

Planung und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen: Basis einer nachhaltigen Erdwärmennutzung, VDI-Richtlinie 4640 und Berechnungsverfahren

von Manfred Reuß und Burkhard Sanner

Einleitung

Während der letzten Jahre erfuhr der Markt mit erdgekoppelten Wärmepumpen einen bemerkenswerten Aufschwung. Ebenso verhält es sich mit Wärmespeichern im Untergrund, die zum Heizen, kombiniert zum Heizen und Kühlen, oder zum Kühlen alleine verwendet werden. Eine verbesserte Technik zu einem immer erschwinglicheren Preis einerseits, die positiven Auswirkungen auf unsere Umwelt durch die erhebliche Reduzierung der Emissionen von CO₂ und anderen Schadstoffen, sowie die Unsicherheit bezüglich der Verfügbarkeit und Kostenentwicklung fossiler Brennstoffe andererseits haben hierzu beigetragen.

Die richtige Auslegung der Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes entscheidet meist über den technischen und wirtschaftlichen Erfolg. Eine zu knappe Dimensionierung kann zu erheblichen Problemen im Betrieb führen, von überhöhten Betriebskosten bis hin zu Umwelt- und Bauschäden, und eventuell sogar die Stilllegung erforderlich machen. Die Überdimensionierung der Wärmequellenanlage führt zu hohen Investitionen, die Anlagen werden unwirtschaftlich und behindern die Verbreitung der Technik.

Es ist deshalb von besonderer Bedeutung bei der Auslegung sorgfältig vorzugehen. Die nachfolgenden Ausführungen zu erdgekoppelten Wärmepumpen sollen hierzu eine Hilfestellung geben. Thermische Energiespeicher im Untergrund werden hier nicht behandelt, ihre Auslegung erfordert aufwendigere Verfahren und muß gesondert betrachtet werden.

Allgemeines zur Auslegung

Bei der Planung muß die für den Standort günstigste Wärmequelle ausgewählt und das Heizsystem sowie die anderen Anlagenteile daran angepaßt werden. In diesem Zusammenhang soll auf die drei häufigsten Systeme eingegangen werden. Wärme aus dem Untergrund kann

- durch Abpumpen von Grundwasser,
- über horizontale Erdreichwärmeübertrager (Erdwärme-, Grabenkollektoren) oder
- über vertikale Erdreichwärmeübertrager (Erdwärmesonden)

gewonnen werden. Die Entscheidung für horizontale oder vertikale Erdreichwärmeübertrager wird durch die geologischen Standortbedingungen und den Platzbedarf oder durch bauliche Gegebenheiten festgelegt.

Die Auslegung der Wärmequellenanlage erfordert eine möglichst genaue Kenntnis des Wärmebedarfes und der zeitlichen Verteilung des Heizenergieverbrauches. Daraus ergibt sich:

- Auslegungsleistung der Wärmequellenanlage

- Verdampfungsleistung der Wärmepumpe (sie wird beispielsweise aus der Heizleistung und der Arbeitszahl ermittelt)
- Jahresbetriebsstunden bzw. Vollaststunden
- Spitzenbelastung der Wärmequelle (peak load).

Eine gute Kenntnis der Geologie und Hydrogeologie erlaubt Rückschlüsse auf die thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes und ermöglicht damit die Wahl der geeigneten Entzugstechnik.

Wärmequelle Grundwasser

Das Grundwasser wird über einen oder mehrere Förderbrunnen entnommen, deren Förderleistung die Dauerentnahme bei Nenndurchfluß der Wärmepumpe gewährleistet. Allgemein ergibt sich eine Fördermenge von etwa 0,25-0,3 m³/h je 1 kW Verdampferleistung bei einer Temperaturänderung von 3 K.

Neben der ausreichenden Wasserförderung muß auch die Rückführung in denselben Aquifer über einen oder mehrere Schluckbrunnen gewährleistet sein. Diese müssen in Grundwasserfließrichtung in ausreichendem Abstand liegen. Die Temperaturänderung des zurückgeleiteten Wassers sollte dabei ± 6 K nicht überschreiten.

Eine weitere wichtige Größe, die die Auslegung der Anlage beeinflusst, ist die Wasserqualität. Neben den Hauptinhaltsstoffen des Wassers sind die Temperatur, der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und das Redoxpotential zu bestimmen. Daraus können Rückschlüsse auf die Verockerungsgefahr der Brunnen und Korrosionsgefahr für Werkstoffe gezogen werden.

Wärmequelle Erdwärmekollektoren

Die häufigste Bauform eines horizontalen Erdreichwärmeübertragers ist der Erdwärmekollektor. Hierbei handelt es sich um ein Register aus Kunststoffrohr das im Erdreich in etwa 1,2 - 1,5 m Tiefe verlegt ist. Es wird von kaltem Wärmeträgermedium durchflossen und entzieht so dem Boden Wärme. Die nachfolgenden Überlegungen zur Auslegung beziehen sich vorwiegend auf diese Bauform, andere Typen wie Grabenkollektoren, Spiralrohre, etc. werden hier nicht betrachtet.

Generell ist bei Erdwärmekollektoren zu berücksichtigen, daß der geothermische Wärme fluß (0,1 W/m²) hier vernachlässigt werden kann. Sie nutzen den von oben kommenden Wärmestrom, der von den darüberliegenden Bodenschichten aus der direkten oder indirekten Sonnenenergie (Strahlung, Regen, etc.) aufgenommen wird. Damit sind bei der Auslegung und Planung nicht nur die thermischen Bodeneigenschaften maßgebend, sondern auch die Lage der Fläche mit ihrem Umfeld. Aus den hier kurz aufgeführten Gründen dürfen Erdwärmekollektoren weder überbaut noch die Oberfläche darüber versiegelt werden. Je nach Bodenbeschaffenheit schwankt die dem Erdreich entzogene Wärmeleistung zwischen 10 - 40 W/m².

In SIA (1996) wird eine vereinfachte Methode zur Dimensionierung eines Erdwärmekollektors an Hand eines Nomogramms vorgeschlagen (siehe Abb. 1). Die Verhältnisse des Untergrundes werden dort wie folgt charakterisiert.

- Normale Verhältnisse: Feuchter, siltig-sandiger Boden bei normaler Sonneneinstrahlung; spez. Entzugsleistung 20 - 30 W/m² (Bodenklasse 2 und 3 in Abb. 1).
- Ungünstige Verhältnisse: Steiniger Boden, trocken und schattig; spez. Entzugsleistung 8 - 12 W/m² (Bodenklasse 4 in Abb. 1).
- Überdurchschnittliche Verhältnisse: Sandiger, wassergesättigter Boden mit überdurchschnittlicher Sonneneinstrahlung; spez. Entzugsleistung 35 - 40 W/m² (Bodenklasse 1 in Abb. 1).

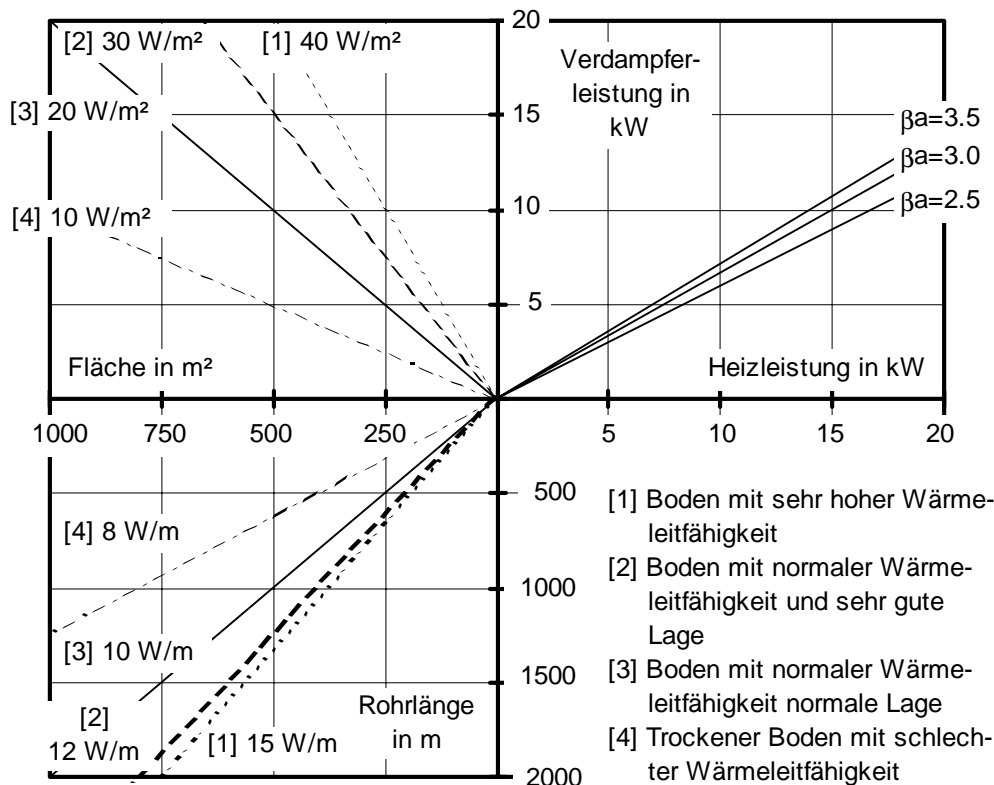


Abb. 1: Nomogramm zur Dimensionierung eines Erdwärmekollektors nach SIA (1996)

