

Stand der technischen Entwicklung oberflächennaher Geothermie in Deutschland

Rund 40 Jahre nach den ersten technischen Anwendungen oberflächennaher Geothermie in Deutschland, mit Grundwasser-Wärmepumpen und Erdwärmekollektoren, hat sich diese Form der Nutzung Erneuerbarer Energien fest auf dem Markt etabliert. Der Beitrag gibt eine Bestandsaufnahme der aktuellen technischen Entwicklung, ausgehend von Verfahren der Standortuntersuchung und Anlagenplanung über die Ausführung von Erdwärmesonden- und Brunnenanlagen bis zu Beispielen innovativer Gesamtkonzepte für größere Anlagen. Dabei wird auch diskutiert, wie kleinere Anlagen in größerer Zahl sachgerecht geplant werden können und in welchen Bereichen noch Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten oder Grundlagenuntersuchungen erforderlich sind.

Erdgekoppelte Wärmepumpen haben in den beiden vergangenen Jahren Verkaufszahlen von jeweils weit über 25.000 Einheiten erzielt (Abb. 1). Dies war nur möglich durch mehrere Faktoren:

- veränderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen auf dem Energiesektor mit stetig steigenden Preisen für fossile Brennstoffe,
- verstärktes Umweltbewusstsein, verbunden mit Fördermaßnahmen für emissionsmindernde Technik,
- ständige Weiterentwicklung und Optimierung der eingesetzten Technik, sowohl auf der Erdseite wie auch bei den Wärmepumpen und im Gebäude.

Den größten Anteil bei der Erdankopplung haben Erdwärmesonden. Grundwassernutzung über Brunnen ist eher für größere Anlagen bei günstigen hydrogeologischen Bedingungen geeignet. Erdwärmekollektoren, schraubenförmige Wärmeübertrager (z. B. „Energiekörbe“) o. Ä. finden bei kleineren Vorhaben und ausreichender Fläche Anwendung, während die Nutzung von Energiepfählen grundsätzlich auf Gebäude beschränkt ist, die zwingend eine Pfahlgründung benötigen. Im Nachfolgenden wird versucht, vorwiegend für Erdwärmesonden die wesentlichen technischen Aspekte von der Standortuntersuchung bis zu Planung und Anlagenbau zu beschreiben.

Marktentwicklung in Deutschland

Technische Weiterentwicklung ist nur sinnvoll und möglich, wenn der Markt die Produkte nachfragt – und Marktentwicklung ist nur nachhaltig, wenn die Produkte ständig technisch weiterentwickelt werden. In der oberflächennahen Geothermie war die technische Entwicklung lange Zeit der Marktentwicklung voraus und verbesserte Produkte konnten nur in geringen Stückzahlen abgesetzt werden. In den letzten beiden Jahren jedoch wuchs der Markt rapide (Abb. 1) und die Infrastruktur an Planern, Bohrunternehmen, Installateuren usw. konnte kaum mithalten.

Der starke Wachstumstrend bei erdgekoppelten Wärmepumpen ist umso

beachtenswerter, als die Bautätigkeit insgesamt rückläufig ist (Abb. 2). Insgesamt erhöht sich der Anteil erdgekoppelter Wärmepumpen am gesamten Neubauvolumen deutlich. Nimmt man mit vorsichtiger Schätzung an, dass rund 80 % der erdgekoppelten Wärmepumpen im Neubau von 1-2-Familienhäusern zum Einsatz kommen (der Rest in größeren Wohngebäuden, in Nichtwohngebäuden, sowie im Bestand), so wurde im Jahr 2007 fast jedes fünfte neue 1-2-Familienhaus mit einer erdgekoppelten Wärmepumpe ausgestattet (Abb. 3)!

Bezogen auf den gesamten Bestand an 1-2-Familienhäusern ist der Anteil erdgekoppelter Wärmepumpen noch

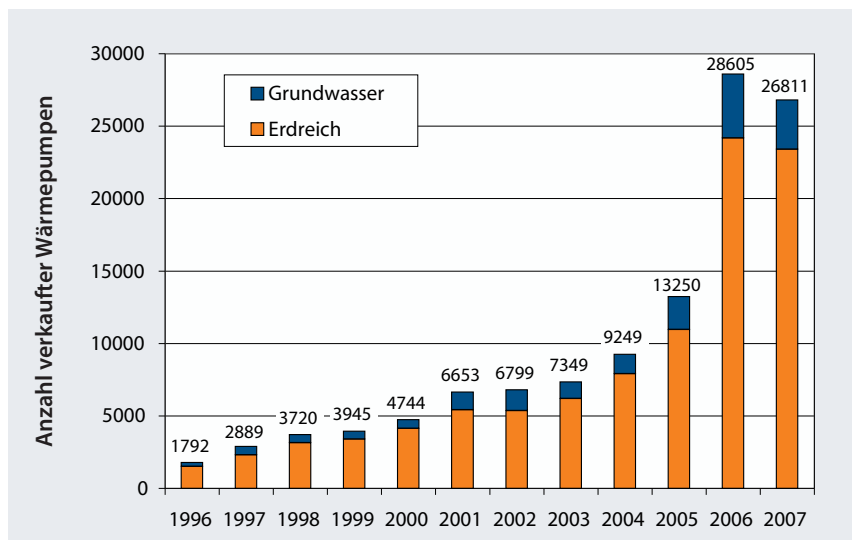


Abb. 1 Verkaufszahlen von erdgekoppelten Wärmepumpen (nach Daten des BWP)

sehr gering. Zum Ende des Jahres 2007 standen in Deutschland nach Angaben des Statistischen Bundesamtes rund 17,9 Mio. Wohngebäude, davon etwa 14,8 Mio. 1-2-Familienhäuser. Der Bestand an erdgekoppelten Wärmepumpen ist nach Schätzungen und Hochrechnung zum gleichen Zeitpunkt auf ca. 120.000 angestiegen (Abb. 4). Danach beträgt, wiederum bei Annahme von einer 80-prozentigen Nutzung für den Wohnhausbereich für 1-2-Familien, der Anteil erdgekoppelter Wärmepumpen nur 0,65 % (Abb. 5). Da das jährliche Neubauvolumen z. Zt. nur gut 1 % des Bestands beträgt (Abb. 2), wird es noch viele Jahre dauern, bis ein signifikanter Anteil der Gebäude mit Erdwärme beheizt wird. Auf der Seite des Nachfragepotenzials wird es also auf lange Zeit keine Grenzen für ein weiteres Marktwachstum geben!

Standortuntersuchung und Anlagenplanung

Der Standort mit vorgegebenen Platzverhältnissen und natürlichen Untergrundbedingungen setzt den entscheidenden Rahmen für die Planung der Erdanbindung. Dies war von Anfang an bei der Planung von Grundwasser-Wärmepumpen offensichtlich, wo eine ausreichende Ergiebigkeit der Förderbrunnen bzw. Aufnahmefähigkeit der Schluckbrunnen sehr stark von der Ausbildung grundwasserführender Gesteine im Untergrund abhängt. Die Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen tritt zügig ein, sodass eine unzureichende Ergiebigkeit schnell erkennbar ist und entsprechend vorsichtig geplant wurde (und wird).

