

## MODELLIERUNG OBERFLÄCHENNAHER ERDWÄRMEÜBERTRAGER FÜR SYSTEMSIMULATIONEN IN TRNSYS

H. Hirsch, F. Hüsing und G. Rockendorf

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH)

Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Niedersachsen, Germany

Tel: +49 (0) 5151 999 646; Fax: +49 (0) 5151 999 400

E-Mail: hirsch@isfh.de

### KURZFASSUNG

Simulationen erdreichgekoppelter Wärmepumpen bieten die Möglichkeit den Einfluss verschiedener Parameter auf die Systemeffizienz zu untersuchen. Dafür ist eine genaue Abbildung der Erdreichquelle notwendig. Das hier vorgestellte Modell für Erdwärmekollektoren (EWK) basiert auf zweidimensionaler Wärmeleitung im Erdreich und einer instationären Energiebilanz für die Kopplung mit dem Wärmeträgerfluid, welche jeweils mit expliziten Finite-Differenzen-Schemen gelöst werden. Durch die Verknüpfung unterschiedlicher Rechengebiete bietet das Modell zudem die Möglichkeit auch Randgebiete eines EWK abzubilden. Der Beitrag beschreibt die wesentlichen Modellannahmen, den Vergleich mit Messdaten einer eigens errichteten Versuchsanlage sowie den Einfluss wesentlicher Parameter auf die Effizienz eines EWK-Wärmepumpensystems.

### ABSTRACT

Simulation of ground source heat pumps offers the possibility to study the impact of different parameters on the systems efficiency. Therefore, exact modeling of the ground heat source is essential. The presented horizontal ground heat exchangers (HGHX) model is based on two-dimensional heat conduction inside the soil and a transient energy balance for the fluid coupling. Both are solved using explicit finite-difference schemes. Moreover HGHX-edges can be taken into account by combining different computational domains. The article presents main assumptions and governing equations as well as the comparison with measurements from an experimental facility and the impact of main parameters on the efficiency of an HGHX-system.

### EINLEITUNG

Wärmepumpen zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung erfahren in den letzten Jahren weltweit eine steigende Nachfrage. Nicht zuletzt aufgrund aktueller klimapolitischer Entwicklungen, werden sie zur Deckung des Wärmebedarfs in einem zunehmend regenerativen Energiesystem unverzichtbar. Heute kommen allerdings überwiegend Luft/Wasser-Wärmepumpen mit geringer Effizienz zum Einsatz. Erdreichgekoppelte Wärmepumpen deren Effizienz deutlich höher ist, werden hingegen zunehmend sel-

tener installiert (Nieder et al. 2015). Dies ist vor allem auf den relativ hohen Installationsaufwand sowie die gesetzlichen Beschränkungen zurückzuführen.

Um eine bessere Planungssicherheit zu gewährleisten und unnötige Investitionskosten zu vermeiden, ist deshalb eine exakte Auslegung von Erdreichwärmeübertragern notwendig. Dies wird vor allem durch numerische Simulationsmodelle möglich, welche die relevanten physikalischen Vorgänge im Erdreich mit ausreichender Genauigkeit abbilden. Durch die Verwendung dieser Modelle in Systemsimulationsprogrammen wie TRNSYS, kann zudem der Einfluss verschiedener Parameter auf die Effizienz des Gesamtsystems untersucht werden. Während sich für Erdwärmesonden (EWS) bereits zahlreiche Modelle etabliert haben, sind für Erdwärmekollektoren (EWK) bisher nur wenige bekannt. So finden sich etwa Modelle mit Nutzung kommerzieller Software bei Ochs und Feist, 2012, Fontaine et al., 2011, sowie selbstentwickelte Modelle bei Mei, 1986, Ramming, 2007 und Gan, 2013 welche allerdings überwiegend nicht experimentell validiert wurden oder sich nicht für die Systemintegration in TRNSYS eignen. Das hier vorgestellte Modell unterscheidet sich von bestehenden im Hinblick auf eine rechenzeitoptimierte Systemintegration, eine problemangepasste Diskretisierung des Erdreichs sowie der Abbildung der Fluidkapazität durch eine instationäre Energiebilanz. Zudem wird die Modellgenauigkeit durch den Vergleich mit Messwerten einer eigens errichteten Versuchsanlage nachgewiesen. Darauf aufbauend wird anschließend der Einfluss verschiedener Auslegungsparameter auf die Effizienz von Erdwärmekollektoren in einem Wärmepumpenheizungssystem eines Einfamilienhauses untersucht.

