

Erdwärmekollektoren in Kombination mit Solarkollektoren als Quelle für Wärmepumpensysteme

Hauke Hirsch, Oliver Mercker, Gunter Rockendorf
Institut für Solarenergieforschung Hameln, Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal
Tel.: 05151/999-521646
E-Mail:hirsch@isfh.de
Internet:www.isfh.de

1. Einleitung

Wärmepumpensysteme mit Erdwärmekollektoren (EWK) als Quelle sind deutlich energieeffizienter als Luft-/Wasserwärmepumpen und haben einen geringeren baulichen und administrativen Aufwand als Erdwärmesonden. Diese Vorteile stehen einem vergleichsweise hohen Flächenverbrauch gegenüber, weshalb EWK als Quelle für Wärmepumpen in der Praxis seltener als andere Quellen zur Anwendung kommen.

In Zusammenarbeit mit der tewag GmbH und dem Bundesverband Wärmepumpe, wird am ISFH die Kombination von EWK und Solarkollektoren untersucht. Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts ist es, die benötigte Fläche von EWK durch solare Regeneration signifikant zu verringern. Dazu sind sowohl umfangreiche Systemsimulationen in TRNSYS als auch experimentelle Untersuchungen geplant. Zunächst soll ein geeignetes EWK-Modell erstellt werden, das den Anforderungen dynamischer Jahressimulationen komplexer Systeme gerecht wird. Weiterhin wird am ISFH eine Experimentalanlage gebaut, um das Modell zu validieren und die tatsächlichen Einsatzgrenzen von EWK zu untersuchen. Ausgehend von Erfahrungen aus abgeschlossenen Projekten, beschreibt der Beitrag die Projektziele, den aktuellen Stand bei der Modellentwicklung und der Versuchsplanung sowie die vorgesehenen Untersuchungen.

2. Bisherige Kenntnisse und Motivation

Ein vorangegangenes Projekt am ISFH untersuchte in umfangreichen Experimenten und Simulationsstudien die Kombination von solarer Wärme und Erdwärmesonden

[1]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die solare Regeneration von gut dimensionierten Einzelsonden zwar nur einen geringen Vorteil von etwa 0,1 bis 0,2 in der Jahresarbeitszahl (JAZ) bringt, Systeme mit unterdimensionierten Sonden aber durchaus von solarer Wärme profitieren. Wird eine Erdwärmesonde zu stark belastet, so kühlt das umgebende Erdreich aus. Dies führt zu einer sinkenden Sondenaustrittstemperatur und somit zu geringen JAZ. Die Regeneration mit solarer Wärme kann in diesem Fall die JAZ um bis zu 0,5 erhöhen. Deutlich andere Ergebnisse zeigen sich bei Erdwärmesondenfeldern. Auch bei großen Sondenabständen von 10 m bis 20 m, sinkt die JAZ über 20 Jahre stark ab. Schon die Regeneration mit der sommerlichen Überschusswärme aus einer kleinen Solarkollektorfläche (6 m²) kann diesen langfristigen Auskühleffekt nahezu unterdrücken [2]. Ein Vergleich von Simulations- und Messergebnissen zeigt außerdem, dass das dynamische Verhalten von Erdwärmesonden, verursacht durch den Fluidinhalt, in bisherigen Modellen keine Berücksichtigung findet. Dies führt in Simulationen zu einer deutlichen Unterschätzung der Jahresarbeitszahl.

Erste Ergebnisse der solaren Regeneration von EWK finden sich bei Achberger et al. [3]. Als solare Wärmequelle wird dort ein spezieller Dachkonvektor genutzt. An einer Pilotanlage wurde demonstriert, dass der regenerierte EWK im Vergleich zu einem Referenzsystem ohne Regeneration etwa 50% kleiner dimensioniert werden kann, wobei gleichzeitig ein um 10% reduzierter Stromverbrauch erreicht wurde. Dieser Ansatz wird auch in einem weiteren Projekt des ISFH verfolgt [4]. In einem Sonnenhaus kommt eine kombinierte Nutzung von direkter Solarwärme und solar unterstütztem EWK-Wärmepumpensystem zur Anwendung. Dabei zeigte die Dimensionierung, dass die vorhandenen EWK-Modelle entweder zu stark vereinfacht sind oder sich nicht für die Integration in Systemsimulationsprogramme wie TRNSYS eignen.

3. Projektziele

Das aktuelle Projekt knüpft an diese Erkenntnisse an. EWK besitzen im Gegensatz zu Erdwärmesonden keine Beschränkungen hinsichtlich der Erdreichteintrittstemperatur. Das Gefrieren des Bodens ist deshalb durchaus üblich und stellt eine zusätzliche Wärmekapazität dar, die effektiv durch Solarkollektoren beladen werden kann. Ziel des Projekts ist es, das Potential dieser solaren Regeneration aufzuzeigen und damit eine signifikante Reduzierung der EWK-Fläche gegenüber nicht regenerierten und

konventionell dimensionierten Systemen zu erreichen. Dies soll die Attraktivität von EWK-Wärmepumpensystemen in Ein- und Mehrfamilienhäusern erhöhen.

Um die Umsetzbarkeit eines solchen Konzepts nachzuweisen sind detaillierte Simulationsstudien notwendig. Zunächst muss dafür ein geeignetes EWK-Modell unter Berücksichtigung der Bodenvereisung erstellt werden. Weiterhin wird eine Experimentalanlage aufgebaut und systematisch vermessen. Die Messungen dienen dann zum einen der Validierung des Modells, zum anderen kann das Verhalten von EWK unter starker Belastung ermittelt werden. Schließlich sollen die Ergebnisse in Form vereinfachter Dimensionierungsregeln bzw. eines Auslegungstools verbreitet werden, um die Planung solar regenerierter EWK zu vereinfachen.