Bei Erdwärmesonden kann eine Unterdimensionierung häufig nicht sofort erkannt werden, da die Sonden zwar für einen kurzfristigen Betrieb zu Beginn der Heizperiode ausreichend, der Nachtransport von Wärme aus dem umgebenden Gestein jedoch längerfristig unzureichend sein kann. Anders als noch vor zwanzig Jahren hat sich inzwischen allgemein die Erkenntnis durchgesetzt, dass das Wärmetransportvermögen des Untergrundes stark variieren kann und einen wesentlichen Einfluss auf die Anlagenauslegung hat. In den 1980er-Jahren wurden Geologen

noch belächelt, wenn sie die Anwendung lokal erkannter empirischer Auslegungskriterien wie z.B. „55 W/m“ (für das Schweizer Mittelland) auf andere geologische Verhältnisse bezweifelten, und in einer Ausschreibung für eine Anlage in der Pfalz konnte man finden: „Es sind Erdsonden mit 120 W/m Entzugsleistung einzubauen“ (keine sonstigen Angaben zum Untergrund).

Heute ist es bei größeren Anlagen selbstverständlich, dass die Geologie am Standort Beachtung findet. Die Einführung des in Schweden entwickelten mobilen Thermal Response Test in Deutschland im Jahr 1999 hat dazu auch die nötige Methode bereitgestellt [1]. Ähnlich wie mit einem Pumpversuch, mit dem für Grundwasser-Wärmepumpen die Durchlässigkeitsbeiwerte des Aquifers bestimmt werden, kann mit dem Thermal Response Test die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins festgestellt werden. Die Entwicklung hat inzwischen zu kompakten Geräten geführt, die schnell an den Einsatzort gebracht und auch bei schwierigen Geländebedingungen eingesetzt werden können (Abb. 6). Bei der Auswertung stehen mittlerweile mehrere Methoden bereit (vor allem die stufenweise Auswertung), mit denen auch die Aussagefähigkeit des Tests und eine ausreichende Testdauer überprüft werden können. Temperatur-Logs vor und nach den Tests geben weiteren Aufschluss über möglichen Grundwassereinfluss und mit der Tiefe wechselndes Wärmetransportvermögen. Die wirtschaftlichen Vorteile genauer Eingabedaten aus dem Thermal Response Tests sind für die Planung größerer Anlagen bekannt [2], der Einsatz des Tests erfolgt daher routinemäßig.

Bei der Planung von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen müssen Fachleute aus sehr unterschiedlichen Disziplinen zusammenarbeiten, die ansonsten wenig miteinander zu tun haben. Hier tun sich auch ausgewiesene Experten der Geologie, Hydrogeologie und des technischen Gebäudeausbaus schwer, wenn sie zum ersten Mal eine größere Anlage planen sollen. Nicht nur die unterschiedlichen Fach-



INTERAC

zuverlässig leistungsstark

Wir sind die Spezialisten für:

- Geothermiebohrungen
- Brunnenbau
- Ankerbohrungen
- Schrägbohrungen

Wir liefern:

- Kraftdrehköpfe
- Doppelkopfsysteme
- Bohrhämmer
- Magazine für 100 m Bohrgestänge

Wir erarbeiten kundenorientierte Lösungen und fertigen dazu die notwendigen Spezialmaschinen und Systemkomponenten für Kunden weltweit.

INTERAC

deilmann-haniel mining systems

(Member of DEILMANN-HANIEL INTERNATIONAL)

44317 Dortmund/Germany

Fon: +49 (0) 231/28 91 -289

Fax: +49 (0) 231/28 91 -314

interoc@dh-ms.com | www.dh-ms.com

sprachen sorgen für Verwirrung; es ist vor allem wichtig, dass sich die jeweiligen Experten in das Fachgebiet der anderen zumindest soweit hinein-denken, dass sie die Anforderungen an ihre eigene Teilaufgabe im Planungsprozess verstehen können.

Es ist z. B. für einen Hydrogeologen oder Tiefbautechniker nicht damit getan, dass er eines der mittlerweile vorhandenen Auslegungsprogramme für Erdwärmesonden bedienen kann; er muss darüber hinaus eben nicht nur die Eingabeparameter aus dem eigenen Fachgebiet kennen und verstehen (Untergrundeigenschaften usw.), sondern auch die Angaben der Gebäudetechniker interpretieren und umsetzen können. Oft käme es ohne Hinterfragen von Angaben und Vorlegen alternativer Konzepte nicht zu einer zufriedenstellenden Anlage. Für Erdwärmesondenanlagen sind die Änderungsoptionen durch Faktoren wie Tiefe, Anzahl, Anordnung etc. und die möglichen Zusammenhänge mit der Gebäudetechnik (z. B. Verteilung von Heiz- und Kühllasten) in bbr 04/2008 beschrieben [3].

Während bei größeren Anlagen in der Regel ein spezialisiertes Planungsbüro eingeschaltet wird, ist es im Wohnhausbereich üblich, dass das Bohrunternehmen oder der Wärmepumpeninstallateur die Auslegung von Erdwärmekollektor, Erdwärmesonde usw. erledigen muss. Dass dies nicht immer nach der Faustformel „50 Watt pro Meter“ geschehen darf, wird im letzten Abschnitt beleuchtet. Gerade für diesen Sektor wird die für das kommende Jahr zu erwartende revidierte Fassung von VDI 4640 Blatt 2 mit neu formulierten Auslegungsregeln für kleinere Anlagen dringend benötigt.

Im Idealfall wird der Planungsprozess in einem sehr frühen Projektstadium beginnen, mit einer Vorstudie zu den grundsätzlichen Möglichkeiten der Erdwärmenutzung am gewünschten Standort. Diese Möglichkeiten können dann im Rahmen der Planung des technischen Gebäudeausbaus auf Einsatzfähigkeit und Sinnhaftigkeit hin geprüft werden. So kann schon früh eine begründete Entscheidung für oder ge-

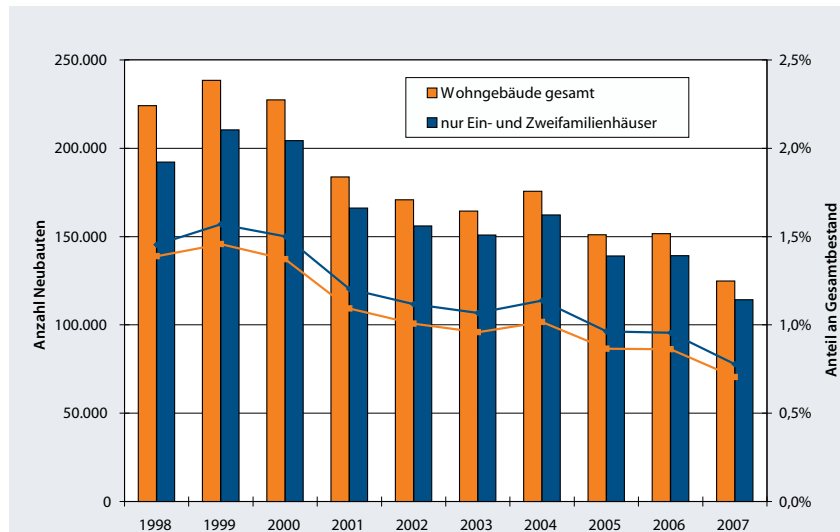


Abb. 2 Neubautätigkeit bei Wohngebäuden (berechnet aus Bestands- und Abgangsdaten des Statistischen Bundesamtes)