### ERDWÄRMEKOLLEKTORMODELL

#### **Modellannahmen**

Das Temperaturfeld im Erdreich wird im Modell auf einen zweidimensionalen Schnitt durch den Erdwärmekollektor reduziert. Es kommt somit die 2d-Wärmeleitungsgleichung für das Erdreich

$$\rho_E c_E \frac{\partial T_E}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial y} \right) + \dot{q}_{fl} \quad (1)$$

und die instationäre Energiebilanz für das Wärmeübertragerfluid

$$\frac{\partial T_{fl}}{\partial t} + v_{fl} \frac{\partial T_{fl}}{\partial z} = \frac{4k(T_E - T_{fl})}{d_a \rho_{fl} c_{fl}} \quad (2)$$

zur Anwendung. Dabei ist  $T_E$  die Erdreichtemperatur,  $T_{fl}$  die Fluidtemperatur,  $\rho_E$ ,  $c_E$ ,  $\lambda_E$  und  $\rho_{fl}$ ,  $c_{fl}$  die Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität des Erdreichs bzw. des Fluids,  $v_{fl}$  die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids,  $d_a$  der Außendurchmesser des Rohrs und  $k$  der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Fluid und Erdreich.

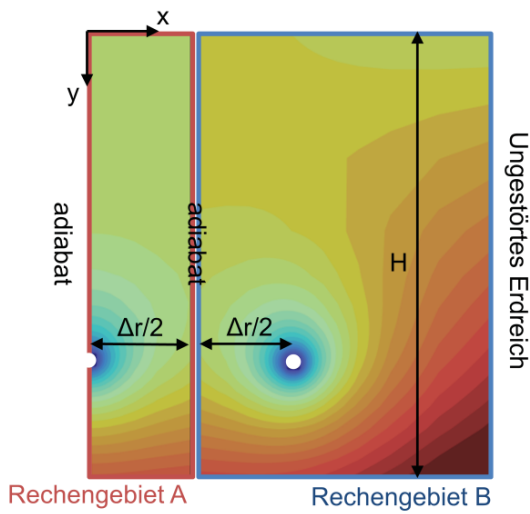


Abbildung 1: Position der Rechengebiete A (symmetrischer Teil) und B (Randgebiet) im Erdreich als Schnittdarstellung

Die Wärmeleitung im Erdreich kann, wie in Abbildung 1 gezeigt, durch zwei unterschiedliche Rechengebiete abgebildet werden, deren seitliche Ränder entsprechend der Symmetrierandbedingung jeweils adiabat sind. Rechengebiet A beinhaltet ein halbes Rohr und entspricht in seiner Breite dem halben Rohrabstand. Unter Nutzung der Symmetrie wird somit der innere Teil eines Erdwärmekollektors abgebildet. Rechengebiet B beinhaltet das ganze Rohr und erstreckt sich zusätzlich auf einer Seite bis zum ungestörten Erdreich. Damit ist es möglich, eine Zuleitung oder ein am Rand liegendes Kollektorrohr abzubilden. Das Modell bietet die Möglichkeit in TRNSYS mehrere Types mit unterschiedlichen Rechengebieten hintereinanderschalten und somit ein quasi-dreidimensionales Modell zu erzeugen. Es findet dabei allerdings keine Wärmeleitung zwischen den verschiedenen Rechengebieten statt.

Für beide Rechengebiete wird am jeweils unteren Rand eine konstante Temperatur

$$T_E(y = H) = \langle T_{amb} \rangle_{365d} \quad (3)$$

angesetzt, während an der Oberfläche die Wärmebilanz

$$\lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial y} (y = 0) = \dot{q}_{global} - \dot{q}_{IR} + h_{konv}(T_{amb} - T_{E,0}) \quad (4)$$

gilt. Dabei ist  $T_{amb}$  die Umgebungstemperatur,  $H$  die Gesamthöhe des Rechengebiets,  $\dot{q}_{global}$  die kurzwellige Globalstrahlung,  $\dot{q}_{IR}$  die langwellige Strahlung und  $h_{konv}$  der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an der Erdoberfläche.

### Abbildung des Phasenwechsels

Der Phasenwechsel in Folge der Eisbildung im Erdreich wird entsprechend der apparent heat capacity method (Muhieddine et al. 2009) abgebildet. Dabei wird die spezifische Wärmekapazität des Erdreichs in einem festgelegten Temperaturbereich durch eine Normalverteilung angenähert:

$$c_{lat}(T) = h_{lat} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(T - T_{lat})^2}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$\sigma = 1/5 \Delta T_{lat}$$

