

## **EINFLUSS UNSICHERER UND VARIABLER PARAMETER AUF DEN BETRIEB UND DIE DIMENSIONIERUNG VON ERDWÄRMESONDENANLAGEN**

Roland Koenigsdorff

Gebäudeklimatik, Hochschule Biberach  
Karlstraße 11, 88400 Biberach, Germany  
Koenigsdorff@fh-biberach.de

### KURZFASSUNG

Die Planung und Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen erfolgt meist auf der Basis eines bestimmten Satzes von Planungsdaten. Die Auswirkungen von Abweichungen oder Variationen dieser Daten werden bislang kaum untersucht. Anhand analytischer Betrachtungen und erster Simulationsuntersuchungen wird gezeigt, dass typische Unsicherheiten und Variabilitäten der Parameter und Annahmen der Planung zu signifikanten Abweichungen des realen Betriebs vom Planungsszenario führen können. Diesem Punkt sollte künftig verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden, sowohl in der Planung, als auch im Betrieb und bei der Betriebsüberwachung, zumindest für größere geothermischer Anlagen.

### ABSTRACT

Planning and calculation of borehole heat exchangers is mostly based on one particular set of design data. The effect of deviations or variations of this data have up to now generally not been examined. Analytical examinations and first simulations reveal that typical uncertainty and variability of design parameters and assumptions leads to significant deviations of real plant performance from expected values. Therefore, this issue should be more thoroughly addressed in the future. This refers to the design process as well as to operation and operation supervision, at least for large geothermal plants.

### EINLEITUNG

Die Planung und Dimensionierung größerer Erdwärmesondenanlagen zur Heizung und Kühlung von Gebäuden mit Hilfe oberflächennaher Geothermie erfolgt i. d. R. mit Simulationsprogrammen. Neben gekoppelten Simulationen des Gesamtsystems aus Gebäude, Anlagentechnik und Geothermie, z. B. mit Programmen wie TRNSYS, werden sehr häufig spezielle Programme für geothermische Systeme wie Earth Energy Designer (EED) oder Finite-Elemente-Programme eingesetzt. Den letztgenannten Programmtypen ist gemeinsam, dass diesen das geothermische Lastprofil, also der Zeitverlauf der in das Erdreich eingetragenen bzw. aus dem Erdreich ausgehenden Wärmeleistung, vorgegeben wird. Ergeb-

nis dieser Simulationen sind zum einen die erwarteten Fluid- und Erdreichtemperaturen, zum anderen die benötigte Sondenlänge für die geplante Sondenkonfiguration.

In der Praxis werden die für die Bemessung maßgeblichen Simulationsberechnungen meist mit nur einem bestimmten geothermischen Lastprofil und nur selten mit Varianten des Lastprofils durchgeführt. Systematische Variationen, Sensitivitätsanalysen usw. fehlen nahezu durchgängig. Das vom Gebäude und seiner Anlagentechnik aufgeprägte geothermische Lastprofil ist jedoch allen typischen Schwankungen und Unsicherheiten des Wärme- und Kälteverbrauchs von Gebäuden unterworfen, z. B.:

- Bauphysikalische Parameter (Abweichungen der Ausführung von der Planung),
- Nutzung und Nutzungsänderungen,
- Witterung,
- Betriebsführung und technische Veränderungen.

Geothermieseitig kommen noch Unsicherheiten bzgl. der Untergrund- und Bohrungsparameter sowie mögliche Veränderungen der Gegebenheiten, wie z. B. veränderte Grundwasserverhältnisse und benachbarte Baumaßnahmen, hinzu.

Im Folgenden werden erste Untersuchungen zur Sensitivität von Erdwärmesondenanlagen gegenüber diesen Einflussgrößen vorgestellt.

### ANALYTISCHE BETRACHTUNGEN

Die thermische Reaktion von Erdwärmesonden auf die eingetragenen Lasten verläuft in unterschiedlichen Zeitskalen. Die Reaktion auf Spitzenleistungen erfolgt beispielsweise sofort bzw. kurzfristig, während - gerade beim kombinierten Heiz-Kühlbetrieb - die Jahresenergiebilanz einen entscheidenden, aber erst nach mehreren Jahren merklichen Einfluss auf das Gesamttemperaturniveau im Sondenfeld hat. In der Praxis bedeutet dies, dass signifikante Abweichungen der sich im Betrieb einstellenden Lasten von der ursprünglichen Planung u. U. erst nach längerer Betriebszeit zu Schadensfällen führen. Daneben besteht die Gefahr der Verletzung von Umweltauflagen, welche zunehmend bei größeren Anlagen hinsichtlich der thermischen Beeinflussung des Untergrundes in der Umgebung gemacht werden.