Beispiel:

Bei einer Heizleistung von 15 kW und einer Jahresarbeitszahl von 3,5 beträgt die Verdampferleistung 10,7 kW. Für einen Untergrund der Klasse 2 (in Abb. 2) mit 30 W/m² spezifischer Entzugsleistung benötigt man eine Fläche von 360 m² und eine Gesamtrohrlänge von 895 m.

Um auch bei längeren Laufzeiten in anhaltenden Kälteperioden ausreichend Energie entziehen zu können, soll die spezifische Entzugsarbeit im Bereich 50 - 70 kWh/m²a liegen. Dies bedeutet, daß die genutzte Erdfläche etwa das 1,5- bis 2-fache der zu beheizenden Fläche betragen soll. Für Niedrigenergie- oder Passivhäuser kann dieser Wert deutlich unterschritten werden. Bei Dauerbetrieb (Wochenmittel) soll die Fluideintrittstemperatur nach VDI (1998)

in den Erdwärmekollektor von der Bodentemperatur um weniger als ± 12 K abweichen, bei Spitzenlast ± 18 K.

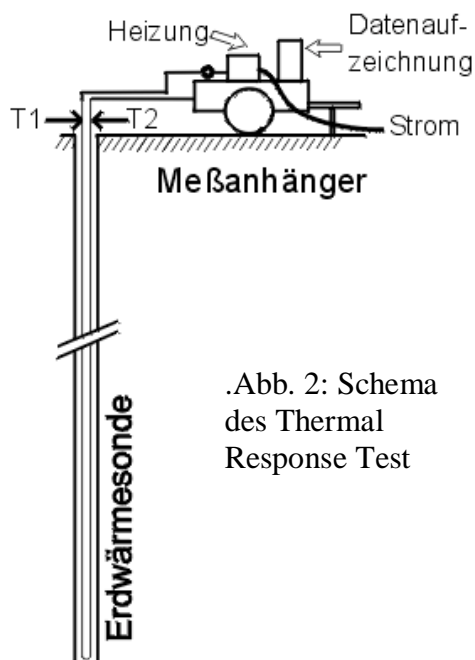
Wärmequelle Erdwärmesonden

Erdwärmesonden sind vertikale Erdreichwärmeübertrager. Es handelt sich dabei um Rohrsonden (Einfach-U-, Doppel-U-, Koaxial-Sonden, etc.) meist aus Kunststoff in senkrechten Bohrlöchern. Zur guten thermischen Anbindung der Rohre an den Untergrund und zur Abdichtung des Bohrloches, wird dieses nach Einbau der Sonde mit einem speziellen Material verfüllt.

Erdwärmesonden werden in Deutschland meist nur bis 100 m Tiefe eingesetzt, da darüber hinaus eine bergrechtliche Genehmigung erforderlich ist. Wie auch bei den Erdwärmekollektoren ist eine möglichst genaue Dimensionierung notwendig. Unterdimensionierung führt bei großem Wärmeentzug zu starker Abkühlung des Untergrundes bis hin zur Frostbildung. Dadurch verringert sich einmal die Effizienz der Wärmepumpe, zum anderen können sich die tieferen Schichten im Sommer wegen des begrenzten Wärmenachflusses nicht mehr vollständig regenerieren. Die Fluideintrittstemperatur darf nach VDI (1998) im Dauerbetrieb den Bereich von ± 10 K relativ zur Temperatur des ungestörten Untergrundes nicht überschreiten, bei Spitzenlast ± 15 K.

Bestimmung der thermischen Untergrundparameter

Allgemein hängt die Auslegung von der Art des Untergrundes ab. Einflußfaktoren sind die thermische Leitfähigkeit, die Feuchte (bei Lockergesteinen) und eventuell ein Grundwasserfluß. Die nötigen Kennwerte werden bei kleinen Anlagen auf der Basis einer Untergrundeinschätzung angenommen (z.B. nach Informationen aus geologischen Karten), bei größeren Anlagen jedoch durch eine Standortuntersuchung bestimmt. Für den wichtigsten Parameter,



.Abb. 2: Schema des Thermal Response Test

die Wärmeleitfähigkeit, gibt es inzwischen neben der Berechnung aus lithologischen Angaben oder der Messung im Labor (an möglichst ungestörten Proben aus einer Erkundungsbohrung) das Verfahren der direkte Messung an einer Erdwärmesonde (Thermal Response Test).

Der große Vorteil des thermischen Response-Test ist, das er an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde durchgeführt wird, die später Teil der Anlage sein kann. Es gibt also keine verlorenen Bohrungen. Weitere Vorteile sind die Messung über die gesamte Bohrlochlänge, die Einbeziehung der Bohrlochverfüllung, und die ungestörten Untergrundverhältnisse einschließlich evtl. vorhandenen Grundwasserflusses.

Bei einem Thermal Response Test wird eine definierte Wärmeleistung an die Erdwärmesonde angelegt (s. Abb. 2; meist Aufheizung), und der sich

dabei ergebende Verlauf der Ein- und Austrittstemperaturen an der Erdwärmesonde aufgezeichnet.

Die Entwicklung des Verfahrens ist bei SANNER et al (1999) beschrieben. Das erste mobile Gerät für diesen Test wurde in Schweden entwickelt und eingesetzt. (EKLÖF & GEHLIN, 1996; GEHLIN & NORDELL, 1997). In Deutschland wird der Thermal Response Test z.Zt. von der Landtechnik Weihenstephan der TU München, der Firma UBeG GbR in Wetzlar und der AETNA Energiesystem GmbH in Wildau ausgeführt.

Die verbreitetste Methode der Auswertung eines Thermal Response Test basiert auf der KELVIN'schen Linienquellentheorie. Diese wurde bereits in den 40er Jahren für die Berechnung erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen verwendet, um die Temperaturentwicklung im Erdreich zeitabhängig zu erfassen (INGERSOLL & PLASS, 1948). Die Methode ist in Abb. 3 dargestellt.

Auswertung nach einer aus der Linienquellentheorie abgeleitete Funktion:		
$\text{Steigung} = \frac{Q}{4\pi H \lambda_{\text{eff}}}$		
mit	Steigung	Steigung der Kurve des Temperaturanstiegs gegen ln(Zeit)
	Q	Wärmeleistung (Eintrag/Entzug)
	H	Erdwärmesondenlänge
	λ_{eff}	Effektive Wärmeleitfähigkeit (d.h. einschließlich Einfluß von Grundwasser, Bohrlochverfüllung etc.)
Mindestzeit, unterhalb derer die Daten für diese Form der Auswertung nicht verwendet werden dürfen:		
$t_b = \frac{5r^2}{\alpha}$		
mit	t_b	Mindestzeit / untere Grenze
	r	Bohrlochradius
	α	Thermische Diffusivität ($\alpha = \lambda / \rho c_p$), mit angenommenen Werten
Der thermische Bohrlochwiderstand kann nach folgender Formel berechnet werden:		
$R_b = \frac{H}{Q} \cdot (T_f - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - 0,5772 \right)$		
mit	Q	Wärmeeintrag
	H	Bohrlochtiefe
	T_0	Ungestörte Erdreichtemperatur
	T_f	Mittlere Fluidtemperatur
	λ	Wärmeleitfähigkeit (W/m/K)
	α	Thermische Diffusivität
	r	Bohrlochradius
	t	Zeit

Abb. 3: Formeln zur Auswertung des Thermal Response Test

Für die Auswertung nach der Linienquellentheorie ist eine ausreichende Laufzeit des Versuchs erforderlich. Das Mindestzeit-Kriterium hilft dabei, den passenden Kurvenabschnitt zu ermitteln. EKLÖF & GEHLIN (1996) fanden deutliche Abweichungen bei zu kurzer Meßdauer. Grundsätzlich ist die Temperaturkurve auch optisch auf Inkonsistenzen zu prüfen, da die Steigung sehr stark in die Auswertung eingeht. Wenn z.B. Schwankungen von Einspeiselei-

stung oder Temperaturen im Tagesverlauf festgestellt werden, hilft bei der Auswertung nach der Linienquellentheorie nur eine ausreichend lange Meßzeit, um diese Schwankungen auszugleichen. Durch längere Meßzeiten können auch Störungen, wie sie z.B. durch Wärmeentwicklung beim Abbinden des Verfüllmaterials entstehen, reduziert werden.