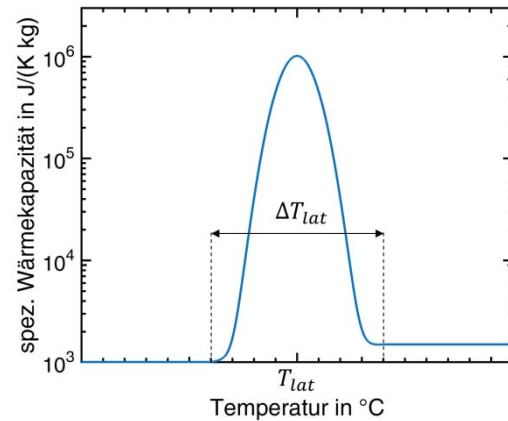


Abbildung 2: Schematische Darstellung der temperaturabhängigen Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität im Temperaturbereich  $T_{lat} - \Delta T_{lat}/2 < T < T_{lat} + \Delta T_{lat}/2$  ergibt sich dann aus der latenten Wärmekapazität und einer linearen Interpolation zwischen der Wärmekapazität des ungefrorenen und des gefrorenen Erdreichs:

$$c_E(T) = c_{lat}(T) + c_{E,fr} + (c_{E,unfr} - c_{E,fr}) \frac{T - (T_{lat} - \frac{\Delta T_{lat}}{2})}{\Delta T_{lat}} \quad (6)$$

Dabei ist  $h_{lat}$  die Phasenwechselenthalpie des im Erdreich vorhandenen Wassers.  $c_{E,fr}$  und  $c_{E,unfr}$  sind die spezifischen Wärmekapazitäten des gefrorenen bzw. ungefrorenen Bodens. Den Verlauf der spezifischen Wärmekapazität über der Temperatur zeigt Abbildung 2.

### Diskretisierung der Gleichungen

Die Gleichungen (1) und (2) werden jeweils über explizite Finite-Differenzen-Verfahren gelöst. Für die Wärmeleitungsgleichung (1) kommt dabei eine Vorwärtsdifferenz in der Zeit

$$\rho_E c_E \frac{\partial T_E}{\partial t} \approx \rho_{i,j} c_{i,j} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t_E} \quad (7)$$

mit dem Zeitschritt  $\Delta t_E$  und eine zentrale örtliche Differenz

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial x} \right) \approx \frac{\lambda_{i+0.5,j} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n)}{\Delta x_{i,j}} + \frac{\lambda_{i-0.5,j} (T_{i,j}^n - T_{i-1,j}^n)}{\Delta x_{i,j}} \quad (8)$$

mit dem Gitterabstand  $\Delta x$  zur Anwendung. Gleichung 8 gilt analog auch für die Approximation der Ableitung in y-Richtung. Dabei bezeichnet n den zeitlichen Index, i den räumlichen Index in x-Richtung und j den räumlichen Index in y-Richtung. Der Wärmetransport zwischen zwei Temperaturknoten wird mit dem arithmetischen Mittelwert (Index  $i \pm 0.5$ ) der jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten berechnet. Für die instationäre Energiebilanz (2) kann, da die Durchströmung nur in eine Richtung erfolgt, ein explizites Upwind-Schema angewendet werden:

$$\frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\Delta t_{fl}} - v_{fl} \frac{T_k^n - T_{k-1}^n}{\Delta z} = \frac{4k(T_E - T_k^n)}{d_a \rho_{fl} c_{fl}} \quad (9)$$

Dabei ist die Gitterweite  $\Delta z$  entlang des Fluidrohres konstant und es gilt der Index k. Bezüglich der Zeitschritte für die Erdreich- und Fluidberechnung gelten jeweils die CFL-Stabilitätsbedingungen:

$$\Delta t_E \leq \frac{\rho_E c_E \Delta x_{min}^2}{4 \lambda_E} \quad (10)$$

$$\Delta t_{fl} \leq \frac{\Delta z}{v_{fl}} \quad (11)$$

Abbildung 3 zeigt die räumliche Diskretisierung des Erdreiches. Es wird ein strukturiertes rechtwinkliges Netz gewählt, welches sich in Richtung des EWK-Rohrs bis zur minimalen Gitterbreite  $\Delta x_{min}$  verengt. Aufgrund des kartesischen Koordinatensystems wird das EWK-Rohr im Erdreich als Quadrat abgebildet. Um die tatsächliche Rohroberfläche zu berücksichtigen, ist es notwendig den Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen Fluid und Erdreich mit dem Korrekturfaktor  $\pi/4$  zu multiplizieren:

$$k = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_a}{\alpha d_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) d_a}{2 \lambda_R} + \frac{\Delta x_{min}}{2 \lambda_E} \right)^{-1} \quad (3)$$

Dabei ist  $d_i$  der Innendurchmesser des Rohrs und  $\lambda_R$  die Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient des Fluids  $\alpha$  wird in Abhängigkeit der Fluideigenschaften und der Strömungsbedingungen berechnet (Incropera et al., 2007). Der Einfluss der minimalen Gitterbreite auf die Modellqualität lässt sich anhand einer Netzstudie bestimmen. Dazu wird dem Erdreich eine konstante Wärmeleistung durch ein Rohr mit einem Außendurchmesser von  $d_a=32$  mm entzogen.