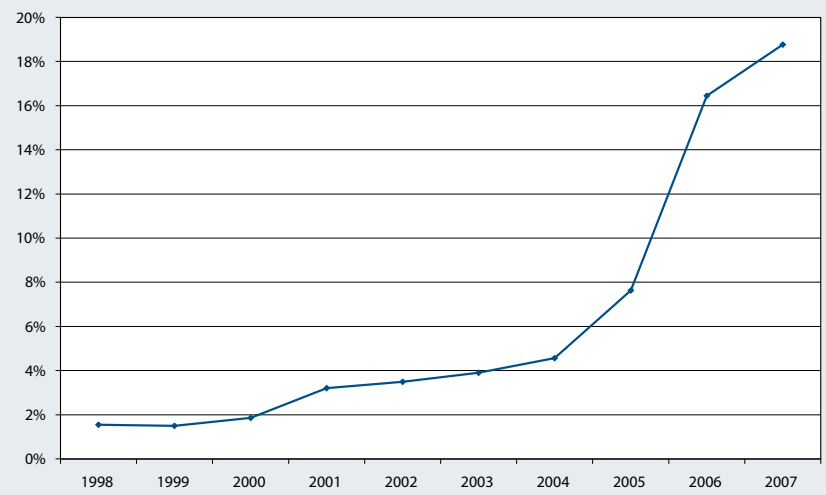


Abb. 3 Anteil erdgekoppelter Wärmepumpen in „1-2“-Familienhäusern (bezogen auf Neubau, Datenquellen s. Abb. 1 und 2)

gen die Erdwärmenutzung bzw. für eine bestimmte Ausführungsart erfolgen. In weiteren Schritten können dann die genauen Untergrundparameter ermittelt und eine technische Lösung zum optimalen Zusammenspiel von Untergrund und Gebäudetechnik entwickelt und geplant werden.

Technische Ausführung und Anlagenerstellung

Die Bohrarbeiten sind natürlich nach wie vor ein wesentlicher Aspekt der Erstellung einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage. Die Weiterentwicklung der konventionellen Bohrtechnik mit Spülbohrung bzw. Im-

lochhammer hat zu Geräten geführt, mit denen bei allen denkbaren Untergrundbedingungen sicher gearbeitet werden kann (Abb. 7). Doppelter Kraftdrehkopf und drei voneinander unabhängige hydraulische Klemmen erlauben das Bohren mit temporärer Hilfsverrohrung in nicht standfesten Schichten, und mit dem Imlochhammer werden schnelle Fortschritte in harten Gesteinen erzielt. Inwieweit Entwicklungen, die vor einer Reihe von Jahren nicht weiter verfolgt wurden (z. B. Bohren mit Wasserstrahl), sich nun unter den veränderten wirtschaftlichen und technischen Bedingungen durchsetzen können, bleibt

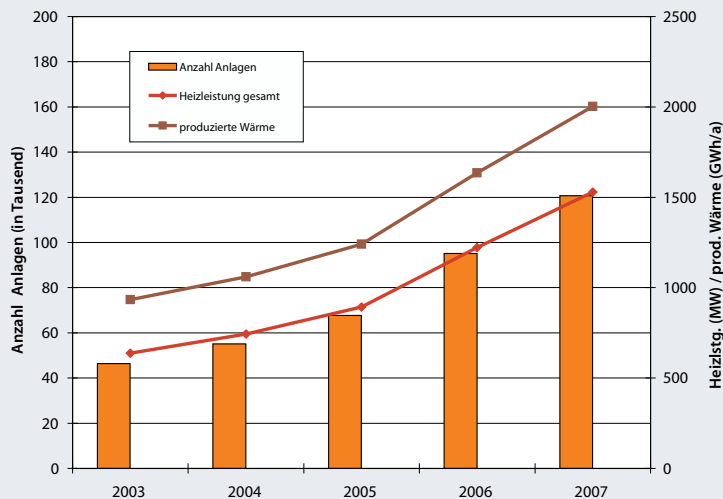


Abb. 4 Gesamtbestand erdgekoppelter Wärmepumpen in Deutschland, hochgerechnet aus geschätztem Grundbestand 2003 und jährlichen Verkaufszahlen (Daten des BWP)

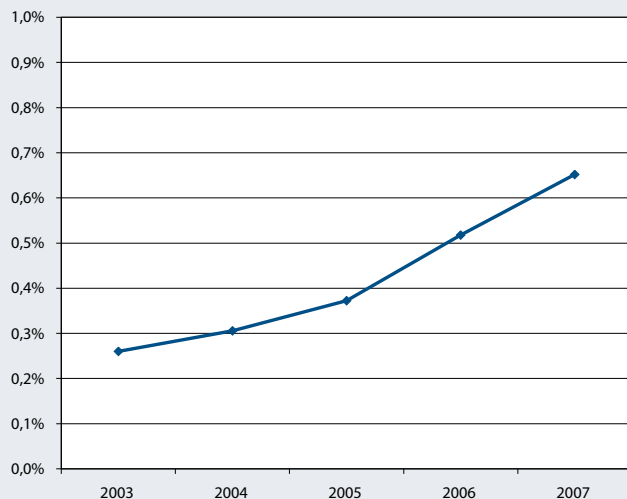


Abb. 5 Anteil erdgekoppelter Wärmepumpen in 1-2-Familienhäusern (bezogen auf Gesamtbestand, Datenquellen s. Abb. 2 und 4)

abzuwarten. Gleiches gilt für den Einsatz von Horizontalbohrmaschinen für sehr flach geneigte, schräge Erdwärmesonden.

Entwicklungsziele für Bohrtechnik in der oberflächennahen Geothermie müssen vor allem sein:

- sicheres und zuverlässiges Bohren auch unter schwierigen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen,
- sauberes und geräuscharmes Arbeiten, da häufig in bewohnten Gebieten gebohrt wird und
- einfaches Handling mit wenig Personal.

Ein schneller Bohrfortschritt ist nicht allein entscheidend, da neben dem Bohren auch der Brunnenbau bzw. das Einbringen und Verfüllen der Sonde erfolgen muss. Auch für diese Arbeiten muss ein modernes Bohrgerät bzw. ein Gerätezug die notwendigen Einrichtungen mitbringen.

Auch auf dem Gebiet der Erdwärmekollektoren (einschließlich „Energiekörbe“) und Erdwärmesonden wurden in den letzten Jahren immer wieder neue Entwicklungen präsentiert. Dabei werden häufig extrem hohe Werte für eine „Entzugsleistung“ angegeben, in W/m^2 bei Erdwärmekollektoren bzw.