Als Beispiel sei eine Messung aus dem Raum südlich von Frankfurt genannt, die mit dem Gerät der UBeG GbR im Sommer 1999 durchgeführt wurde. Abb. 4 zeigt die Regressionsgerade der Fluid-Mitteltemperaturen für eine 50-Stunden-Messung (nur Werte über 6,9 Stunden). Die Parameter der Erdwärmesonde und die Ergebnisse sind in Tab. 1 aufgeführt.

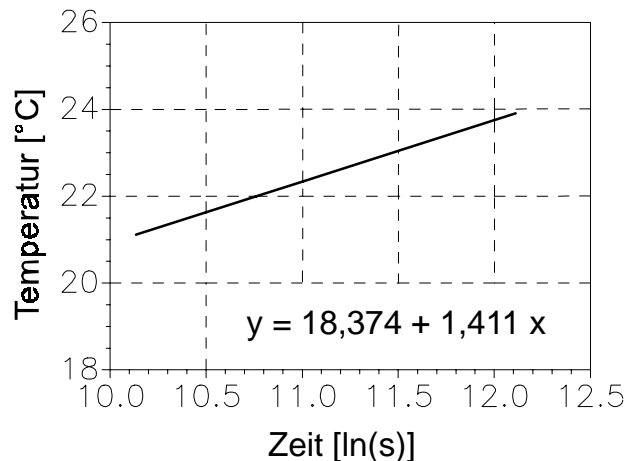


Abb. 4: Regressionsgerade der Fluid-Mitteltemperatur des Thermal Response Test südlich Frankfurt/Main

Tab. 1: Technische Daten und Meßergebnisse einer mit dem Thermal Response Test gemessenen Erdwärmesonde südlich Frankfurt/Main

Erdwärmesonden- und Standortdaten		Ergebnisse des Thermal Response Tests	
Erdwärmesondenlänge	H = 99 m	Meßzeit	50,2 Stunden
Erdwärmesondentyp	HDPE-Doppel-U	Wärmeleistung in EWS	Q = 4900 W
Bohrlochdurchmesser	2r = 150 mm	therm. Bohrlochwiderst.	r _b = 0,11 K/(W/m)
mittl. Erdreichtemperatur	T ₀ = 12,2 °C	Wärmeleitfähigkeit	λ _{eff} = 2,79 W/m/K

Vor allem durch die mobilen Meßgeräte bekommt der Thermal Response Test eine erhebliche Bedeutung für die korrekte Auslegung von Erdwärmesondenanlagen. Er ist nicht nur bei der Dimensionierung größerer Erdwärmesondenanlagen unverzichtbar, es bietet sich auch an, aus einer Vielzahl von Messungen ein Kataster anzulegen. Zudem bietet er die Möglichkeit, in Streitfällen die Auslegung von Anlagen zu überprüfen. Ein Thermal Response Test sollte daher in Zukunft bei jeder größeren Anlage durchgeführt werden. Entsprechende Standardverfahren und Richtlinien müssen in den nächsten Jahren erarbeitet werden.

Kann man Erdwärmesonden mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen?

Seit Beginn des Einsatzes von Erdwärmesonden in Europa (um 1980) wird die Frage nach der möglichen „Sondenleistung“ oder „Entzugsleistung“ gestellt. Dabei wird angenommen, daß eine Erdwärmesonde eine bestimmte Wärmeleistung zu erbringen in der Lage ist, wie es z.B.

bei einem Öl- oder Gasbrenner der Fall ist. Der Charme einer solchen Betrachtung liegt darin, daß mit geringem Aufwand die Bestimmung der notwendigen Erdwärmesondenlänge möglich ist:

$$\text{Notwendige Erdwärmesondenlänge (m)} = \frac{\text{Verdampferleistung der Wärmepumpe (W)}}{\text{spezifische Entzugsleistung (W / m)}}$$

Die Verdampferleistung ergibt sich im einfachsten Fall aus dem Heizbedarf und der erwarteten Wärmepumpen-Arbeitszahl. Falls eine Wärmepumpe eingesetzt werden soll, die deutlich größer ist als dem Heizbedarf entspricht, ist unbedingt die tatsächliche Wärmepumpen-Verdampferleistung heranzuziehen.

Schon bald wurde erkannt, daß ein wesentlicher Faktor für die Größe der Entzugsleistung in der Ausbildung des Untergrunds liegt, und je nach Standortbedingungen erhebliche Unterschiede bestehen. Nach heutiger Kenntnis ist dabei wesentlich die Wärmeleitfähigkeit entscheidend, bei bestimmten Untergrundbedingungen wie z.B. lockeren Sanden und Kiesen auch der Grundwasserfluß (genauer die fließende Grundwassermenge pro Zeiteinheit, die durch die Darcy-Geschwindigkeit angegeben wird). Aus der Erfahrung wurden dann spezifische Entzugsleistungen angegeben, die von etwa 30-80 W/m schwankten, im Extremfall bis zu 120 W/m. Es ging soweit, daß in Ausschreibungen „Erdsonden mit einer Leistung von 120 W/m“ gefordert wurden (wie man es bei einem technischen Wärmeerzeuger angeben könnte; man möchte schließlich die beste Erdwärmesonde haben...).

Vor allem die Betriebsdauer, die sich in einer jährlich entzogenen Wärmemenge (in kWh/m/a) äußert, ist zu beachten (SANNER, 1992). Hierbei spielt sowohl die Art der Anlage (z.B. bivalent, Erdwärme in der Grundlast) als auch das Standortklima eine Rolle (EUGSTER et al., 1992). Während die spezifische Entzugsleistung entscheidend für den Betrieb der Anlage während eines Einschaltzyklus ist, ist die entzogene Wärmemenge für den langfristigen Betrieb entscheidend. Nur bei richtiger Auslegung nach diesem Parameter handelt es sich bei der Erdwärmesonde tatsächlich um die Nutzung erneuerbarer Energie, wie es z.B. von EUGSTER (1998) an einer Anlage aus dem Kanton Zürich gezeigt werden konnte.

In Abb. 5 ist exemplarisch die Abhängigkeit der spezifischen Entzugsleistung von der Anzahl der Jahresvollaststunden dargestellt. Für ein Gebäude mit 10 kW Wärmebedarf und einer Wärmepumpen-Arbeitszahl $\beta = 3,5$ wurden die möglichen spezifischen Entzugsleistungen mit dem unten erwähnten Programm EED berechnet. Dabei wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds von $\lambda = 2,0$ W/m/K angenommen und kein Grundwasserfluß berücksichtigt. Gerechnet wurde mit Jahresvollaststunden von 1000 h/a bis 8760 h/a (d.h. Dauerlauf). Für den typischen Wohnhausfall mit etwa 1800 Jahresvollaststunden ergibt sich eine mögliche spezifische Entzugsleistung von 42,6 W/m bei zwei Erdwärmesonden.