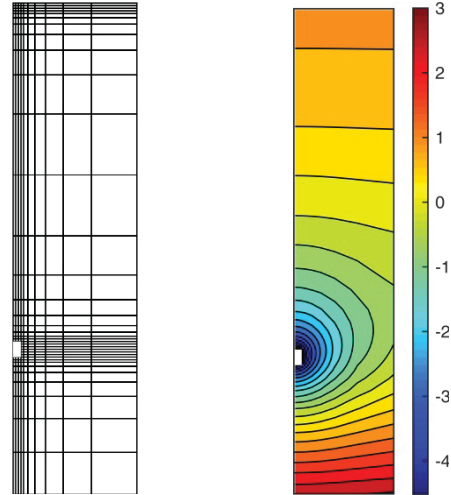


Abbildung 3: Ausschnitt des Netzes (links) und eines Temperaturfelds (rechts) für das Rechengebiet A

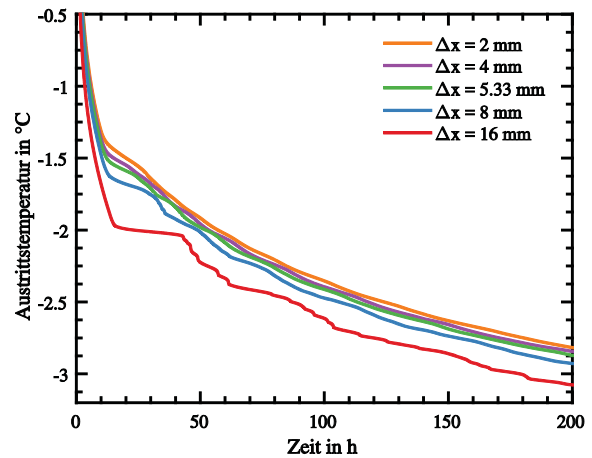


Abbildung 4: Austrittstemperatur des Erdwärmekollektormodells bei verschiedenen minimalen Gitterbreiten

Abbildung 4 zeigt die Austrittstemperatur des Erdwärmekollektors für verschiedene minimale Gitterbreiten, welche jeweils ganzen Teilern des halben Rohraußendurchmessers entsprechen. Es ist klar zu erkennen, dass insbesondere bei Eintreten des latenten Wärmeentzugs (Eisbildung im Erdreich), die Gitterbreite einen entscheidenden Einfluss auf die Modellqualität besitzt. Offensichtlich konvergieren die Kurven bei  $\Delta x=2$  mm, was einem Netz mit 2924 Elementen (Rechengebiet B) entspricht. Ein guter Kompromiss aus Rechenzeit und Genauigkeit kann

allerdings auch mit  $\Delta x=5,33$  mm (entspricht  $D/6$ ) erreicht werden. Das Netz besteht dann aus 495 Elementen (Rechengebiet A) bzw. 1305 Elementen (Rechengebiet B).

## MODELLVALIDIERUNG

Um einen möglichst exakten Vergleich zwischen Modell und realen Messdaten zu ermöglichen, ist am ISFH eine Experimentalanlage errichtet worden. Diese verfügt über einen Erdwärmekollektor mit einer Fläche von  $150 \text{ m}^2$  mit 4 variabel verschaltbaren Teilfeldern. Durch eine Reihenschaltung aus einer Wärmepumpe und einem Heizstab kann Wärme auf beliebigen Leistungsniveaus zu- oder abgeführt werden. Neben den Ein- und Austrittstemperaturen am Erdwärmekollektor und der Wärmepumpe wird auch die Erdreichtemperatur in verschiedenen Tiefen und horizontalen Abständen gemessen. Weiterhin werden an der Oberfläche Globalstrahlung, Infrarotstrahlung, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit erfasst.