W/m bei Erdwärmesonden oder „Energiekörben“. Oft werden dabei die physikalischen Randbedingungen für den Wärmetransport im Untergrund nicht ausreichend betrachtet. Grundsätzlich gilt, dass sich das Verhalten eines solchen geschlossenen Wärmeübertragungssystems im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammensetzt:

- Wärmetransport im umgebenden, ungestörten Untergrund
- Wärmeübergang vom ungestörten Untergrund in das Wärmeträgermedium

Nur den letztgenannten Teil kann man durch Materialauswahl und technische Ausführung beeinflussen. Durch eine Verbesserung des Wärmeübergangs vom Gestein in das Wärmeträgermedium kann die kurzfristige Entzugsleistung bei gleichbleibender Temperatur deutlich erhöht werden. Längerfristig muss die Wärme jedoch durch das ungestörte Gestein wieder zugeführt werden, sodass dessen (nicht beeinflussbaren) thermischen Eigenschaften entscheidend sind. Hier haben die Erfahrungen mit dem Einfrieren von zu klein dimensionierten „Energiekörben“, Erdwärmekollektoren aus Kapillarmatten usw. ihre Ursache.

Bei kompakten, oberflächennahen Erdreichwärmeübertragern spielen ne- ▶

ERDWÄRMESONDEN

- Sonden DN 32 (PE 100 SDR 11 PN 16) mit 2 Kreisläufen und 4 Sonderrohren fertig verschweißt
- Das Verschweißen der Muffen mit Rohren und Sondenkopf wird werkseitig druckgeprüft und protokolliert
- Zusätzlich werden die Sonden fremdüberwacht und geprüft



| |
|-------------------------------|
| 50 m / Euro 242,- |
| 60 m / Euro 265,- |
| 70 m / Euro 288,- |
| 80 m / Euro 311,- |
| 90 m / Euro 334,- |
| 100 m / Euro 357,- |
| 110 m / Euro 380,- |
| 120 m / Euro 403,- |
| 130 m / Euro 426,- |
| 140 m / Euro 449,- |
| Y-Stück 32/32/40 Euro 11,- |
| Y-Stück 40/40/50 Euro 13,- |



Alle Preise ab Werk, zzgl. MwSt.

Tel.: 07024/929242
Fax: 07024/929244
Neuffenstraße 78
D 73240 Wendlingen

COLSHORN
Brunnenbaubehör und Gußzeugnisse



Abb. 6 Modernes Gerät für Geothermal Response Test, im Einsatz unter erschwerten Geländebedingungen

ben dem Wärmetransport auch Wärmespeichervorgänge und die Phasenumwandlung (Wasser/Eis) eine große Rolle. Gerade die bei Gefrieren des Porenwassers frei werdende Wärme kann als Wärmequelle der Wärmepumpe genutzt werden. Die gleiche Wärmemenge wird aber auch benötigt, um das gebildete Eis später wieder aufzutauen. Bei horizontalen Erdwärmekollektoren mit ausreichender Fläche geschieht dies durch den natürlichen Wärmeeintrag aus Sonneneinstrahlung, Sickerwasser usw. und durch einen minimalen Anteil aus dem geothermischen Wärmestrom (auf jedem Quadratmeter bringt ein typischer geothermischer Wärmestrom von $0,07 \text{ W/m}^2$ in einem halben Jahr eine Wärmemenge von $0,3 \text{ kWh}$).

Bei zu kleiner Auslegung oder kompakten bzw. mehrlagigen Kollektoren kann die benötigte Wärme auf natürlichem Wege im Jahresmittel nicht mehr nachgeführt werden, es entsteht eine stetige Abkühlung im Verlauf der Jahre. Solche Anlagen lassen sich nachhaltig nur betreiben, wenn entweder die genutzte Fläche der von einfachen Horizontalkollektoren angenähert wird, oder wenn durch Wärmeeintrag (sommerliche Kühlung, Solarenergie) die Wärmebilanz künstlich wieder ausgeglichen wird.

Im Fall von Erdwärmesonden können die beiden Faktoren (Wärmetransport außerhalb und innerhalb der Bohrung) gut unterschieden und damit getrennt betrachtet werden. Für die Beschrei-

bung des Wärmeübergangs vom Gestein ins Wärmeträgermedium hat sich der Parameter „Thermischer Bohrlochwiderstand“ eingebürgert, mit r_b gekennzeichnet und in $\text{K}/(\text{W} \cdot \text{m})$ angegeben (Borehole Thermal Resistance, s. [4]). Im günstigsten (theoretischen) Fall kann der thermische Bohrlochwiderstand $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$ werden, d. h., die Wärme würde ohne Temperaturverlust vom Gestein zum Wärmeträgermedium fließen. Ein solch geringer Wert ist natürlich in der Praxis nicht zu erreichen, dazu müssten die Wärmetransporteigenschaften aller beteiligten Materialien unendlich hoch sein.

In Tabelle 1 sind verschiedene Auslegungsparameter für den Fall einer Erdwärmesonde mit 152 mm Bohrdurchmesser, HDPE-Doppel-U und normalem Dämm angegeben (dies entspricht einem thermischen Bohrlochwiderstand von etwa $0,1 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$) und dem theoretischen Fall mit $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$ gegenübergestellt. Vorgabe war, dass nach 25 Betriebsjahren Temperaturen von $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ im Wärmeträgermedium nicht unterschritten werden; als ungestörte Erdreichtemperatur wurden generell $11 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt. Betrachtet wurden zwei unterschiedliche Gesteine und sowohl der Fall im reinen Heizbetrieb, d. h. ohne künstliche Regeneration („o. Reg.“), als auch der Fall im Betrieb mit vollständiger Regeneration der Wärme im Jahresverlauf („m. Reg.“), sei es durch Grundwasserfluss, Solarwärmeeintrag o. Ä. Die Werte für $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$ zeigen also die maximal

| | r_b $\text{K}/(\text{W}\cdot\text{m})$ | notwendige Sondenlänge m | Entzugsleistung W/m | Entzugsarbeit $\text{MWh}/\text{a}/\text{m}$ |
|---|---|--------------------------------|--|---|
| Wärmeleitfähigkeit Gestein $\eta = 2,0 \text{ W}/\text{m}/\text{K}$ | | | | |
| Doppel-U, o. Reg. | 0,10 | 153,8 | 48,8 | 87,8 |
| Doppel-U, m. Reg. | 0,10 | 141,6 | 53,0 | 95,3 |
| $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$, o. Reg. | 0,00 | 105,7 | 70,9 | 127,7 |
| $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$, m. Reg. | 0,00 | 94,4 | 79,4 | 143,0 |
| Wärmeleitfähigkeit Gestein $\eta = 3,5 \text{ W}/\text{m}/\text{K}$ | | | | |
| Doppel-U, o. Reg. | 0,10 | 113,1 | 66,3 | 119,4 |
| Doppel-U, m. Reg. | 0,10 | 106,9 | 70,2 | 126,3 |
| $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$, o. Reg. | 0,00 | 64,3 | 116,6 | 210,0 |
| $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$, m. Reg. | 0,00 | 59,5 | 126,1 | 226,9 |

Tabelle 1 Nachhaltige Entzugsleistung für verschiedene Erdwärmesonden bzw. Untergrundeigenschaften; die Werte bei $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m})$ geben die maximal mögliche Entzugsleistung an, die durch einen theoretische Erdwärmesonde ohne Temperaturverluste in Bohrung und Sonde erreicht werden könnte.