Bivalente Anlagen (die allerdings heute erst ab rund 100 kW geplant werden) können 3000-5000 Jahresvollaststunden aufweisen, da die Erdwärme in der Grundlast verwendet wird. Damit sinken die möglichen Entzugsleistungen auf unter 20 W/m. Für Werte von mehr als etwa 6000 Jahresvollaststunden mußte mit 3 Erdwärmesonden weitergerechnet werden, da für das 10-kW-Gebäude ansonsten mehr als 200 m tiefe Erdwärmesonden erforderlich würden. Bei Dauerbetrieb sind noch knapp 10 W/m zu entziehen; dies entspricht dann der dauernd von allen Seiten (Oberfläche, umgebendes Gestein, geothermischer Wärmefluß) zuströmenden Wärmemenge bei einem Gradienten von ca. 15 K zwischen dem Fluid in der Erdwärmesonde und dem ungestörten Erdreich.

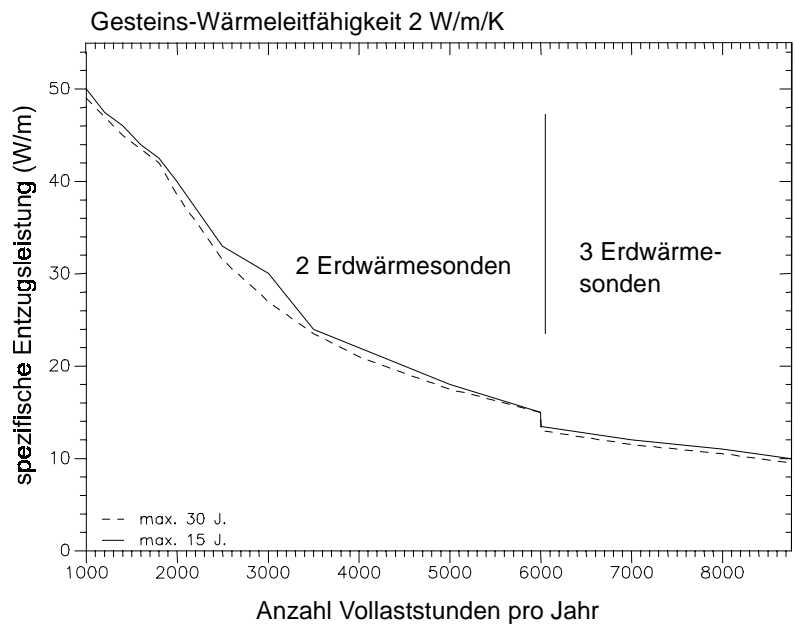


Abb. 5: Abhängigkeit der spezifischen Entzugsleistung von der Anzahl der Jahresvollaststunden, berechnet für ein Gebäude mit 10 kW Wärmebedarf und einer Wärmepumpen-Arbeitszahl $\beta = 3,5$, bei einer mittleren Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds von $\lambda = 2,0 \text{ W/m/K}$ und ohne nennenswerten Grundwasserfluß

Die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden ist nicht zu unterschätzen. Sie macht im reinen Heizbetrieb eine deutliche Vergrößerung der Erdwärmesondenlängen erforderlich, kann andererseits aber auch in Erdwärmesondenspeichern wie z.B. in Neckarsulm-Amorbach (SEIWALD & HAHNE, 1998) vorteilhaft ausgenutzt werden. In Abb. 6 ist ein Beispiel für 60 Wohnhäuser mit jeweils einer individuellen erdgekoppelten Wärmepumpe dargestellt, wiederum berechnet mit EED.

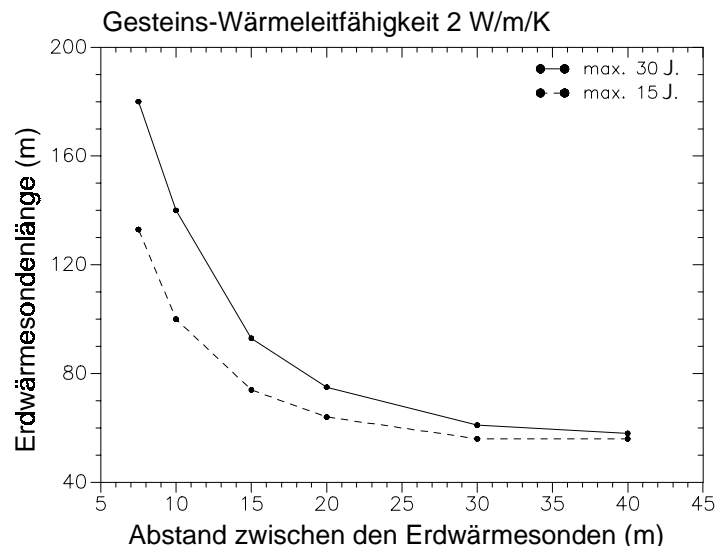


Abb. 6: Einfluß des Abstands zwischen den Erdwärmesonden auf die benötigte Erdwärmesondenlänge, berechnet für ein Feld mit 60 Häusern von je 7 kW Wärmebedarf und 2 Erdwärmesonden pro Haus. Kein Grundwasserfluß, keine künstliche Wiedererwärmung; berechnet für einen Zeitrahmen von 15 bzw. 30 Jahren.

Als Fazit aus dem Vorgesagten läßt sich schließen, daß die spezifische Entzugsleistung nur für einfach gelagerte Fälle ein Auslegungskriterium sein kann. Die Richtlinie VDI 4640, Bl. 2, trägt dem durch folgende Begrenzungen Rechnung:

- max. 1800 Jahresbetriebsstunden
- nur Wärmeentzug (Heizung einschl. Warmwasser)
- Länge der einzelnen Erdwärmesonden zwischen 40 und 100 m
- kleinster Abstand zwischen zwei Erdwärmesonden:
 - mindestens 5 m bei Erdwärmesondenlängen 40-50 m
 - mindestens 6 m bei Erdwärmesondenlängen >50-100 m
- Als Erdwärmesonden kommen Doppel-U-Sonden mit Durchmesser der Einzelrohre von 25 oder 32 mm oder Koaxialsonden mit mindestens 60 mm Durchmesser zum Einsatz.

Mit der fortschreitenden Bearbeitung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes sind Angaben über die Wärmeleitfähigkeit leichter zu erhalten. So kann ein Thermal Response Test am Standort Aufschluß geben (s.o.), oder Werte können aus Unterlagen herausgelesen werden, wie sie beispielhaft für das Schweizer Molassebecken existieren (LEU et al., 1999) und für Deutschland z.B. in Nordrhein-Westfalen erarbeitet werden. Abhängig von der Wärmeleitfähigkeit lassen sich aber nun sehr viel genauere Angaben zur Erdwärmesondenauslegung machen, als es z.B. in VDI 4640 geschieht.

Mit dem Computerprogramm EED zur Erdwärmesondenauslegung, das die Entwicklung der Fluidtemperaturen über eine Reihen von Jahren berechnet (HELLSTRÖM & SANNER, 1994), kann die notwendige Erdwärmesondenlänge und damit umgekehrt auch die spezifische Entzugsleistung berechnet werden. Dies ist für ein Gebäude, das in die o.g. Begrenzung nach VDI 4640 fällt, exemplarisch durchgeführt worden und in Abb. 7 dargestellt. Die Jahreskurve der mittleren Fluidtemperatur für diese Auslegung ist in Abb. 8 zu sehen.

Das Konzept der Auslegung mit Hilfe einer spezifischen Entzugsleistung ist also für kleine Anlagen ohne gegenseitige Beeinflussung tragfähig und vor allem einfach und schnell. Für größere Anlagen, eine größere Anzahl von Anlagen in einem begrenzten Gebiet, und für alle Anlagen zum Heizen und Kühlen kann jedoch nur eine genaue Berechnung empfohlen werden.

Erdwärmesonden für Einfamilienhäuser

Bis zu einer Heizleistung von ca. 20 kW schlägt die VDI 4640 Tabellenwerte, Nomogramme oder empirische Zusammenhänge vor; für die Anwendung dieser Methoden müssen jeweils bestimmte Voraussetzungen gegeben sein. Darüber hinaus gibt es Auslegungs- und Simulationsprogramme, die für kleinere aber auch größere Systeme verwendet werden können.