Abbildung 5: Am ISFH errichteter Erdwärmekollektor

Die Validierungsmessung erfolgt bei Betrieb nur eines Teils des EWK. Dieser besteht aus 35 m am Rand liegenden Rohr (entspricht Rechengebiet B) und 30 m innerem Rohr (entspricht Rechengebiet A). Dem Modell wird das Starttemperaturfeld des Erdreichs, die am EWK gemessene Wärmeleistung und der Massenstrom übergeben. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Messung im Vergleich mit dem zweidimensionalen Modell (nur Rechengebiet A) und dem quasi-dreidimensionalen Modell (Verknüpfung von Rechengebiet A und B). Es ist dabei die Austrittstemperatur über 90 Stunden sowie über die erste halbe Stunde dargestellt. Das quasi-dreidimensionale Modell hat über 90 Stunden eine nahezu konstante Abweichung von max.  $0,2 \text{ K}$ , während die Abweichung des zweidimensionalen Modells mit der Versuchsdauer deutlich zunimmt. Auch den Verlauf der Austrittstemperatur während der ersten 30 Minuten, welcher stark von der Fluidkapazität beeinflusst ist, kann das Modell aufgrund der instationären Energiebilanz in guter Näherung vorhersagen. Den Vergleich zwischen simulierter und gemessener Erdreichtemperatur zeigt Abbildung 7. Die Erdreichtemperatur ist

in verschiedenen vertikalen Abständen über bzw. unter dem Rohr ( $y = 1,2 \text{ m}$ ) aufgetragen. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass vor allem die exakte Positionierung der Temperaturfühler im Erdreich große Unsicherheiten birgt.

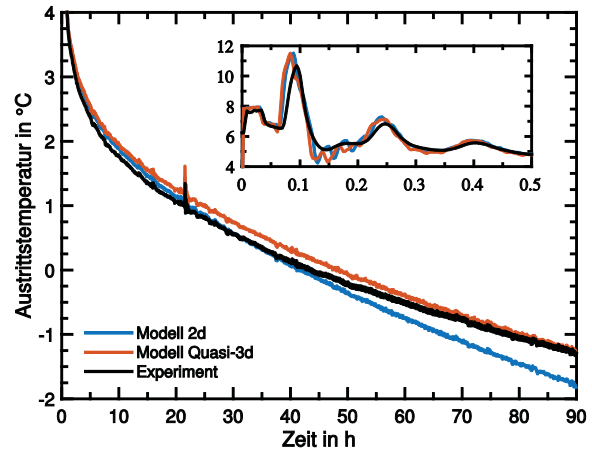


Abbildung 6: Austrittstemperatur des Erdwärmekollektors im Experiment im Vergleich mit dem 2d- und dem Quasi-3d-Modell

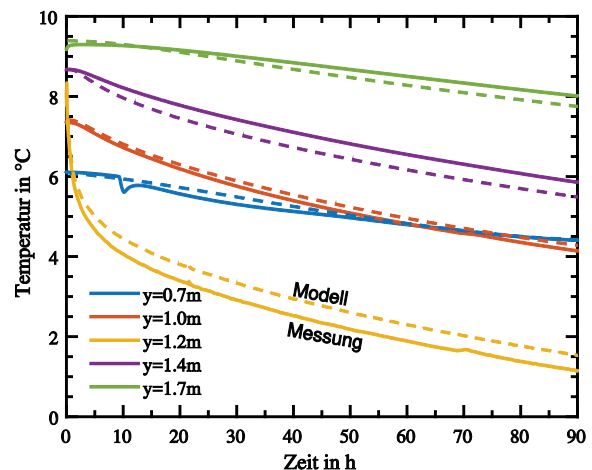


Abbildung 7: Erdreichtemperaturen im Experiment im Vergleich mit dem Modell. Das Fluidrohr befindet sich bei  $y=1,2 \text{ m}$

## SYSTEMSIMULATIONEN

### Systembeschreibung

Um die Auswirkungen der Dimensionierung von Erdwärmekollektoren auf die Effizienz erdreichgekoppelter Wärmeversorgungssysteme untersuchen und bewerten zu können, wird das Modell eines Wärmeversorgungssystems aufgebaut. In der Simulationsumgebung TRNSYS werden dafür die Energieerträge und -bedarfe eines Einfamilienhauses und seiner Wärmeversorgungssysteme witterungsabhängig im Jahresgang berechnet und bilanziert. Die gewählten Randbedingungen orientieren sich am Task 44 des „Solar Heating and Cooling“-Programmes (SHC) der Internationalen Energieagentur (IEA). Es

werden zwei innerhalb des Task 44 definierte Referenzgebäudetypen untersucht: ein modernes Einfamilienhaus (SFH45) und ein Bestandsgebäude (SFH100) (Dott et al. 2012). Als weitere Randbedingung ist das Bewohnerverhalten (Wärmegewinne durch anwesende Personen und elektrische Geräte, Warmwasserzapfprofil, Lüftungsverhalten, etc.) gemäß Task 44 implementiert (Haller et al. 2012).