Abb. 7 links: Erdwärmesonden-Bohrung in Gneis mit Imloch-Hammer, in einer Baugrube im Schutz einer Bohrpfahlwand; rechts: das gleiche Bohrgerät rund 25 km entfernt, Spülbohrung mit Hilfsverrohrung in tertiären Sedimenten.

mögliche Entzugsleistung an, die bei nachhaltigem Betrieb zu erzielen wäre, egal welche „Wundersonden“ eingebaut werden.

Ähnlich wie bei Wärmepumpen, wo der nur theoretisch erreichbare Carnot-Wirkungsgrad die physikalische Grenze angibt und es bei der Weiterentwicklung nur darum gehen kann, Verluste im System zu minimieren und so dieser Grenze möglichst nahe zu kommen, kann auch der Fall mit $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W}\cdot\text{m})$ als physikalisch maximal erreichbare Grenze angegeben werden. So wie bei kältetechnischen Prozessen eine sog. Carnot-Effizienz berechnet werden kann (wie viel Prozent des Carnot-Wirkungsgrades erreicht die tatsächliche Kältemaschine bzw. Wärmepumpe), lässt sich auch berechnen, wie nahe man der vorgenannten physikalisch erreichbaren Grenze der Entzugsleistung von Erdwärmesonden im Einzelfall kommt. Zu Ehren des großen Analytikers der thermischen Vor-

gänge um Erdwärmesonden, dem Schweden Dr. Göran Hellström, schlagen wir vor, dieses Maß für die Güte einer Erdwärmesonde als „Hellström-Effizienz“ (η_H) zu bezeichnen und folgendermaßen zu berechnen:

$$\eta_H = \frac{\text{tatsächlich mögliche, nachhaltige Entzugsleistung}}{\text{mögliche Entzugsleistung bei } r_b = 0} = 100 \text{ (in \%)}$$

Bei den in **Tabelle 1** betrachteten Fällen mit Doppel-U-Sonde schwankt dieser Wert bei $\eta_H = 56\text{-}69\%$. Dabei spielt nicht nur der Sondenausbau eine Rolle, sondern auch das Wärmetransportvermögen des umgebenden Gesteins. Sollten für bestimmte Bauarten Werte von $\eta_H \geq 100\%$ behauptet werden, könnte man diese sogleich als Unfug entlarven.

Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Entzugsleistung mit sinkendem r_b -

Wert, die Hellström-Effizienz η_H verschiedener typischer Sondenbauarten und die maximal mögliche Entzugsleistung bei $\eta_H = 100\%$ bzw. $r_b = 0 \text{ K}/(\text{W}\cdot\text{m})$. Die Berechnungen wurden für einen durchschnittlichen Untergrund angestellt ($\lambda = 2,5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) und wiederum eine Wärmepumpe mit 10 kW Heizleistung und 1.800 Jahresbetriebsstunden angenommen. Berechnet wurden zwei Varianten:

- 8 weniger tiefe Erdwärmesonden von 10-25 m Tiefe, Bohrdurchmesser 140 mm, ungestörte Erdreichtemperatur 10 °C
- 1 tiefere Erdwärmesonde von 80-200 m Tiefe, Bohrdurchmesser 152 mm, ungestörte Erdreichtemperatur 11 °C

„Mythos“ Entzugsleistung

Im vorigen Abschnitt wurde die „Entzugsleistung“ als Vergleichsgröße benutzt. Die Entzugsleistung als solche ist aber keine fixe Größe, sie kann ►



pro KÜHLSOLE GmbH
Am Langen Graben 37
D-52353 Düren

www.glykol.info

GLYKOSOL N

...die Sole für Erdsonden, Wärmepumpen, Heizungs-, Kälte- und Klimasysteme

Damit Sie flüssig bleiben!



Wie tief Sie auch bohren, GLYKOSOL N geht mit!

Info-Ruf: +49 2421 / 59 196-0

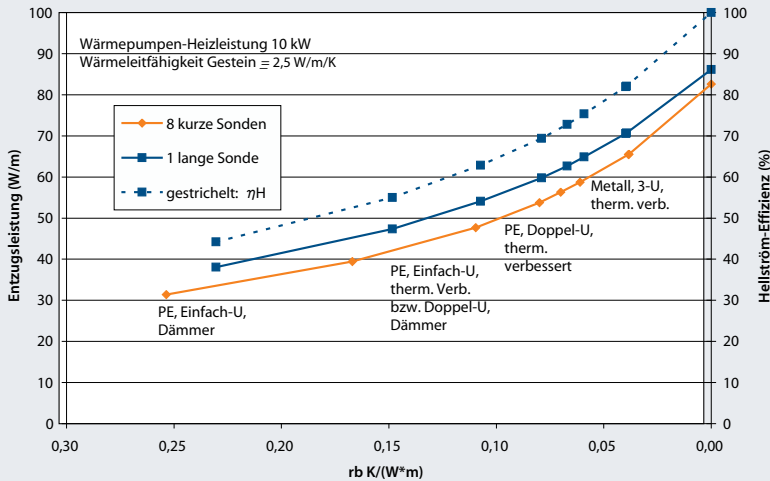


Abb. 8 Theoretisch mögliche, nachhaltige Entzugsleistung für eine Erdwärmesonden-Anlage im Einfamilienhaus, 10 kW Heizleistung bei 1.800 Betriebsstunden im Jahr, berechnet für 8 kurze Sonden (10-20 m) bzw. eine lange Sonde (>100 m), gegen den thermischen Bohrlochwiderstand aufgezeichnet; typische rb -Bereiche für einige Erdwärmesonden-Bauarten sind angegeben.

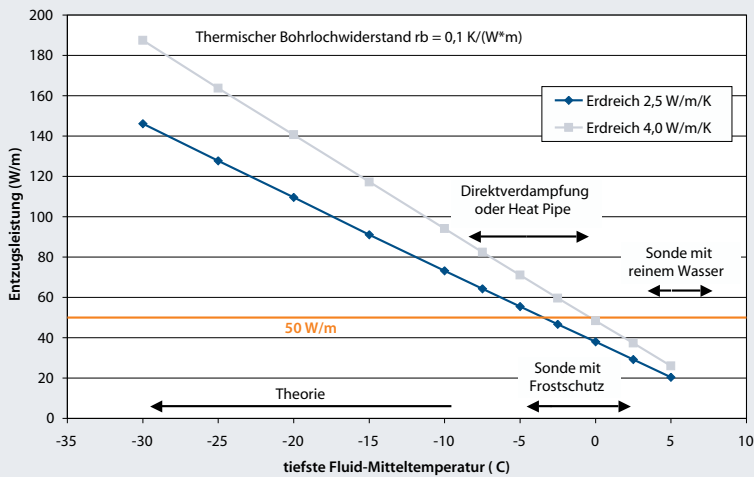


Abb. 9 Theoretisch mögliche Entzugsleistung für eine Erdwärmesonden-Anlage im Einfamilienhaus, 10 kW Heizleistung bei 1.800 Betriebsstunden im Jahr, berechnet für eine Sonde, gegen die tiefste Fluid-Mitteltemperatur aufgezeichnet; die Faustformel 50 W/m und typische Bereiche für Erdwärmesonden-Bauarten sind angegeben.