In Tabelle 2 sind spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden für unterschiedlichen Untergrund aufgeführt. Für die Anwendung dieser Tabelle sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- max. 1800 Vollaststunden
- nur Wärmeentzug aus den Sonden
- Sondenlänge 40 - 100 m
- minimaler Abstand zweier Erdwärmesonden
 - 5 m bei Erdwärmesondenlänge 40 - 50 m

- 6 m bei Erdwärmesondenlänge 50 - 100 m
- Doppel-U-Sonden mit Rohren von 25 mm oder 32 mm Durchmesser oder Koaxialsonden mit mindestens 60 mm Durchmesser

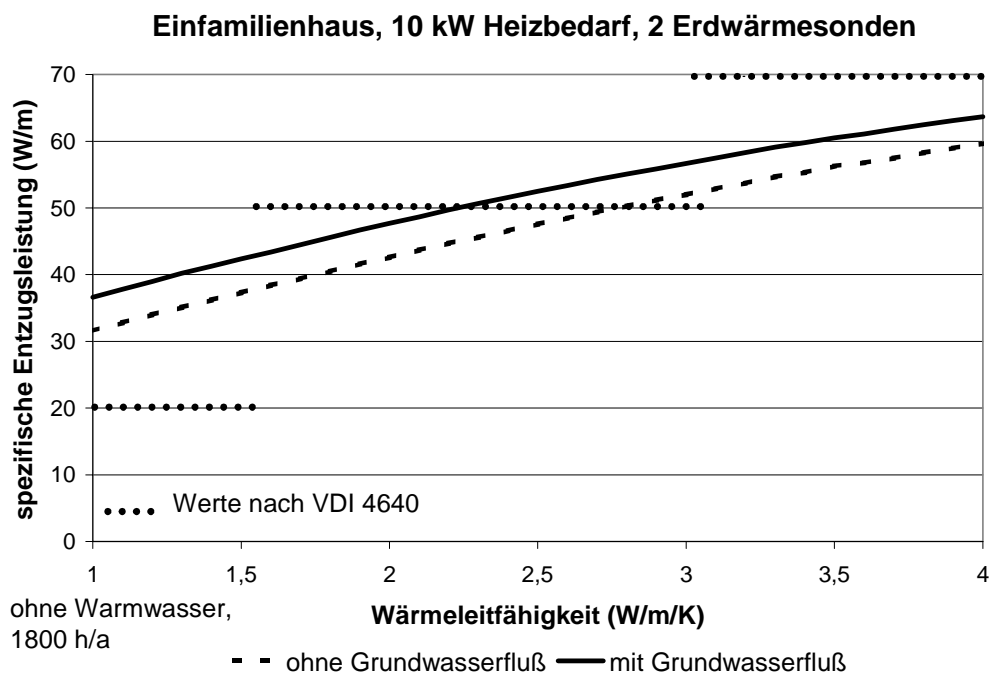
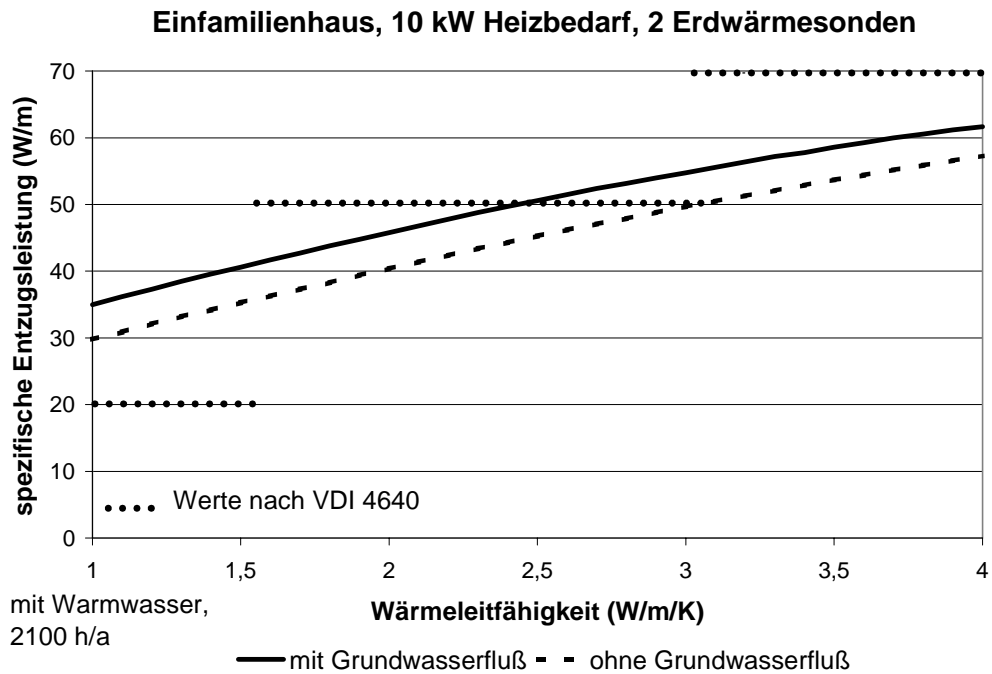


Abb. 7: Mögliche Entzugsleistungen für ein Wohnhaus mit 10 kW Wärmebedarf in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds, mit Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe (oben) bzw. ohne Warmwasserbereitung (unten)

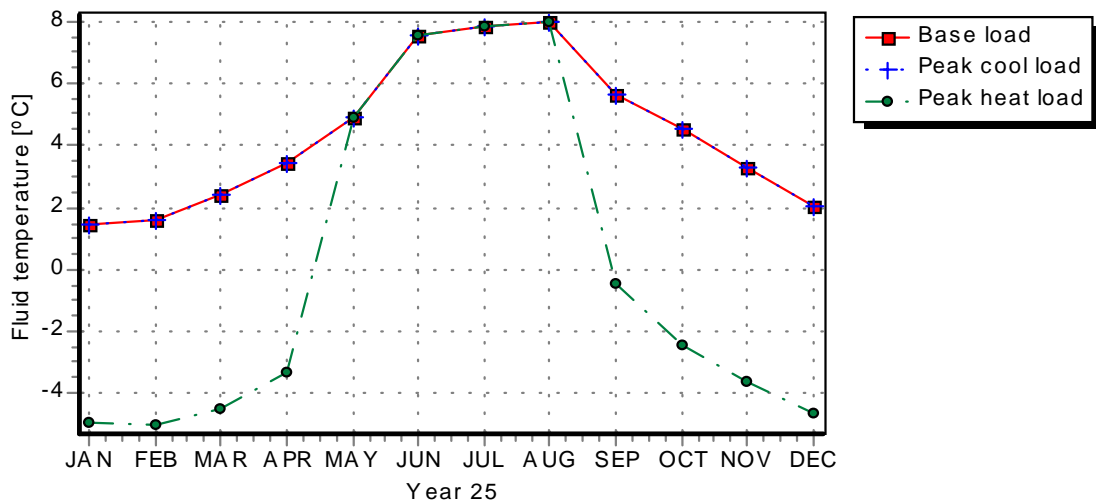
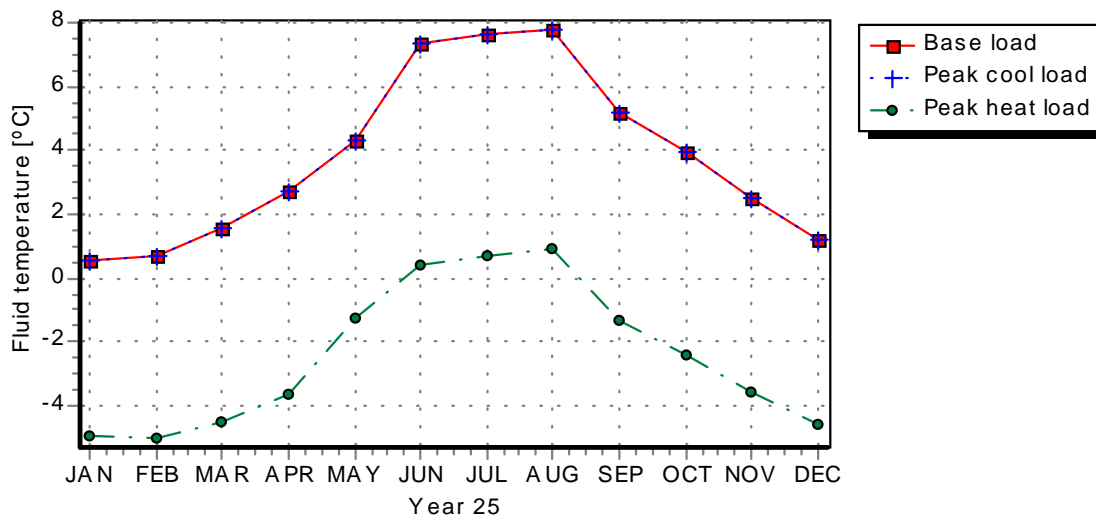


Abb. 8: Gewünschter Temperaturverlauf des Wärmeträgermediums (Mitteltemperatur) im 25. Betriebsjahr, wie er mit den Werten in Abb. 7 erreicht wird; mit Warmwasserbereitung (oben) bzw. ohne Warmwasserbereitung (unten)

Im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energiewirtschaft wurde für Kleinanlagen mit 1 - 2 Erdwärmesonden ein Nomogramm entwickelt, das zwar für die Verhältnisse in der Schweiz zugeschnitten ist, aber gute Anhaltswerte für Deutschland und Österreich gibt. Das Nomogramm (Abb. 9) beruht auf Simulationsrechnungen, allerdings wurde es nicht durch Feldmessungen validiert.

