Zerfallsprozessen in der Erdkruste gespeist wird. Dieser ist mit einer Dichte von 0,063 Watt pro Quadratmeter [BINE8, S. 2] [KALT, S. 106] vergleichsweise schwach. Seine Intensität liegt bei nur einem halben Promille des Solarwärmestroms, der in Deutschland mit ca. 115 Watt pro Quadratmeter auf die Erdoberfläche einwirkt.

Die bisher realisierten oder geplanten Geothermieprojekte sind durchweg so ausgelegt, dass weitaus mehr Energie gefördert wird, als der Erdwärmestrom nachliefern kann. Die Energie stammt vielmehr fast ausschließlich von gespeicherter Erdwärme aus Tiefenwasser oder Gestein (vgl. [KALT, S. 107, 528]), welches durch die Entnahme abkühlt. Damit ist die Nutzungsdauer begrenzt auf die Zeitspanne, innerhalb der die Speichertemperatur auf einen nicht mehr nutzbaren Wert absinkt. Die anschließende Wiederaufladung nimmt ein Vielfaches dieser Zeitspanne in Anspruch.

Bei einer heute typischen Auslegung der Fördermengen auf eine Ausbeutungsdauer von 100 Jahren [KALT, S. 486] kann die Tiefen-Geothermie keinesfalls als erneuerbare Energiequelle gelten. Nur bei

extensiver Nutzung könnte Tiefen-Geothermie den Prinzipien der 100% Erneuerbare Energie-Region gerecht werden, wenn nämlich die entnommenen Energiemengen auf ein dauerhaft nutzbares Maß beschränkt blieben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich Tiefen-Geothermie unter diesen Voraussetzungen weit ab von jeder Wirtschaftlichkeit befindet. Praktisch sind heute keinerlei Ansätze erkennbar, die Tiefen-Geothermie extensiv und damit dauerhaft zu nutzen.

Eine denkbare Möglichkeit zur Überwindung des Problems könnte in der feldweisen Bewirtschaftung bestehen: Die im festen Untergrund eines Feldes gespeicherte Wärme wird gefördert und nach dessen Entladung das nächste Feld erschlossen. Die Region müsste dafür in entsprechend viele Felder aufgeteilt werden, so dass nach Entladung des letzten Feldes sich das erste wieder regeneriert hat. Dieses Verfahren funktioniert nur mit ortsfest im Gestein gespeicherter Wärme, nicht mit Thermalwasser. Voraussetzung ist, dass die geologischen Gegebenheiten eine entsprechend weiträumige Erschließung überhaupt zulassen. Aber auch bei einer derartigen feldweisen Bewirtschaftung wäre auf die gesamte Region bezogen dauerhaft nur die Dichte des Erdwärmestroms verfügbar.

Aus physikalischen Gründen ist dieser schwache Energiestrom noch nicht einmal voll nutzbar (die Zusammenhänge werden im Anhang B behandelt). Am konkreten Beispiel des in Betrieb befindlichen geothermischen Heizkraftwerkes in Unterhaching bei München wurde ermittelt, dass in der Region bei theoretisch vollflächiger geothermischer Erschließung weniger als 1 % des heutigen Strombedarfs oder 5,7 % des Wärmebedarfs dauerhaft aus dem laufenden Erdwärmestrom gewonnen werden könnte (siehe Beispielrechnung im Anhang B).

Alle Planungen, die von größeren Beiträgen ausgehen, können nur auf der Ausbeutung endlicher Speicher beruhen und widersprechen damit dem 100%-Ansatz. Die im Beispiel angenommene geothermische Erschließbarkeit der gesamten Fläche einer Region erscheint zudem geologisch wie ökonomisch als aussichtslos. Die praktisch erzielbaren Beiträge zur Energieversorgung werden deshalb vermutlich noch weit unter den theoretischen Werten liegen.