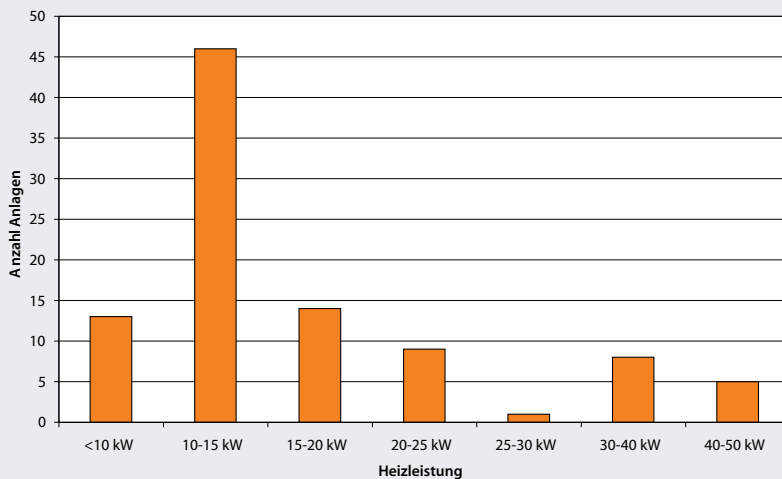


Abb. 10 Größenverteilung der betrachteten Wärmepumpenanlagen (Gesamtzahl 96 Anlagen)

immer nur für genau definierte Randbedingungen angegeben werden [5]. Die wichtigsten sind:

- minimal zulässige Fluidtemperatur in der Sonde (genauer: Temperaturdifferenz zwischen ungestörtem Erdreich und der Fluidtemperatur in der Sonde)
- Betriebsdauer im Jahr bzw. in der Heizperiode

Für die Temperaturen sollten immer die jeweils nach VDI 4640 zulässigen Temperaturgrenzen angesetzt werden; vereinfacht bedeutet dies bei Erdwärmesonden eine durchschnittliche minimale Temperatur in den Erdwärmesonden von 0 °C (Dauerlast/Grundlast), und eine Minimaltemperatur größer -5 °C nach mehreren Stunden maximaler Heizleistung (Spitzenlast, typischerweise 18 h am Ende des kältesten Monats, meist Februar).

In **Abbildung 9** ist dargestellt, wie sich die Entzugsleistung mit sinkender Temperatur in der Erdwärmesonde erhöhen lässt. Dabei wurde ein thermischer Bohrlochwiderstand von 0,1 K/(W * m) und Gesteinswärmeleitfähigkeiten von 2,5 bzw. 4,0 W/m/K angesetzt. Für die klassischen Erdwärmesonden mit Frostschutzmittel, die bei tiefsten Temperaturen von -5 °C betrieben werden, trifft bei der häufig anzutreffenden Untergrund-Wärmeleitfähigkeit von 2,5 W/m/K die Faustformel von 50 W/m recht gut zu und bei einem thermisch hervorragenden Untergrund mit 4 W/m/K sind maximal rund 70 W/m möglich. Soll die Erdwärmesonde nur mit Wasser gefahren werden, so sinken die möglichen Entzugsleistungen auf 20-25 W/m (also würde eine Verdoppelung der Sondenlänge nötig). Entzugsleistungen von 100 W/m und mehr werden erst erreicht, wenn die minimalen Temperaturen schon in den Bereich von -10 °C absinken.

Die durch das Gestein gegebenen physikalischen Grenzen lassen sich also durch neue Sondenbauarten nicht verschieben. Bei noch eingehaltenen zulässigen Temperaturen, typischen Untergrundbedingungen und ohne gleichzeitigen Wärmeeintrag von oben können Erdwärmesonden-Bauarten

wie Schraubensonden, komplexe Koaxialsonden, „Venturisonden“ usw. nachhaltig keine substanziellen Erhöhungen der Entzugsleistung bringen. Bei manchen Direktverdampfungs-Projekten wird die hohe Entzugsleistung durch sehr niedrige Temperaturen in der Sonde erkauft, was letztlich zwangsläufig zu schlechteren Arbeitszahlen führen muss.

So bleibt für den Stand der technischen Ausführung der Erdankopplung in geschlossenen Systemen festzuhalten:

- Bei horizontalen Erdwärmekollektoren sind Reduktionen der Fläche nur möglich, wenn dem Untergrund künstlich Wärme wieder zugeführt wird. Unter solchen Bedingungen können kompakte Erdreich-Wärmetauscher wie z. B. „Energiekörbe“ mit geringeren Flächen auskommen.
- Bei Erdwärmesonden ist die klassische Doppel-U-Sonde oder einfache Koaxialsonde immer noch die wirtschaftlich interessanteste Variante, wenn man einen langfristig sicheren, nachhaltigen Betrieb anstrebt. Viele Verbesserungen im Detail, von Einbringhilfen, Abstandshaltern bis zu thermisch verbessertem Verpressmaterial, haben den thermischen Bohrlochwiderstand herabgesetzt und die Effizienz damit erhöht.
- Extrem hohe Entzugsleistungen sind nicht nachhaltig zu erzielen, egal welche spezielle Sondenbauart auch eingesetzt werden soll. Hohe Entzugsleistung gehen, auch bei Direktverdampfung, immer zu Lasten der Temperatur und damit der Energieeffizienz.
- Neue Sondenbauarten wie z.B. Heat Pipes (Wärmerohr) können dann sinnvoll sein, wenn sie ausreichend ausgelegt sind, eine weitere Effizienzverbesserung bringen, und das von Wasserbehörden oft nicht gerne gesehene Glykol ersetzen.

Standardisierte Berechnung kleinerer Erdwärmesondenanlagen

Bei kleinen Erdwärmesonden-Anlagen im Wohnhausbereich wird leider immer noch eine Auslegung mit einer „universellen“ Entzugsleistung von 50 W/m vorgenommen. VDI 4640, Bl. 2 bietet zwar als ersten Schritt eine An-

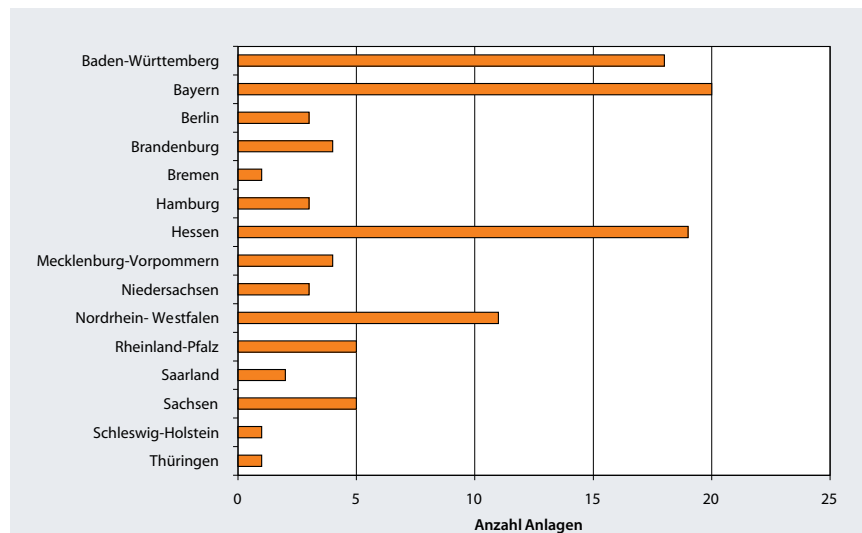


Abb. 11 Verteilung der betrachteten Wärmepumpenanlagen auf die Bundesländer (Gesamtzahl: 96 Anlagen)