Ausgehend von dem Heizenergiebedarf wird die Heizleistung ermittelt. Unter Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse in unterschiedlichen Höhenlagen, erhält man daraus den Nomogramm-Eingangswert a , der nach Gleichung (1) errechnet wird. Über die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ergibt sich dann die benötigte Sondenlänge bei ein oder zwei Erdwärmesonden.

Tabelle 2: Spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden in Anlagen mit einer Heizleistung <20 kW (nach VDI 4640); Einsatzgrenzen der Tabelle s. Text

Untergrund	spez. Entzugsleistung	Erdwärmesondenlänge je 1 kW _{th}	
		a = 3	a = 3,5
Allgemeine Richtwerte:			
Schlechter Untergrund ($\lambda < 1,5$ W/mK)	20 W/m	33 m	36 m
Normales Festgestein und wassergesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5-3,0$ W/mK)	50 W/m	13 m	14 m
Festgestein mit $\lambda > 3,0$ W/mK	70 W/m	9,5 m	10 m
Einzelne Gesteine¹:			
Kies, Sand trocken	<20 W/m	>33 m	>36 m
Kies, Sand wasserführend	55 – 65 W/m	12 - 10 m	13 - 11 m
Ton, Lehm feucht	30 – 40 W/m	22 - 17 m	24 - 18 m
Kalkstein (massiv)	45 – 60 W/m	15 - 11 m	16 - 12 m
Sandstein	55 – 65 W/m	12 - 10 m	13 - 11 m
Saure Magmatite (z.B. Granit)	55 – 70 W/m	12 - 9,5 m	13 - 10 m
Basische Magmatite (z.B. Basalt)	35 – 55 W/m	19 - 12 m	20 - 13 m
Gneis	60 – 70 W/m	11 - 9,5 m	12 - 10 m
Starker Grundwasserfluß in Sand und Kies für Einzelanlagen	80 – 100 W/m	8,3 - 6,7 m	8,9 - 7,1 m

¹Die Werte können durch Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung erheblich schwanken

Weiterhin muß bei einer größeren Anzahl von Einzelanlagen an einem Standort wegen der gegenseitigen Beeinflussung die spezifische Entzugsleistung um 10 - 20 % reduziert werden; s. a. Abb. 6.

$$a = \frac{Q_{Ha}}{Q_{Ha}/\beta_a - Q_{pa}} \quad (1)$$

a Nomogramm - Eingangswert

Q_{Ha} Jahresheizenergiebedarf in kWh/a

β_a Jahresarbeitszahl

Q_{pa} jährlicher Energiebedarf der Nebenverbraucher (Umwälzpumpe) in kWh/a

Die Gültigkeitsgrenzen des Nomogramms sind folgendermaßen festgelegt:

Heizenergiebedarf	4 - 16 MWh/a
Heizleistung	3 - 8 MWh/a
Höhenlage	200 - 1400 m
Wärmeleitfähigkeit	1,2 - 4,0 W/mK
Sondenlänge (bei einer Sonde)	60 - 160 m
(bei zwei Sonden)	60 - 100 m
Nomogramm - Eingangswert	3,8 - 4,6

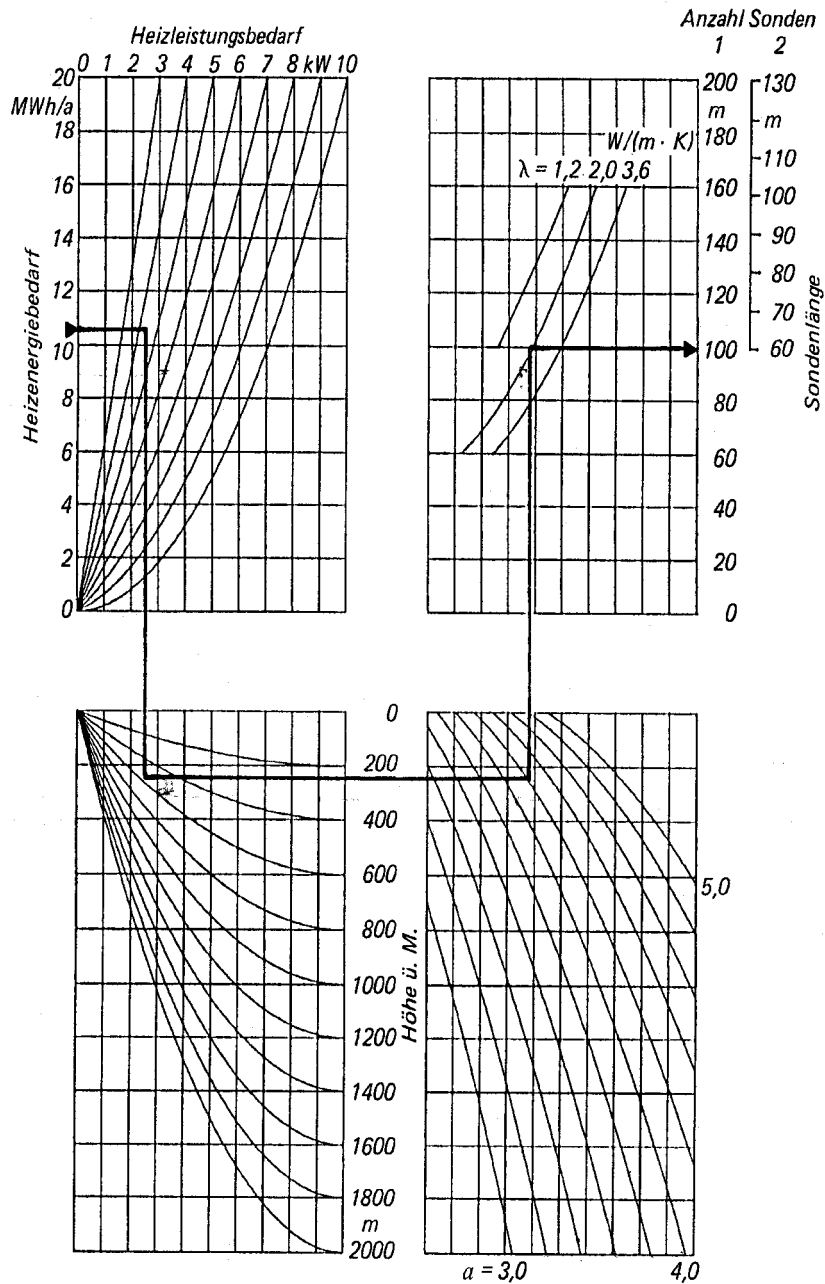


Abb. 9: Nomogramm zur Auslegung von Erdwärmesonden (nach Stadler et al., 1995, und VDI 4640)

Grundsätzlich ist bei Auslegung nach Tabellen, Faustformeln etc. zusätzlich zur spezifischen Entzugsleistung bei längeren Laufzeiten die jährlich entnommene Wärmemenge zu berücksichtigen, die den langfristigen Einfluß festlegt. Diese jährliche Entzugsarbeit soll bei reinem Wärmeentzug im Bereich 100 - 150 kWh/(ma) liegen. Ist eine Wärmeeinleitung mit vorgesehen (Nachladung), sind Abweichungen davon zugelassen.