Für den Fall einer Wärmepumpenheizung, d. h. bei jährlich periodischem Wärmeentzug aus dem Erdreich, lassen sich die maßgeblichen thermischen Verhältnisse analytisch berechnen (Eskilson 1987, Koenigsdorff et. al. 2006). Die maximale Temperaturänderung  $\Delta\vartheta_{ges}$  (Abkühlung) des Fluids in den Erdwärmesonden gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur setzt sich aus den vier Anteilen 1) Reaktion auf die mittlere jährliche Entzugsleistung, 2) saisonaler, periodischer Verlauf (Amplitude der Monatswerte), 3) dynamische Reaktion auf zeitweilig anliegende Leistungsspitzen und 4) Wärmeübertragung in Sonde und Bohrloch zusammen. Die Berechnung von  $\Delta\vartheta_{ges}$  erfolgt durch Addition dieser vier Anteile aus den zugehörigen, auf die Bohrlochtiefe bezogenen Leistungsanteilen des Wärmeentzugs mit Hilfe der thermischen Widerstände 1)  $R_s$  (stationär: langfristige Reaktion), 2)  $R_p$  (periodisch: Amplitude der Monatsleistungen), 3)  $\hat{R}$  (Sprungantwort auf eine Spitzenleistung) und 4)  $R_b$  (Bohrlochwiderstand). Letztere beschreiben das stationäre und dynamische Übertragungsverhalten von Sonde und Erdreich:

$$\Delta\vartheta_{ges} = R_s \cdot \frac{\dot{Q}_0}{L} + R_p \cdot \frac{\dot{Q}_{p,res}}{L} + \hat{R} \cdot \frac{\hat{Q}_{res}}{L} + R_b \cdot \frac{\hat{Q}}{L} \quad (1)$$

Diese Temperaturabsenkung ist das maßgebliche Auslegungskriterium für die Sonden. Wesentlich größere Temperaturänderungen als die geplante maximale Absenkung sind aus energetischen, aber auch aus betriebstechnischen Gründen zu vermeiden und können im Extremfall zum Ausfall der Anlage führen. Die thermischen Widerstände sind Funktionen der Zeit, der Wärme- und der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs sowie der Bohrlocheigenschaften (Eskilson, 1987 und Koenigsdorff et. al. 2006).

Gerade bei kleineren Wärmesondenanlagen beruht die Auslegung i. d. R. auf aus der lokalen Geologie abgeschätzten Erdreichparametern mit dementsprechender Unsicherheit. Für ein typisches Wohnhaus mit Wärmepumpenheizung in Mitteleuropa (maximale Entzugsleistung: 7 kW, 110 m tiefe Doppel-U-Sonde) wurde deshalb beispielhaft die Auswirkung einer Unsicherheit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_E$  bzw. der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs  $a_E$  um  $\pm 15\%$  mit Hilfe des Ansatzes (1) ermittelt (s. Tabelle 1).

Tabelle 1

Betrag der Temperaturabsenkung des Fluids in Erdwärmesonden bei unterschiedlichen Erdreichdaten

$ \Delta\vartheta_{ges} $ [K]	$\lambda_E$ [W/(mK)]	$a_E$ [ $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s]
16,0 ( $\pm 0\%$ )	3,0 ( $\pm 0\%$ )	1,5 ( $\pm 0\%$ )
14,8 (-7,5 %)	3,45 (+15 %)	1,5 ( $\pm 0\%$ )
17,7 (+10,6 %)	2,55 (-15 %)	1,5 ( $\pm 0\%$ )
16,2 (+1,25 %)	3,0 ( $\pm 0\%$ )	1,725 (+15 %)
15,8 (-1,25 %)	3,0 ( $\pm 0\%$ )	1,275 (-15 %)
14,6 (-8,75 %)	3,45 (+15 %)	1,275 (-15 %)
18,0 (+12 %)	2,55 (-15 %)	1,725 (+15 %)

Die Ergebnisse zeigen, dass sich geologische Unsicherheiten eines Parameters zwar abgeschwächt, aber dennoch merklich auf den späteren Betriebszustand der Anlage auswirken. Überlagern sich Abweichungen bei mehreren Parametern (z. B. Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs) in ungünstiger Weise, sind die Auswirkungen auf das thermische Verhalten und die Leistungsfähigkeit der Anlage entsprechend stärker ausgeprägt.