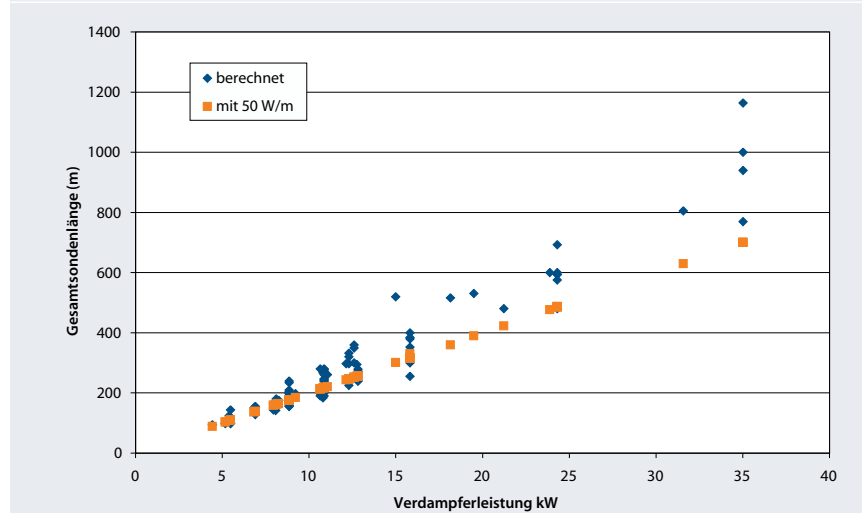


Abb. 12 Vergleich der erforderlichen Gesamtsondenlänge, berechnet nach Standortdaten bzw. angegeben mit 50 W/m (Gesamtzahl 96 Anlagen)

passung der Entzugsleistung in Abhängigkeit von der Gesteinsausbildung an; trotz Auslegungshilfsmitteln wie der CD-ROM Geothermie des Geologischen Dienstes NRW, Geologischer

Karten usw. wird der Einfluss der geologischen Untergrundbedingungen jedoch nach wie vor unterschätzt. Die meisten Anlagen können zwar ohne größere Probleme betrieben wer- ▶



Sole für Erdwärmesysteme

umweltverträglich – leicht biologisch abbaubar

- Basis Ethylenglykol
- Basis Propylenglykol
- und glykolfreie Spezialsole

Lieferform: Konzentrat oder gebrauchsfertiges Gemisch

TYFOROP CHEMIE GmbH / Anton-Ree-Weg 7 / 20537 Hamburg
Tel. 040 20 94 97 - 0 / Fax - 20 / E-Mail: info@tyfo.de / www.tyfo.de

Sondenlänge überdimensioniert

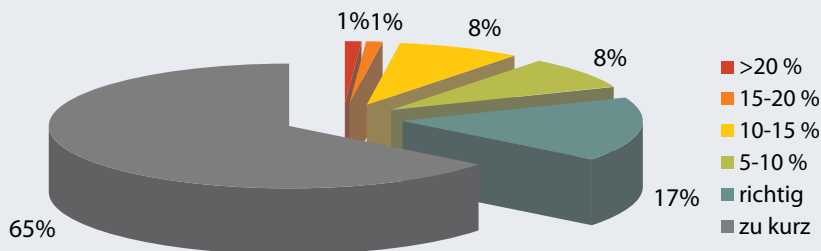


Abb. 13 Anteil der Anlagen, bei denen sich bei Auslegung mit 50 W/m eine Überdimensionierung gegenüber einer dem Untergrund angepassten Auslegung ergibt, mit Angabe der prozentualen Überdimensionierung (Gesamtzahl: 96 Anlagen)

Sondenlänge unterdimensioniert

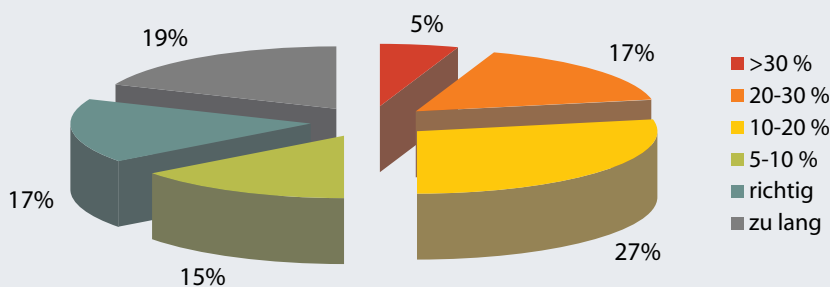


Abb. 14 Anteil der Anlagen, bei denen sich bei Auslegung mit 50 W/m eine Unterdimensionierung gegenüber einer dem Untergrund angepassten Auslegung ergibt, mit Angabe der prozentualen Unterdimensionierung (Gesamtzahl: 96 Anlagen)

Absenkung Jahresarbeitszahl durch Unterdimensionierung

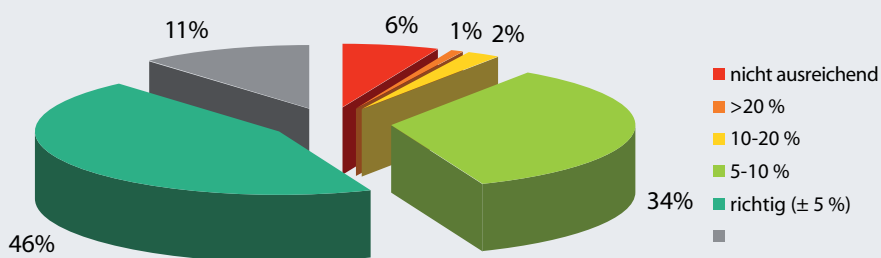


Abb. 15 Abschätzung der Verringerung der Arbeitszahl bei Unterdimensionierung durch Auslegung nach 50 W/m, bei als gleich bleibend angenommener Heizungsvorlauftemperatur (Gesamtzahl: 96 Anlagen)

den und decken den Heizbedarf ab (bei zu kleiner Dimensionierung ist oft auch ein zusätzlicher Elektro-Heizstab eingebaut oder kann nachgerüstet werden), doch benötigen sie bei Unterdimensionierung zu viel Strom bzw. haben bei Überdimensionierung zu hohe Erstellungskosten der Erdwärmesonden.