Auslegung größerer Erdwärmesondenanlagen

Für die Auslegung größerer Anlagen, aber auch für eine genauere Berechnung kleinerer Anlagen stehen inzwischen verschiedene Computerprogramme zur Verfügung. Erste einfache Programme wurden möglich, nachdem aus einer Vielzahl von Berechnungen mit numerischer Simulation Zusammenhänge für das thermische Verhalten des Untergrundes bei verschiedenen Erdwärmesondenanordnungen, die sogenannten g-Funktionen, abgeleitet wurden (ESKILSON, 1987; CLAESSON & ESKILSON, 1988). Diese g-Funktionen hängen vom Abstand der Bohrungen an der Erdoberfläche und der Bohrlochtiefe ab; für den Fall geneigter Bohrlöcher kommt der Neigungswinkel dazu. Als Werkzeug zur Ermittlung der g-Funktionen diente das Simulationsprogramm SBM der Universität Lund, Schweden (ESKILSON & CLAESSON, 1988).

Auf der Grundlage der g-Funktionen wurden mehrere PC-Programme geschrieben (HELLSTRÖM, 1991), die für den Bereich der Erdwärmesonde und des Bohrloches eine analytische Lösung verwenden und für das Gestein auf eine Berechnung unter Einbeziehung der g-Funktionen zurückgreifen; diese sind in einem Datenfile gespeichert und werden von den PC-Programmen jeweils abgerufen. Diese Programme mit den Namen TFSING, TFMULT und TFSTEP berechnen die Temperaturen im Wärmeträgermedium bei einem bestimmten Wärmeentzug in W/m nach gegebenen Zeiträumen (Tage, Monate). Bei TFSTEP kann der Wärmeentzug in 12 Schritten (z.B. Monate) verändert werden.

Aufbauend auf TFSTEP bzw. den g-Funktionen wurden mehrere weiterführende Programme entwickelt, so GLHPRO in den USA und EED in Europa. Ebenso gibt es in Nordamerika einige Programme, die andere Methoden wie z.B. die Linienquellentheorie nutzen. Ein Vergleich mehrerer PC-Programme wurde in SHONDER et al (1999) durchgeführt. Allgemein kann gesagt werden, daß die auf der g-Funktions-Methode basierenden Programme recht genau die Temperaturverläufe im Wärmeträgermedium vorhersagen, einige andere Programme aber auch größere Abweichungen zeigen.

Für sehr umfangreiche Aufgaben mit genauer Berechnung der Temperaturverteilung im Untergrund muß auf numerische Simulation zurückgegriffen werden, sei es für den rein konduktiven Wärmetransport oder für die gekoppelte Berechnung des konduktiven (Gestein) und konvektiven (Grundwasser) Wärmetransports.

Auslegungsbeispiel Erdwärmesonden und Erdwärmekollektor

Anhand eines Beispiels soll die Auslegung mit den beschriebenen Verfahren gezeigt werden. Als Fallbeispiel wurde ein Einfamilienhaus mit folgenden Spezifikationen gewählt:

Wärmebedarf nach DIN 4701	Q_H	=	12 kW
Vollaststunden	t_a	=	1500 h/a

Heizungsvorlauftemperatur	T_v	=	30 - 35 °C
Jahresarbeitszahl	β_a	=	3,5
Entzugsleistung ($Q_{EWS} = Q_H \cdot \frac{\beta_a - 1}{\beta_a}$)	Q_{EWS}	=	8,6 kW
Untergrund	mittlerer Buntsandstein		
Wärmeleitfähigkeit von Sandstein	λ	=	2,3 W/(mK)

Fall 1: Berechnung nach Tabelle 2 - Allgemeine Richtwerte

Normaler Festgesteins-Untergrund (1.5 W/(mK) < (< 3.0 W/(mK)) mit $Q_{EWS} = 50$ W/m ergibt für $\beta_a = 3.5$ je 1 kW Heizleistung 14 m Sonde.

Erdwärmesondenlänge $L_{EWS} = 168$ m

Es müssen 2 Sonden zu je 84 m installiert werden.

Fall 2: Berechnung nach Tabelle 2 - Einzelne Gesteine

Spezifische Entzugsleistung Sandstein $Q_{EWS} = 55 - 65$ W/m, für $\beta_a = 3.5$ ergeben sich 11 - 13 m pro 1 kW Heizleistung

Erdwärmesondenlänge $L_{EWS} = 132 - 156$ m

Es müssen 2 Sonden zu je 66 - 78 m installiert werden.

Fall 3: Nomogramm (Abb. 9)

Der Jahresheizenergiebedarf beträgt $Q_{Ha} = Q_H \cdot t_a$ $Q_{Ha} = 18$ MWh/a

die Zusatzenergie $Q_{pa} = Q_p \cdot t_a$ mit $Q_p = 0.4$ kW $Q_{pa} = 0.6$ MWh/a

Heizleistung und Heizenergie liegen knapp außerhalb des zulässigen Bereichs des Nomogramms. Deshalb erfolgt die Auslegung für eine „halbe“ Anlage (6 kW Heizleistung, 9000 kWh Heizenergie mit $a = 3,96$). Es müssen 2 Sonden zu je 65 m installiert werden.

Fall 4: Auslegung mit EED (Earth Energy Designer)

Für die Auslegung mit dem Programm EED muß man über die zu Beginn des Kapitels aufgeführten Randbedingungen hinaus weitere Annahmen treffen. Das Programm berücksichtigt neben der zeitlichen Lastverteilung (Grund- und Spitzenlast) auch die minimal zulässigen Temperaturen des Wärmeträgermediums. Entsprechend den Vorgaben der VDI 4640 wurde eine mittlere Temperatur nicht unter + 1 °C im Dauerbetrieb und - 5 °C bei Spitzenlast eingesetzt. Weiterhin werden in EED genauere Angaben zum Bohrlochdurchmesser (115 mm) und -abstand (6 m), sowie zum verwendeten Rohr und Verfüllmaterial berücksichtigt. Bei Verwendung der Lösungsoption „Required Borehole Length“ ergibt sich mit EED eine Erdwärmesondenlänge von 2×88 m = 176 m.

Auf Grund des ausführlicheren Berechnungsverfahrens ist das Ergebnis mit EED am genauesten. Die Resultate aller Beispielsrechnungen sind in Tabelle 3 nochmals zusammengefaßt.

Bei Verwendung der vereinfachten Verfahren ergeben sich Abweichungen von dem mit EED erzielten Ergebnis bis etwa 25 %. Unterschiede durch Veränderungen der Sondenkonstruktion wie z.B. Bohrlochdurchmesser, Rohrabstand und Verfüllmaterial in einem sinnvollen Bereich liegen unter 10 % und damit wesentlich niedriger als die Schwankungsbreite der einzelnen Berechnungsverfahren.

Es ist damit anzuraten, auch bereits bei kleineren Anlagen genauere Auslegungsverfahren einzusetzen. Bei größeren Systemen sind diese unabdingbare Voraussetzung. Eventuell ist

sogar auf eine detaillierte Systemsimulation zurückzugreifen, da sich hier einzelne Komponenten gegenseitig beeinflussen.

Tab. 3: Zusammenfassung der Ergebnisse des Auslegungsbeispiels für Erdwärmesonden

Methode	spez. Entzugsleistung	Erdwärmesonden		
		Anzahl	Einzel-länge	Gesamt-Länge
Fall 1: Tabelle 2 Allgemeine Richtwerte	50 W/m	2	84 m	168 m
Fall 2: Tabelle 2 Einzelne Gesteine	55-65 W/m	2	66-78 m	132-156 m
Fall 3: Nomogramm		2	65 m	130 m
Fall 4: Berechnung mit EED		2	88 m	176 m

Abschließend soll für obiges Beispiel noch die Auslegung eines Erdwärmekollektors gezeigt werden. Bei dem Sandsteinuntergrund kann nur ein leicht bindiger Boden angenommen werden. Aus VDI 4640 ergibt sich für feuchten, sandigen Boden eine spezifische Entzugsleistung von 15 - 20 W/m² und damit für $\beta_a = 3.5$ ein Erdwärmekollektorfläche von 36 - 48 m²/kW_{th}. Für 12 kW Heizleistung sind somit 432 - 576 m² Erdwärmekollektor erforderlich.