## SIMULATIONSUNTERSUCHUNGEN

Detailliertere Untersuchungen als die vorstehenden Betrachtungen erfordern den Einsatz dynamischer Simulationsprogramme. Die folgenden Simulationen des Einflusses von Variationen des Heizwärmebedarfs wurden mit dem Programm Earth Energy Designer EED (Sanner, 1996) in Monatsschritten durchgeführt.

Basisfall ist ein Jahresheizwärmebedarf von 20 MWh/a, gedeckt durch eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 und eine 110 m tiefe Erdwärmesonde in einem Erdreich mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,5 W/(mK). Der Jahresheizwärmebedarf wurde dem langjährigen Mittel der Jahre 1980 bis 2005 einer Wetterstation nahe Biberach/Riß zugeordnet und entsprechend dieser Durchschnittswitterung auf die Monate aufgeteilt. Die daraus resultierende relative Verteilung auf die Monate ist der Standardverteilung, die als Default-Verteilung in EED vorgeschlagen wird und im Regelfall Planungsgrundlage in der Praxis ist, sehr ähnlich.

Mit Hilfe der monatlichen Gradtagszahlen lassen sich aus dem Basisfall die Werte des Jahresheizwärmebedarfs samt den zugehörigen Monatswerten für jedes reale Jahr aus diesem Zeitraum errechnen. Diese Variation beinhaltet also sowohl die zu erwartenden Schwankungen des Jahresheizwärmebedarfs als auch sämtlicher Monatswerte und deren Abfolge. Gegenüber dem langjährigen Mittel unterscheiden sich die Jahresbedarfswerte bei dieser Stichprobe um moderate  $\pm 11\%$ , während einzelne Monatswerte Unterschiede von über +30% gegenüber dem entsprechenden Monatswert des Durchschnittsjahres aufweisen. In der Untersuchung treten derart große Abweichungen einzelner Monate vom langjährigen Mittel im Januar 1985 und im Februar 1986 auf, also in der zweiten Hälfte der Heizperiode, so dass dort kritische Abweichungen von der Auslegungsberechnung mit dem Basisfall zu erwarten sind.

Die Ergebnisse bestätigen diese Vermutung. Abbildung 1 zeigt die monatlichen Fluidtemperaturen in der Sonde im ersten Betriebsjahr, berechnet für die Witterungen der Jahre 1985, 1986 und das langjährig mittlere Jahr bei einem Betriebsstart jeweils zum Jahresbeginn. Abbildung 2 enthält die sich nach 25 Betriebsjahren einstellenden Temperaturen dieser Jahre, wenn die Witterung über sämtliche 25 Jahre

konstant bliebe (Simulationen mit 25 Jahren unterschiedlicher Witterung sind in Vorbereitung).

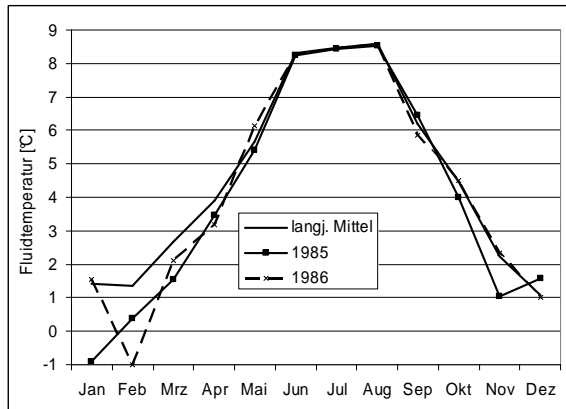


Abbildung 1 Monatliche Fluidtemperaturen im ersten Betriebsjahr einer Sondenanlage