3 Anhang

Anhang A: „Leistung und Flächenbedarf der oberflächennahen Geothermie“

Anhang B: „Erdwärmestrom, Leistung und Flächenbedarf der Tiefen-Geothermie“

4 Literatur

AGENER: AG Energiebilanzen - "Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2007"

BINE8: BINE Informationsdienst - "basisEnergie 8 - Geothermie", ISSN 1438-3802, FIZ Karlsruhe GmbH, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

BINE19: BINE Informationsdienst - "basisEnergie 19 - Wärme und Strom speichern", ISSN 1438-3802, FIZ Karlsruhe GmbH, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

BUND: Neumann, Dr. W. / Schönauer - S., "positionen 42 - Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie", Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V., Bestellnummer 11.042, März 2007

GENESIS: Statistische Ämter des Bundes und der Länder - "Regionaldatenbank Deutschland", <https://www.regionalstatistik.de/genesis/>

KALT: Kaltschmidt, M. / Streicher, W. / Wiese, A. - "Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte", 4. Auflage, ISBN-13 978-3-540-28204-4, Springer

SK: Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich - Szenario "100%EE-Region Land Niedersachsen (A)", Nds._2009-10-1_19-38-6.xls

STATBU: Statistisches Bundesamt Deutschland - "Fortschreibung des Bevölkerungsstandes Deutschland"

UNTER: Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG - Internetauftritt im Stand vom 03.10.2009, <http://www.geothermie-unterhaching.de>

Anhang A: Leistung und Flächenbedarf der oberflächennahen Geothermie

In den oberflächennahen Bodenschichten wirken zwei Wärmeströme: Von unten der Erdwärmestrom mit einer Energiedichte von $0,063 \text{ W/m}^2$ und von oben der ungleich intensivere Solarwärmestrom mit einer Energiedichte von ca. 115 W/m^2 . [BINE8]

Die auf Dauer während einer Heizperiode dem Boden entziehbare Wärme liegt bei $360 \text{ MJ/m}^2/\text{a}$ [KALT, S. 410] entsprechend $11,4 \text{ W/m}^2$ bzw. $100 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ bzw. 1000 MWh/ha/a .

Die mit Wärmepumpen bereitgestellte Nutzwärme ist noch höher, da zur Umgebungswärme die elektrische Antriebsenergie hinzukommt, die ebenfalls fast vollständig in nutzbare Wärme umgesetzt wird.

Um beispielsweise in Niedersachsen 22 Prozent des gesamten heutigen Wärmebedarfs aus oberflächennaher Geothermie mit Wärmepumpen zu decken, würde die Erdwärme von 5,6 Prozent der Gebäude- und Freiflächen genügen, wobei die bisherige Nutzung dieser Flächen kaum beeinträchtigt wäre (siehe Beispielrechnung unten).

Es ist davon auszugehen, dass ein noch deutlich größerer Anteil an Gebäude- und Freiflächen für Wärmegewinnung nutzbar wären, beispielsweise 13 Prozent nach Schätzung von M. Kaltschmidt. [KALT, S. 452]

In einem Beispielszenario würden 6.206 GWh/a (siehe Beispielrechnung unten) entsprechend 18 Prozent der Stromerzeugung aus Onshore-Windkraft (34.490 GWh/a) als Antriebsenergie für die Wärmepumpen genutzt, wobei eine moderate Ausweitung der Windparkflächen von 1,2 Prozent der Landesfläche im Jahr 2007 auf 2 Prozent unterstellt wurde. [SK]

Es erscheint durchaus als realistisch, dass der für Wärmepumpen angesetzte 18 Prozent Anteil an der Windstromerzeugung voll mit anderweitig kaum nutzbarer Spitzenleistung aus Starkwindphasen zu decken ist.

Beispielrechnung:

5,6 % der gesamten Gebäude- und Freiflächen im Land Niedersachsen (332.812 Hektar [GENESIS]) ergeben eine für oberflächennahe Geothermie (z. B. Erdkollektoren) beanspruchte Fläche von 18.637 Hektar .

Mit einer jährlich dem Boden entziehbaren Wärme von $360 \text{ MJ/m}^2/\text{a}$ [KALT, S. 410] entsprechend $100 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ bzw. 1000 MWh/ha/a werden in Niedersachsen so 18.637 GWh/a Umgebungswärme gewonnen.