UBeG GbR hat in Zusammenarbeit mit Buderus, einer Marke der Bosch Thermotechnik, eine Verfahrensweise entwickelt, mit der auch kleinere Anlagen (bis 50 kW Heizleistung) noch mit vertretbarem Aufwand korrekt auf den zu erwartenden Untergrund angepasst werden können. Über standardisierte Datenabfrage der Projekte, Beurteilung der geologischen Bedingungen nach Karten und weiteren Quellen und Berechnung mit EED in einem beschleunigten Verfahren lassen sich die Kosten für die Beurteilung und Berechnung so niedrig halten, dass sie auch bei Anlagengrößen von weniger als 10 kW Heizleistung noch vertretbar sind.

Im Folgenden wird mit einer Auswertung berechneter Anlagen versucht, die Folgen einer nicht auf den Untergrund angepassten Auslegung zu quantifizieren. Dazu wurden von den weit über hundert bereits mit dem standardisierten Verfahren ausgelegten Anlagen diejenigen herausgesucht, bei denen alle Rahmendaten verlässlich vorliegen (bei manchen Anfragen sind jährliche Laufzeiten, geologische Rahmenbedingungen o. Ä. nicht zweifelsfrei bekannt oder die Betriebsweise weicht vom reinen Heizbetrieb im Wohngebäude ab). So verblieben noch 96 Projekte, die als Grundlage für die Auswertung dienen konnten. In Abbildung 10 sind diese 96 Anlagen auf verschiedene Größenklassen (Heizleistung) verteilt; fast die Hälfte fällt in den Bereich von 10-15 kW, der auch allgemein auf dem Wärmepumpenmarkt am stärksten vertreten ist. Die regionale Verteilung ist in Abbildung 11 dargestellt. Zwar dominieren Süddeutschland und Hessen, doch ist außer Sachsen-Anhalt jedes Bundesland vertreten.

In Abbildung 12 ist nun die nach Verdampferleistung der jeweiligen Wär-

mepumpen berechnete Gesamtsondenlänge bei einer spezifischen Entzugsleistung von 50 W/m den Ergebnissen der genaueren Berechnung gegenübergestellt. In den berechneten Fällen übernimmt die Wärmepumpe immer komplett die Heizarbeit, zusätzliche Elektro-Heizstäbe sind nicht vorgesehen. Deutlich ist zu sehen, dass die auf Basis der standortbezogenen Untergrundbedingungen berechneten Sondenlängen stark variieren und häufig über denjenigen nach der Faustformel liegen. Die **Abbildungen 13 + 14** zeigen, welche Größe die Unter- bzw. Überdimensionierung bei den 96 untersuchten Anlagen annehmen würde.


Bei Überdimensionierung ist leicht nachvollziehbar, dass eine um 20 % zu große Anlage auch rund 20 % mehr kostet, als nötig wäre. Bei Unterdimensionierung ist dieser Zusammenhang nicht so einfach herzustellen. Die Kosten entstehen, wenn die Anlage noch funktionsfähig ist, erst im Lauf der Jahre durch höheren Stromverbrauch. Als Maß dafür kann die Jahresarbeitszahl herangezogen werden. Dafür wurde für eine Auslegung mit 50 W/m am jeweiligen Standort der zu erwartende Temperaturverlauf in der Sole berechnet und dann mit den Leistungszahl-Diagrammen der Wärmepumpen ermittelt, um wie viel die Jahresarbeitszahl bei dieser niedrigeren Wärmequellentemperatur absinken würde. Die gebäudeseitigen Temperaturen wurden dabei unverändert angenommen. Da für diese Berechnung einige vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen, sollte das Ergebnis in **Abbildung 15** als Tendenzanzeige gewertet werden. Anlagen mit einer so starken Unterdimensionierung, dass die Soletemperaturen nach einigen Jahren im Monatsmittel unter $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ absinken würde, sind ohne zusätzliche Wärmeerzeuger (Heizstab) nicht mehr vorzustellen („nicht ausreichend“ in **Abb. 15**). Die Tatsache, dass eine Auslegung mit 50 W/m nur bei 46 % der Anlagen zu einer Jahresarbeitszahl im Rahmen von $\pm 5\%$ um den gewünschten Wert führen würde und das 6 % der Anlagen so stark unterdimensioniert wären, dass die Funktionsfähigkeit nicht sichergestellt ist, zeigt die Bedeutung einer auf den jeweiligen Untergrund angepassten Auslegung mehr als deutlich auf.

Literatur

- [1] Sanner, B., Reuß, M. & Mands, E. (1999): *Thermal Response Test - eine Methode zur In-Situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden*. - *Geothermische Energie* 24-25/99, S. 29-33, Geeste
- [2] Sauer, M., Mands, E., Sanner, B. & Grundmann, E. (2007): *Wirtschaftliche Aspekte beim Einsatz von Geothermal-Response-Tests*. - 12 S., CD-ROM Tagungsband des Geothermiekongress 2007 Bochum, paper 124, GtV-BV, Geeste
- [3] Sauer, M., Mands, E. & Sanner, B. (2008): *Wichtige Einflussfaktoren bei der Bemessung größerer Erdwärmesondenanlagen*. - *bbr* 04/2008, S. 72-79, Bonn
- [4] Hellström, G. (1991): *Ground Heat Storage, Thermal Analysis of Duct Storage Systems, I. Theory*. - 262 S., Dept. Mathematical Physics, University of Lund, Lund
- [5] Sanner, B. (1999): *Kann man Erdwärmesonden mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen?* - *Geothermische Energie* 26-27/99, S. 1-4, Geeste

Abbildungen: Sanner, UBeG
außer Abb. 6: Grundmann, UBeG

Autoren:

| | |
|------------------------------|--|
| Dr. Erich Mands | Dipl.-Ing. Wolfgang Gäbler |
| Dipl.-Geol. Marc Sauer | |
| Dipl.-Geol. Edgar Grundmann | |
| Dipl.-Geol. Karsten Langguth | |
| Dr. Burkhard Sanner | |
| UBeG Dr. E. Mands & | Bosch Thermotechnik GmbH |
| M. Sauer GbR | Buderus Deutschland |
| Nauborner Str. 184 | Sophienstr. 30-32 |
| 35580 Wetzlar | 35576 Wetzlar |
| Tel.: 06441 212-910 | Tel.: 06441 418-1332 |
| Fax: 06441 212-911 | Fax: 06441 418-1339 |
| E-Mail: UBeG@UBeG.de | E-Mail: wolfgang.gaebler@buderus.de |
| Internet: www.ubeg.de | Internet: www.buderus.de  |

Erfahrung und Kompetenz in Erdwärme



- Geologische Beratung
- Geothermische Machbarkeitsstudien
- Geothermal-Response-Test
- Temperaturmessungen
- Auslegungsberechnungen und Anlagenplanung
- Geothermische Simulationen (FEM)
- Wasser- und bergrechtliche Beantragungen
- Bauüberwachung
- Monitoring



Geothermal-Response-Testgeräte



UBeG Dr. E. Mands & M. Sauer GbR

Zum Boden 6 - 35580 Wetzlar - Tel.: 06441/2129-10
Email: UBeG@UBeG.de - www: UBeG.de - Fax: 06441/2129-11