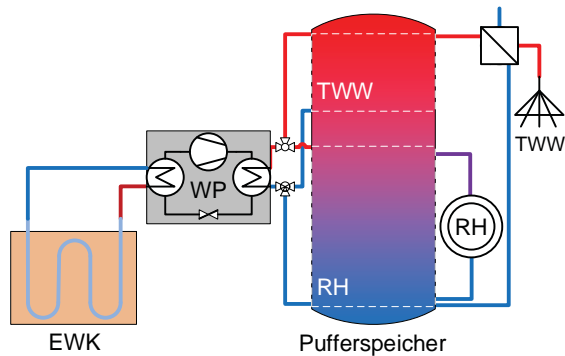


Abbildung 8: Schema des untersuchten Wärmeversorgungssystems

Am Untersuchungsstandort Zürich beträgt der Heizwärmebedarf des modernen Einfamilienhauses (SFH45) etwa 8500 kWh/a, während ein Energiebedarf von ca. 2200 kWh/a für Trinkwarmwasser besteht. Für das Bestandsgebäude beträgt bei identischem Trinkwasserbedarf der Heizwärmebedarf etwa 18000 kWh/a.

Tabelle 1: Eigenschaften der ausgewählten Bodenarten

BODENNUMMER	1	2	3
Bezeichnung	Lehmiger Sand	Sandiger Ton Lehm	Sandiger Ton
Wassergehalt in $m^3/m^3$	14 %	27 %	37 %
Wärmeleitfähigkeit ungefr. in W/mK	1,18	1,61	1,9
Wärmeleitfähigkeit gefr. in W/mK	1,12	2,15	2,88
Wärmekapazität ungefr. in J/kg/K	840	1000	1330
Wärmekapazität gefr. in J/kg/K	770	860	1100
Rohdichte in $kg/m^3$	1515	1536	1820
Schmelzenthalpie in J/kg Boden	30627	58259	67378

Abbildung 8 zeigt schematisch das untersuchte Wärmeversorgungssystem. Die Wärme für Trinkwarmwasserbereitung (TWW) und Raumheizung (RH) wird über einen Pufferspeicher mit zwei Zonen (TWW oben / RH unten) bereitgestellt. Der Speicher wird bis zu einer minimalen Soleeintrittstemperatur von  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  mittels einer Sole/Wasser-Wärmepumpe beladen, für die je Zone eine Belademöglichkeit existiert. Wird die minimale Quellentemperatur unterschritten, übernimmt eine integrierte elektrische

Widerstandsheizung die Beladung des Speichers. Die Raumheizung des SFH45 erfolgt mittels einer Fußbodenheizung, während das SFH100 mit Radiatoren ausgestattet ist.

Der Einfluss physikalischer Bodeneigenschaften wird anhand von drei ausgewählten Bodenarten aufgezeigt, welche eine Abschätzung der anzutreffenden Bandbreite darstellen. Die Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

### Ergebnisse

Zunächst soll der Einfluss unterschiedlicher Rohrlängen und Verlegeabstände auf die Systemjahresarbeitszahl betrachtet werden. Diese ist definiert als das Verhältnis aus bereitgestellter Wärme für Warmwasser und Raumheizung zur Summe der innerhalb des Wärmeerzeugungssystems für Heizstab, Wärmepumpe und Umwälzpumpen aufgewendeten elektrischen Energie. Abbildung 9 zeigt die  $JAZ_{Sys}$  des modernen Gebäudes (SFH45) für Boden 2 in Abhängigkeit der EWK-Fläche für verschiedene Verlegeabstände. Als Referenz ist die Dimensionierung nach VDI 4640-2 dargestellt, welche eine  $JAZ_{Sys}$  von 3,89 erreicht (schwarzes Quadrat). Bei Vergrößerung der EWK-Fläche kann die  $JAZ_{Sys}$  nur moderat auf bis zu 4,11 gesteigert werden. Hingegen scheint es bei Verwendung von engeren Verlegeabständen möglich, die EWK-Fläche um ca. 25 % gegenüber der VDI-Auslegung zu verkleinern ohne dabei Effizienzeinbußen hinnehmen zu müssen. Inwiefern solche geringen Verlegeabstände zu problematischen Frostzuständen bzw. Vegetationsverzögerungen führen, ist Gegenstand weiterer aktueller Untersuchungen. Unterhalb einer kritischen EWK-Fläche nimmt die Systemjahresarbeitszahl stark ab, was auf den zunehmenden Heizstabeinsatz zurückzuführen ist.