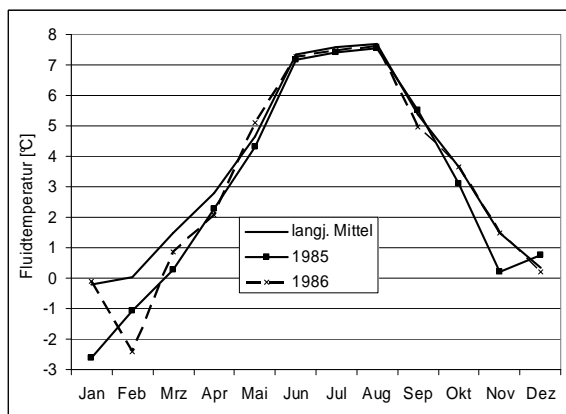


Abbildung 2 Monatliche Fluidtemperaturen nach 25 Jahren Betrieb einer Sondenanlage

Die minimalen monatlichen Fluidtemperaturen bei den Witterungen der Jahre 1985 und 1986 sind nahezu identisch und liegen im Januar bzw. Februar ca. 2,5 K unter den mit dem langjährig mittleren Klima berechneten Werten, was, bezogen auf die ungestörte Erdreichtemperatur von knapp 9 °C, eine starke Abweichung bedeutet. Die Witterung von 1985 resultiert mit + 11 % gegenüber dem langjährigen Mittel in einem noch höheren Jahresheizwärmebedarf als die Witterung von 1986 (+ 6 %). Deshalb weist die Witterung von 1985 einen Jahresmittelwert der Fluidtemperatur, also ein langfristiges Temperaturniveau, von ca. 0,5 K (1. Betriebsjahr) bis 0,6 K (25. identisches Betriebsjahr in Folge) unterhalb des Wertes für das langjährige Mittel auf. Für die Witterung von 1985 beträgt diese Differenz nur 0,3 K.

Typische maximale Abweichungen des Jahresheizwärmebedarfs vom langjährigen Mittel von ca. 10 bis 15 % haben demnach lediglich moderate Auswirkungen auf das Jahres-Temperaturniveau in Erdwärmesonden. Einzelne Monate oder Perioden aus mehreren aufeinander folgenden Monaten mit extremen Witterungsbedingungen, wie sie künftig

Witterungsbedingungen, wie sie künftig evtl. häufiger zu erwarten sind, haben dagegen Auswirkungen, die nicht mehr zu vernachlässigen sind.

## ZUSAMMENFASSUNG

Anhand analytischer Berechnungen sowie einer Simulationsstudie wurden Auswirkungen unsicherer und variabler Parameter auf das thermische Verhalten von Erdwärmesondenanlagen einer ersten Untersuchung unterzogen. Dabei wurden zunächst die Erdreicheigenschaften Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sowie der witterungsabhängige Jahresheizwärmebedarf und seine monatliche Verteilung variiert, um grundsätzliche Zusammenhänge und Einflüsse zu identifizieren.

Variationen einzelner Erdreichparameter um  $\pm 15\%$  ergaben merkbare Änderungen der Temperaturabsenkung des Wärmeträgerfluids in den Erdwärmesonden gegenüber dem ungestörten Erdreich, die sich bei gleichzeitiger Variation mehrerer Parameter verstärken. Die Variation der Heizwärmebedarfswerte basierend auf realen Witterungsbedingungen der letzten 25 Jahre ergab einen mäßigen Einfluss auf die Jahresmitteltemperatur des Fluids, entsprechend der Variabilität des Jahresheizwärmebedarfs von  $\pm 11\%$ . Demgegenüber treten bei einzelnen Monaten Abweichungen vom langjährigen Mittel von bis zu über 30 % auf, die sich verhältnismäßig stark auf das thermische Verhalten der geothermischen Anlage auswirken.

Dies zeigt, dass unsichere oder variable Betriebs- oder Bemessungsparameter in bestimmten Fällen einen überraschend großen Einfluss haben, was weitere Untersuchungen für angeraten erscheinen lässt.

## DANKSAGUNG

Der Autor dankt C. Kirschmann für die Durchführung der Simulationen für diesen Beitrag im Rahmen seines Masterstudiums der Gebäudeklimatik.

## LITERATUR

- Eskilson P. 1987. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.
- Koenigsdorff R., Heinrich, S., Sedlak M. 2006. Test und Weiterentwicklung des Programms GEOSYST und Bemessung von Erdwärmesondenfeldern mit einem daraus abgeleiteten Handrechenverfahren. Ottilien-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Freising.
- Sanner B., Hellström G. 1996. „Earth Energy Designer“, eine Software zur Berechnung von Erdwärmesondenanlagen. 4. Geotherm. Fachtagung in Konstanz.