Die Jahresarbeitszahl AZ gibt das Verhältnis von bereitgestellter Nutzwärme NW zu eingesetzter Antriebsenergie an:

$$(1) \quad AZ = NW / AE$$

Die Nutzwärme NW setzt sich zusammen aus der dem Erdboden entzogenen Wärme EW und der Antriebsenergie AE:

$$(2) \quad NW = EW + AE$$

Bekannt sind EW und AZ, gesucht sind AE und NW; dazu wird zunächst (1) nach NW umgestellt und in (2) eingesetzt:

$$AZ * AE = EW + AE$$

$$AZ = EW / AE + 1$$

$$EW / AE = AZ - 1$$

$$(3) \quad AE = EW / (AZ - 1)$$

Bei einer durch technischen Fortschritt leicht erhöhten durchschnittlichen Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen von 4,0 sind gemäß (3) für den Antrieb jährlich pro Hektar 333 MWh/ha/a und für Niedersachsen 6.206 GWh/a Strom erforderlich.

Die insgesamt bereitgestellte Nutzwärme beläuft sich gemäß (2) auf 24.843 GWh/a , das entspricht einem Anteil von 10,7 % am Gesamtenergieverbrauch Niedersachsens 2007 (231.395 GWh/a [GENESIS]) und 22,2 % am Wärmebedarf (111.801 GWh/a [GENESIS]).

Anhang B: Erdwärmestrom, Leistung und Flächenbedarf der Tiefen-Geothermie

Der Erdwärmestrom ist nicht in vollem Umfang nutzbar.

Dies rührt daher, dass die Ableitung von Nutzwärme aus dem natürlichen Wärmestrom zu einem Absinken der Temperatur in der Tiefe und damit auch des Fördermediums führt.

Welcher Teil der Erdwärme tatsächlich dauerhaft genutzt werden kann, hängt davon ab, welche Mindesttemperatur für die Nutzung erforderlich ist.

Im Folgenden wird eine Methode beschrieben, mit der die maximale, dauerhaft erzielbare Leistung aus Erdwärme in Abhängigkeit von der Mindesttemperatur bestimmt werden kann.

Betrachtet werden die statischen Verhältnisse an einem quaderförmigen Ausschnitt der Erdkruste mit der Grundfläche A , der von der Erdoberfläche bis in die Tiefe von förderungswürdigen Wärmevorkommen reicht (Abb. 1).

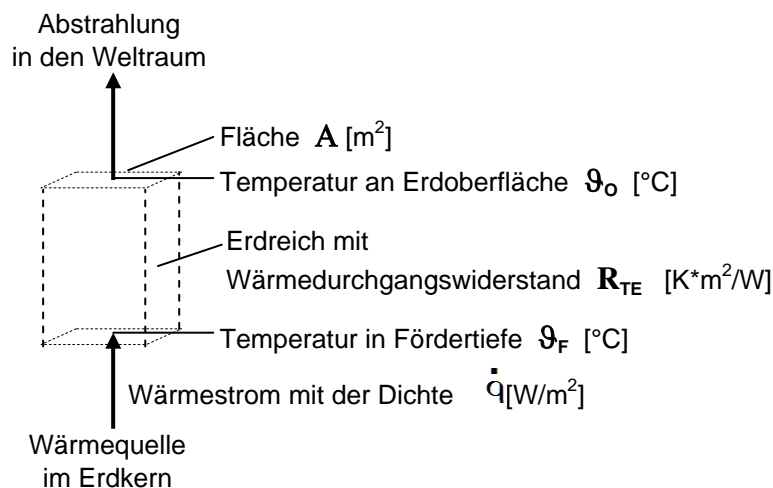


Abb. 1: Wärmestrom in der Erdkruste

Die im Erdinneren und durch radioaktive Zerfallsprozesse in der Erdkruste entstandene Wärme strömt mit einer Energiedichte von im globalen Mittel $q = 0,063 \text{ W}/\text{m}^2$ beständig zur Erdoberfläche, wo sie in die Atmosphäre gelangt und letztlich in den Weltraum abgestrahlt wird. [BINE, S. 2] [KALT, S. 528]

Der Wert gilt - abgesehen von örtlich begrenzten Störungszonen - praktisch für alle Regionen Deutschlands.

Die Materialien, aus denen die Erdkruste besteht, sind relativ schlechte Wärmeleiter, das Erdreich setzt dem Wärmestrom einen Wärmedurchgangswiderstand R_{TE} entgegen.