Zusammenfassung

Die Auslegung der Wärmequellenanlage hat einen erheblichen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit erdgekoppelter Wärmepumpen zur Gebäudeheizung. Falsch ausgelegte Anlagen sind nicht nur unwirtschaftlich durch hohe Betriebskosten, sondern können auch zu erheblichen Schäden an Bauwerken und unserer Umwelt führen.

Die Diskussion über Erdwärmesondenauslegung wurde in der Vergangenheit stark durch unterschiedliche Annahmen zu möglichen Entzugsleistungen geprägt. Häufig genannte Werte waren 55 W/m (Schweizer Mittelland) bis hin zu Spitzenwerten über 100 W/m. Diese Werte sind stark von der geologischen Situation der jeweiligen Region abhängig, und bei der Übertragung auf andere Klima- und Untergrundbedingungen haben sie nicht mehr unbedingt Gültigkeit. Mit der Verbreitung der Anlagen in unterschiedliche Regionen zeigt sich auch im RWE-Bereich, wo gerade am Niederrhein sehr hohe spezifische Entzugsleistungen erreicht wurden, eine Angleichung der durchschnittlichen Entzugsleistung auf Werte knapp unter 70 W/m (Abb. 10). Im Hinblick auf die notwendige Langzeitleistung der Erdwärmesonde sind Vorschlag nach VDI 4640 und gemessene Anlagenleistung nicht weit auseinander.

Die im Entwurf vorliegende Richtlinie VDI 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes - gibt einige Verfahren zur Auslegung folgender Wärmequellenanlagen an:

- Grundwasserbrunnen
- Erdwärmekollektoren
- Erdwärmesonden.

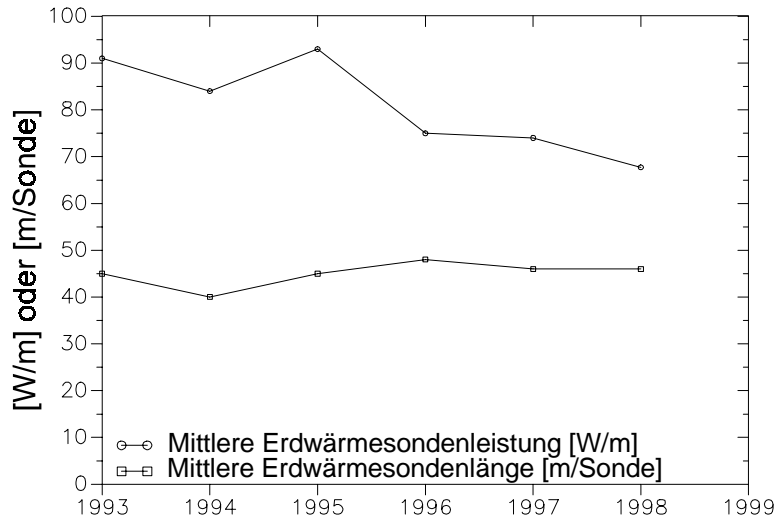


Abb. 10: Spezifische Erdwärmesondenleistung und mittlere Erdwärmesondenlänge von im Rahmen des Förderprogramms KeS SOLAR der RWE errichteten Anlagen (Quelle: RWE; aus SANNER, 2000)

Dabei ist die Dimensionierung von Grundwasserbrunnen relativ unkritisch. Der Brunnen muß die erforderliche Wassermenge von etwa $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ je 1 kW Heizleistung liefern. Hier ist vor allem auf hydrochemische Parameter und korrekte bauliche Ausführung zu achten, um einen ordnungsgemäßen Betrieb zu gewährleisten.

Bei Erdwärmekollektoren gibt es einfache Auslegungsverfahren wie Nomogramme und Tabellen, die allerdings eine gewisse Erfahrung bei der Beurteilung des Standortes bezüglich Lage und Untergrund erfordern. Simulations- oder Auslegungsprogramme, die eine genauere Berechnung zulassen, sind kaum im Einsatz.

Für die Auslegung von Erdwärmesonden existieren empirische Gleichungen, Tabellen und Nomogramme, mit deren Hilfe Kleinanlagen unter 20 kW Heizleistung dimensioniert werden können. Allerdings ist bei der Anwendung große Vorsicht geboten, da wie an einem Fallbeispiel aufgezeigt wurde, erhebliche Abweichungen von bis zu $\sim 25\%$ auftreten können. Es ist deshalb zu empfehlen, auch für kleinere Systeme eine genauere Auslegung mit entsprechenden Computerprogrammen durchzuführen, da sie zuverlässigere Ergebnisse liefern. Für große Anlagen ist ihre Anwendung unbedingt erforderlich. Hier ist gegebenenfalls eine detaillierte Computersimulation vorzusehen.

In allen Fällen ist eine möglichst gute Kenntnis des Untergrundes und seiner thermischen Eigenschaften eine wichtige Voraussetzung für richtig ausgelegte Anlagen. Nur solche Systeme sind über lange Zeiträume funktionstüchtig und in ihrer Anschaffung und im Betrieb wirtschaftlich und umweltfreundlich.

Literatur

Claesson, J. & Eskilson, P.: Conductive Heat Extraction to a Deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules. - Energy 13/6, S. 509-527, Oxford 1988

- Eklöf, C. & Gehlin, S. (1996): TED - a mobile equipment for thermal response test. - 62 S., Master's thesis 1996:198E, Luleå University of Technology
- Eskilson, P.: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. - 264 S., Dissertation Lund-MPh-87/13, University of Lund, Lund 1987
- Eskilson, P. & Claesson, J.: Simulation Model for Thermally Interacting Heat Extraction Boreholes. - Numerical Heat Transfer, 13, S. 149-165, 1988
- Eugster, W., Seifert, P.K., Hopkirk, R.J. & Rybach, L. (1992): Einfluß von Klima und Standort auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden-Heizanlagen. - Tagungsband 2. Geothermische Fachtagung Erding 1992, Forum für Zukunftsenergien/GtV, S. 335-344, Bonn/Neubrandenburg
- Eugster, W.J. (1998): Langzeitverhalten der Erdwärmesonden-Anlage in Elgg/ZH. - 38 S., Schlussbericht PSEL-Projekt 102, Polydynamics, Zürich
- Gehlin, S. & Nordell, B. (1997): Thermal Response Test - a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole. - Proc. 7th International Conference on Thermal Energy Storage Megastock '97, Vol. 1, S. 103-108, Sapporo
- Hellström, G.: PC-Modelle zur Erdsondenauslegung. - IZW Bericht 3/91, S. 229-238, FIZ, Karlsruhe 1991
- Hellström, G. & Sanner, B. (1994): PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. - Ber. Symp. Erdgek. Wärmepumpen 1994, Ber. IZW 1/94, S. 341-350, Karlsruhe
- Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948): Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. - Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, S. 119-122, Chicago
- Leu, W., Keller, B., Mègel, T., Schärli, U. & Rybach, L. (1999): PC-Programm für die Berechnung geothermischer Eigenschaftren der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0-500 m). - 32 S. + CD-ROM, Schlussbericht BfE-UAW, ETH Zürich
- Sanner, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. - 328 S., Ber. IZW 2/92, Karlsruhe
- Sanner, B.; Reuß, M. & Mands, E. (1999): Thermal Response Test - eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. - Geothermische Energie 24/25, S. 29-33, Geeste
- Sanner, B. (2000): Erdgekoppelte Wärmepumpen und thermische Nutzung des Erdreichs. - HLH 51/2, S. 56-60, Springer-VDI Verlag, Düsseldorf
- Seiwald, H. & Hahne, E. (1998): Das solar unterstützte Nahwärmeversorgungssystem mit Erdwärmesonden-Speicher in Neckarsulm. - Proc. 11. Int. Sonnenforum Köln, DGS, S. 560-567, München
- Shonder, J.A., Baxter, V., Thornton, J., & Hughes, P.J. (1999): A new comparison of vertical ground heat exchanger design methods for residential applications. - ASHRAE 1999 Annual meeting, Seattle WA, SE-99-20-01, Atlanta
- SIA (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme. - SIA-Dokumentation D 0136, Hrsg.: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich
- Stadler, T.; Hopkirk, R.J. & Hess, K (1995): Auswirkungen von Klima, Bodentyp, Standorthöhe auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden in der Schweiz. - Schlußbericht ET-FOER(93)033, BEW, Bern
- VDI (1998): Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpen. - VDI 4640, Richtlinie Blatt 2, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf; Beuth Verlag, Berlin