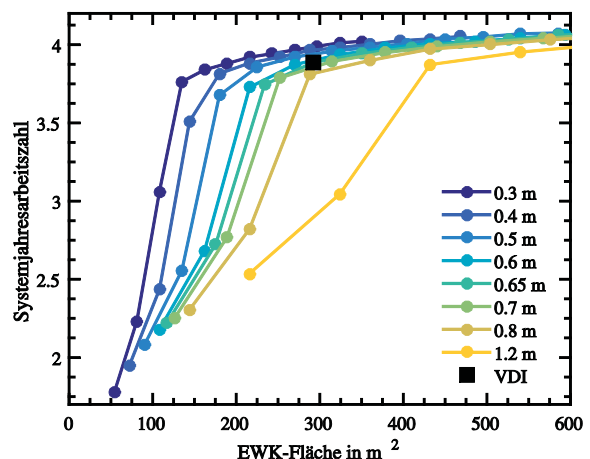


Abbildung 9: Systemjahresarbeitszahl für verschiedene Verlegeabstände über der EWK-Fläche bei Verwendung des Gebäudes SFH45 und Boden 2

Den Einfluss verschiedener Bodenarten und Gebäudetypen zeigt Abbildung 10. Das Bestandsgebäude (SFH100) erreicht eine maximale  $JAZ_{Sys}$  von ca. 3,4, während das moderne Gebäude (SFH45) bis zu 4,2

erreicht. Die geringere Systemeffizienz des SFH100 lässt sich hauptsächlich auf die unterschiedlichen Heizsysteme (höhere Heizungsvorlauftemperatur von 60 °C (SFH100) gegenüber 40 °C (SFH45) bei Auslegungspunkt) und folglich ungünstigere Betriebspunkte der Wärmepumpe zurückführen. Die physikalischen Eigenschaften des Bodens wirken sich bei beiden Gebäudetypen vor allem dann auf die Systemeffizienz aus, wenn der EWK besonders knapp dimensioniert wird. Bei großen Flächen sind die Unterschiede hingegen vor allem zwischen Boden 2 und 3 eher gering.

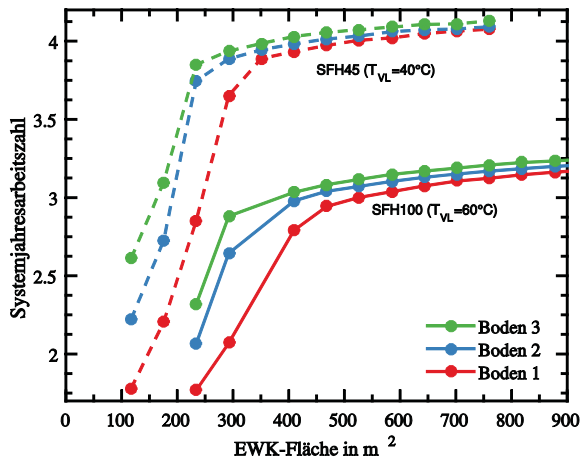


Abbildung 10: Systemjahresarbeitszahl für verschiedene Bodenarten und Heizlasten über der EWK-Fläche bei Verwendung eines festen Verlegeabstands von 0,6 m

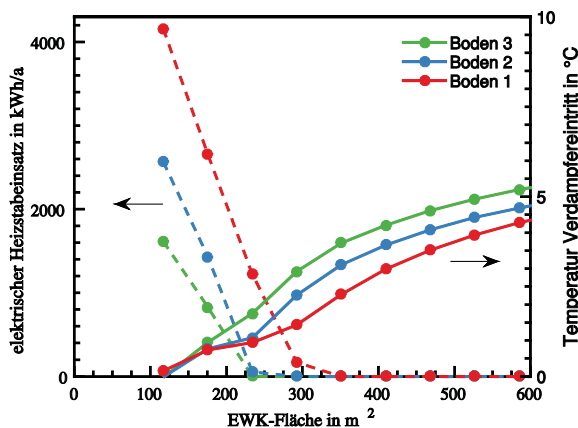


Abbildung 11: Elektrischer Heizstabeinsatz und energetisch gemittelte Verdampfer Eintrittstemperatur für verschiedene Bodenarten über der EWK-Fläche bei Verwendung eines festen Verlegeabstands von 0,6 m für das Gebäude SFH45