Auf dem Weg von der unteren Eintrittsfläche des Quaders mit der Temperatur Θ_F nimmt diese ständig ab, bis an der Erdoberfläche schließlich Umgebungstemperatur Θ_0 herrscht.

Für die weiteren Betrachtungen sind die Verhältnisse in einem Wärmeflussdiagramm schematisiert dargestellt.

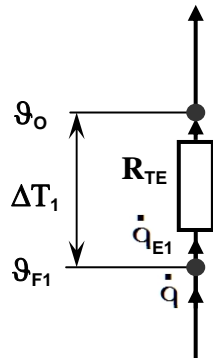


Abb. 2: Wärmeflußdiagramm

Ohne geothermische Nutzung geht der Wärmestrom q als q_{E1} ungemindert auch durch den gedachten Quader.

$$(1) \quad \dot{q}_{E1} = \dot{q} = 0,065 \text{ W/m}^2$$

Für die weiteren Betrachtungen wird die Temperatur-Differenz ΔT zwischen den Temperaturen auf Förderniveau ϑ_F und an der Erdoberfläche ϑ_o gebildet.

$$(2) \quad \Delta T_1 = \vartheta_{F1} - \vartheta_o$$

Der Zusammenhang zwischen Temperatur-Differenz, Wärmestromdichte und Wärmedurchgangswiderstand ist in (3) allgemein und (4) bezogen auf das Wärmeflussdiagramm (Abb. 2) dargestellt.

$$(3) \quad \Delta T = \dot{q} * R_T$$

$$(4) \quad \Delta T_1 = \dot{q} * R_{TE}$$

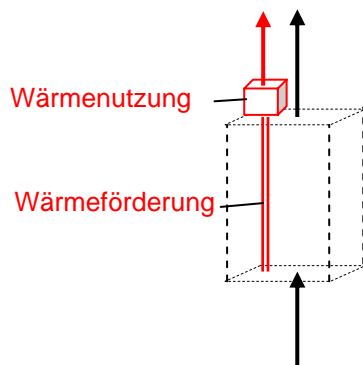


Abb. 3: Wärmeförderung und -nutzung

Um die Erdwärme nutzen zu können, muss sie mittels eines Wärmeträgers (üblicherweise Wasser) über eine Bohrung an die Erdoberfläche gefördert werden (die Rückleitung des abgekühlten Wassers ist hier der Einfachheit nicht mit dargestellt).

Nach der Nutzung wird die Wärme ebenfalls ins Weltall abgestrahlt.

Das Wärmeflussdiagramm wurde entsprechend erweitert:

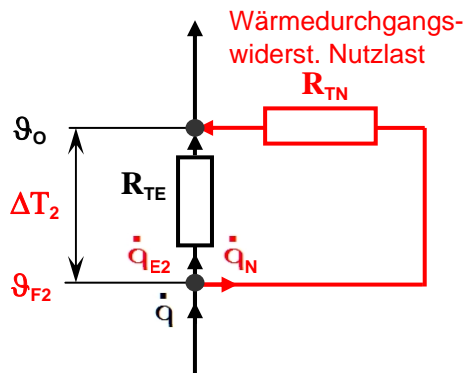


Abb. 4: Wärmeflussdiagramm mit Nutzlast

Der Wärmestrom aus dem Erdinneren mit der Dichte \dot{q} teilt sich auf in einen Wärmestrom, der über die Bohrung durch die Nutzlast führt, und den Wärmestrom mit der Dichte \dot{q}_{E2} durch den gedachten Quader.

$$(5) \quad \dot{q}_{E2} = \dot{q} - \dot{q}_N$$

Um ein handhabbares Modell zu erhalten, wird der Wärmestrom über die Nutzlast ebenfalls auf die Grundfläche des gedachten Quaders bezogen und als Wärmestromdichte \dot{q}_N angegeben.

Auf diese Weise kann analog zum Wärmedurchgangswiderstand des Erdreiches R_{TE} ein gleichartiger Wärmedurchgangswiderstand für die Nutzlast R_{TN} eingeführt werden.

Die beiden Wärmedurchgangswiderstände liegen parallel im Wärmestrom, der resultierende Gesamt-Wärmedurchgangswiderstand ist geringer als jeder der Einzelwiderstände und berechnet sich allgemein folgendermaßen:

$$(6) \quad R_{res} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

Für R_T in (3) eingesetzt ergibt sich daraus eine gegenüber dem ursprünglichen Zustand unterschiedliche, verringerte Temperaturdifferenz ΔT_2 :

$$(7) \quad \Delta T_2 = \dot{q} * \frac{R_{TE} * R_{TN}}{R_{TE} + R_{TN}}$$

Da die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche Θ_0 als konstant anzunehmen ist, stellt sich eine unterschiedliche, verringerte Förder-Temperatur Θ_{F2} ein:

$$(8) \quad \Theta_{F2} = \Theta_0 + \Delta T_2$$

Umgestellt und ausmultipliziert ergibt sich aus (7):

$$(9) \quad \Delta T_2 * (R_T + R_{TN}) = \dot{q} * R_{TE} * R_{TN}$$

$$(10) \quad \Delta T_2 * R_{TE} + \Delta T_2 * R_{TN} = \dot{q} * R_{TE} * R_{TN}$$

Zum Ersatz der beiden unbekanntem Wärmedurchgangswiderstände wird (3) umgestellt:

$$(11) \quad R_{TE} = \frac{\Delta T_1}{\dot{q}}$$

$$(12) \quad R_{TN} = \frac{\Delta T_2}{\dot{q}_N}$$

(11) und (12) in (10) eingesetzt und nach \dot{q}_N aufgelöst:

$$(13) \quad \Delta T_2 * \frac{\Delta T_1}{\dot{q}} + \Delta T_2 * \frac{\Delta T_2}{\dot{q}_N} = \dot{q} * \frac{\Delta T_1}{\dot{q}} * \frac{\Delta T_2}{\dot{q}_N}$$

$$(14) \quad \dot{q}_N = \dot{q} * \frac{\Delta T_1 * \Delta T_2 - \Delta T_2^2}{\Delta T_1 * \Delta T_2}$$

Es wird der Koeffizient k eingeführt, der die minimal gerade noch nutzbare Temperaturdifferenz ΔT_2 im Verhältnis zur ursprünglichen Temperaturdifferenz ΔT_1 angibt:

$$(15) \quad k = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}$$

(15) eingesetzt in (14) ergibt sich schließlich:

$$(16) \quad \dot{q}_N = \dot{q} * (1 - k)$$

Es wird ersichtlich, dass ein um so größerer Anteil des natürlichen Wärmestroms dauerhaft nutzbar gemacht werden kann, je geringer die Ansprüche der Nutzungstechnologie an die Förder-Temperatur ϑ_{F2} sind, entsprechend einem kleinen ΔT_2 und einem kleinen k .

Beispielrechnung:

In Unterhaching bei München wurde am 02.06.2009 das größte geothermische Heizkraftwerk Deutschlands eingeweiht:

Aus einer Tiefe von 3.300 m wird Thermalwasser mit einer Temperatur von 122 °C zum Zeitpunkt des Betriebsbeginns gefördert, die verfügbare thermische Leistung beträgt ca. 38 MW. [UNTER]

Die Energie kann je nach Witterung zur Produktion von Fernwärme für Heizzwecke oder von Strom bis zu einer Leistung von 3,4 MW genutzt werden. [UNTER]

Die Stromerzeugung arbeitet nach dem Kalina-Kreislaufprozess, die Wirkungsgrade liegen abhängig von der Förder-Temperatur zwischen 8,5% bei 80°C und 12% bei 160°C [KALT, S. 516].

Geht man von einer Förder-Temperatur $\vartheta_{F2} = 90^\circ\text{C}$ für einen stabilen Kraftwerksbetrieb aus, ergibt sich mit $\vartheta_0 = 10^\circ\text{C}$ nach (2) für $\Delta T_2 = 80 \text{ K}$.

Aus der ursprünglichen in Fördertiefe herrschenden Temperatur $\vartheta_{F1} = 122^\circ\text{C}$ ergibt sich mit $\vartheta_0 = 10^\circ\text{C}$ nach (2) für $\Delta T_1 = 112 \text{ K}$.

Gemäß (15) ergibt sich daraus $k = 0,714$.