Auch hier ist der vorhergehend diskutierte Kurvenverlauf über ein breites Spektrum an Randwerten zu erkennen und kann somit als charakteristisch für ein EWK-Wärmepumpensystem bezeichnet werden. Als wesentliche Einflussgrößen lassen sich dabei der elektrische Heizstabeinsatz und die Verdampfer Eintrittstemperatur identifizieren. Abbildung 11 zeigt beide Größen für das Gebäude SFH45 und den Ver-

legeabstand 0,6 m. Der bei geringen EWK-Flächen auftretende Nachheizbedarf erklärt die massive Verschlechterung der Systemjahresarbeitszahl bei Unterschreiten einer minimalen Kollektorfläche. Die energetisch gemittelte Verdampfer Eintrittstemperatur (entspricht der EWK-Austrittstemperatur) steigt hingegen, ab Erreichen einer erschöpfungsfreien Konfiguration, degressiv mit zunehmender EWK-Fläche. Die Überlagerung beider Effekte erklärt den charakteristischen Verlauf der  $JAZ_{sys}$ . Unterhalb einer minimalen EWK-Fläche ist vergleichsweise ineffiziente Nachheizung erforderlich und verursacht massive Minderungen der Systemjahresarbeitszahlen. Oberhalb der erschöpfungsfreien EWK-Fläche bewirken höhere Quellentemperaturen eine moderat gesteigerte Effizienz der Wärmepumpe und verbessern dadurch die Systemjahresarbeitszahl.

## ZUSAMMENFASSUNG

Erdwärmekollektoren kommen im Vergleich zu anderen Wärmequellen für Wärmepumpensysteme aufgrund ihres hohen Flächenbedarfs relativ selten zum Einsatz. Numerische Modelle können in Verbindung mit Systemsimulationen zu einer genaueren Auslegung beitragen und zudem die wesentlichen Einflüsse bestimmter Auslegungsparameter aufzeigen. Das vorgestellte numerische Erdwärmekollektormodell für TRNSYS basiert auf zweidimensionaler Wärmeleitung im Erdreich und berücksichtigt sowohl instationäre Effekte als auch Randeinflüsse und Eisbildung. Ein Vergleich mit Messdaten aus einer eigens errichteten Versuchsanlage zeigt zudem eine gute Übereinstimmung. Auf Grundlage des neu entwickelten Modells ist der Einfluss verschiedener Parameter auf die Effizienz eines EWK-Wärmepumpensystems in TRNSYS untersucht worden. Dabei lassen sich zwei wesentliche Effekte erkennen: Unterhalb einer kritischen EWK-Fläche nimmt der elektrische Heizstabeinsatz stark zu, was hohe Effizienzeinbußen verursacht. Eine Vergrößerung der EWK-Fläche bewirkt hingegen, verursacht durch höhere Verdampfer Temperaturen, nur eine mäßige Verbesserung der Systemjahresarbeitszahl. Im Vergleich mit der VDI-Auslegung scheint es möglich, kleinere Flächen durch eine engere Verlegung zu erreichen.

Die nächste Phase der Untersuchungen hat die aktive Regeneration von EWK zum Inhalt, mit dem Ziel, eine weitere Senkung der erforderlichen EWK-Fläche zu prüfen.

## DANKSAGUNG

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“ wird in Kooperation mit der Firma tewag GmbH und dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FKZ 03ET1275A

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

## LITERATUR

Congedo, P.M., G. Colangelo und G. Starace. 2012. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering* 24–32.

Dott, R., M.Y. Haller, J. Ruschenburg, F. Ochs und J. Bony. 2012. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part B: Buildings and Space Heat Load - A technical Report of Subtask C. Report C1 Part B. Institut für Energie am Bau - Fachhochschule Nordwestschweiz.

Fontaine, Pier-Olivier, Denis Marcotte, Philippe Pasquier und Denis Thibodeau. 2011. Modeling of horizontal geexchange systems for building heating and permafrost stabilization. *Geothermics* 40(3).

Gan, Guohui. 2013. Dynamic thermal modelling of horizontal ground-source heat pumps. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 8(2).

Haller, M.Y., R. Dott, J. Ruschenburg, F. Ochs und J. Bony. 2012. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part A: General Simulation Boundary Conditions, A technical report of subtask C. Report C1 Part A.

Incropera, DeWitt und Bergman. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. Auflage: John Wiley & Sons. NJ USA.

Mei, V. C. 1986. Horizontal ground-coil heat exchanger: Theoretical and experimental analysis. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge USA.

Muhieddine, Mohamad, Edouard Canot und Ramiro 2009. Various Approaches for Solving Problems in Heat Conduction with Phase Change. *International Journal on Finite Volumes* 2009, pp.19.

Nieder, Thomas, Peter Bickel und Frank Kusiol. 2015. Entwicklung der erneuerbaren energien in Deutschland im Jahr 2014. Stuttgart: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasser-

stoff-Forschung Baden-Württemberg. Stuttgart Deutschland.

Ochs, Fabian und Wolfgang Feist. 2012. FE Erdreich-Wärmeübertrager Model Für Dynamische Gebäude- und Anlagensimulation mit Matlab/Simulink. BauSIM 2012.

Ramming, Klaus. 2007. Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle. Dissertation, Dresden: TU Dresden.