Mit $q = 0,063 \text{ W/m}^2$ ergibt sich gemäß (16) ein dauerhaft nutzbarer Wärmestrom mit der Dichte $q_N = 0,018 \text{ W/m}^2$ entsprechend **1,58 MWh/ha/a**.

Mit einer thermischen Leistung von 38 MW und einem für die Stromerzeugung angenommenen Wirkungsgrad von $\eta = 9\%$ liegt die elektrische Leistung bei 3,42 MW, bei angenommenen 8000 Volllaststunden werden jährlich 27.360 MWh/a an Strom erzeugt.

Bei einem durchschnittlichen jährlichen pro Kopf-Stromverbrauch von 6.438 kWh/a [AGENER] wird rechnerisch der Bedarf von 4.250 Einwohnern voll gedeckt.
Bei einer thermischen Leistung von 38 MW und angenommenen 8000 Volllaststunden wird jährlich eine Energiemenge von 304.000 MWh/a gefördert.
Mit der für eine dauerhafte Nutzung maximal zulässigen Wärmestromdichte von 1,58 MWh/ha/a wäre eine Erntefläche von 192.796 ha entsprechend 1928 km² erforderlich.
Bei einer Bevölkerungsdichte in Deutschland von 231 Einwohner/km² [STATBU] entspricht das rechnerisch der Lebensraum von 445.358 Menschen.
Daraus ergibt sich, dass 0,95% des Strombedarfs der Menschen in der beanspruchten Fläche durch Tiefengeothermie dauerhaft gedeckt werden könnte.

Bei Einspeisung der Erdwärme ins Fernheiznetz wird ein Netznutzungsgrad von 60 Prozent angenommen. [KALT, S. 570].
Für die Förder-Temperatur kann $\vartheta_{F2} = 60^{\circ}\text{C}$ angesetzt werden, ausreichend für die Brauchwasserbereitung und die Flächenheizungen in den hochgedämmten Gebäuden der Fernheizkunden. Mit $\vartheta_{O} = 10^{\circ}\text{C}$ ergibt sich daraus nach (2) für $\Delta T_2 = 50 \text{ K}$.
Aus der ursprünglichen in Fördertiefe herrschenden Temperatur $\vartheta_{F1} = 122^{\circ}\text{C}$ ergibt sich mit $\vartheta_{O} = 10^{\circ}\text{C}$ nach (2) für $\Delta T_1 = 112 \text{ K}$.
Gemäß (15) ergibt sich daraus $k = 0,446$.
Mit $q = 0,063 \text{ W/m}^2$ ergibt sich gemäß (16) ein dauerhaft nutzbarer Wärmestrom mit der Dichte $q_N = 0,035 \text{ W/m}^2$ entsprechend **3,06 MWh/ha/a**.
Mit einer thermischen Förderleistung von 38 MW und einem angenommenen Netznutzungsgrad von $\eta = 60\%$ [KALT, S. 570] liegt die den Fernheizungskunden bereitgestellte thermische Leistung bei maximal 22,8 MW. Da die Wärmeabnahme jahreszeitlich und witterungsbedingt stark schwankt, werden dafür 3000 Volllaststunden angesetzt und somit jährlich 68.400 MWh/a Wärme an die Fernwärmekunden geliefert.
Bei einem durchschnittlichen jährlichen pro Kopf-Wärmeverbrauch von 14.007 kWh/a wird der heutige Bedarf von 4.883 Einwohnern voll gedeckt.
Bei einer thermischen Leistung von 38 MW und angenommenen 3000 Volllaststunden wird jährlich eine Energiemenge von 114.000 MWh/a gefördert.
Mit der für eine dauerhafte Nutzung maximal zulässigen Wärmestromdichte von 3,06 MWh/ha/a wäre eine Erntefläche von 37.315 ha entsprechend 373 km² erforderlich.
Bei einer Bevölkerungsdichte in Deutschland von 231 Einwohner/km² [STATBU] entspricht das rechnerisch der Lebensraum von 86.198 Menschen.
Daraus ergibt sich, dass theoretisch maximal 5,7 % des Wärmebedarfs der Menschen in der beanspruchten Fläche durch Tiefengeothermie dauerhaft gedeckt werden könnte.