4. Erdwärmekollektormodell

In der Literatur existieren zahlreiche numerische und analytische Modelle zur Berechnung von Erdwärmekollektoren [5], [6], [7]. Um allerdings den Anforderungen einer Systemsimulation in TRNSYS mit vergleichsweise geringen Zeitschritten gerecht zu werden und dynamische Effekte in ausreichender Genauigkeit abzubilden, ist die Programmierung eines neuen Modells notwendig. Im Gegensatz zu den vorhandenen Modellen soll dabei das Fluidvolumen als Wärmekapazität abgebildet werden. Ferner wird im Projekt untersucht welchen Einfluss die Randeffekte und Zuleitungen von EWK-Feldern haben, um diese gegebenenfalls in das Modell zu integrieren. Im Folgenden sind die Grundannahmen des Modells dargestellt.

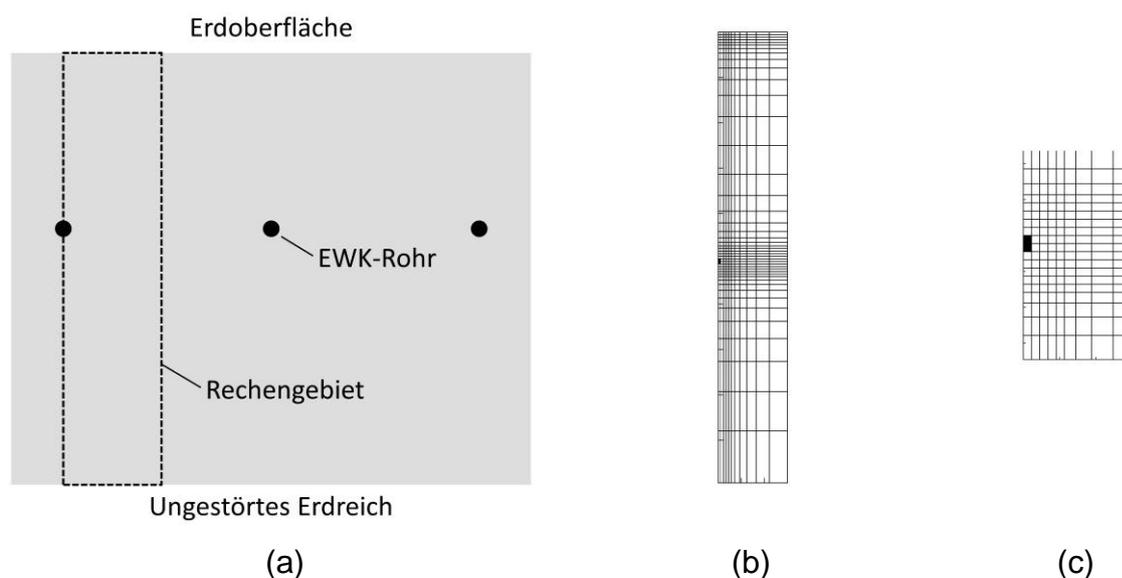


Abbildung 1 (a):Rechengebiet (b):Netz (c): Detail des Netzes im Bereich um das Rohr

Eine wichtige Vereinfachung ist die Beschränkung der Wärmeleitung im Erdreich auf ein zweidimensionales Rechengbiet. Erste Simulationen mit einer quasi-dreidimensionalen Erweiterung in Form einer Aneinanderreihung von zweidimensionalen Modellen zeigen, dass diese Vereinfachung für übliche Volumenströme nur zu sehr geringen Abweichungen führt.

In Abbildung 1 ist das Rechengbiet und das räumliche Rechengitter dargestellt. Das Rechengbiet bildet den Bereich von der Mitte eines Kollektorrohres bis zur Mitte zwischen zwei benachbarten Rohren ab. An den seitlichen Rändern werden damit Symmetrierandbedingungen angesetzt (adiabat). Abweichend davon gilt für die an das Rohr grenzenden Elemente eine Randbedingung 3. Art. Aus einer differentiellen Energiebilanz folgt zunächst:

$$T_{out} = T_{Erde} - \frac{T_{Erde} - T_{in}}{\exp\left(\frac{kA}{\dot{m}c_p}\right)} \quad (1)$$

Mit den Ein- und Austrittstemperaturen T_{out} und T_{in} , der Erdreichtemperatur T_{Erde} , dem Wärmedurchgangskoeffizient k , der das Rohr umschließenden Fläche A sowie dem Kapazitätsstrom $\dot{m}c_p$. Damit kann der Wärmestrom je Element berechnet werden:

$$\dot{q}_{Rohr} = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{2n l_{Rohr}} \quad (2)$$

Wobei l_{Rohr} die Gesamtlänge des Rohrs und n die Anzahl der an das Rohr grenzenden Elemente ist. Für das hier vorgestellte Modell gilt $n = 4$, da das halbe Rohr durch zwei Elemente abgebildet wird, welche an vier Elemente im Rechengbiet grenzen. Die Randbedingungen am oberen Rand ergeben sich aus dem konvektiven Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft und der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Am unteren Rand wird die Temperatur des ungestörten Erdreichs als zeitlich veränderliche Funktion angesetzt.

Das Modell berücksichtigt zudem Eisbildung durch einen Algorithmus, welcher einen idealisierten Phasenwechsel bei 0°C abbildet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 für ein homogenes Starttemperaturfeld von $T(x, y) = 1^\circ\text{C}$, und eine spezifische Wärmeentzugsleistung von $\dot{q} = 33 \text{ W/m}^2$ mit einer anschließenden Wärmezufuhr von $\dot{q} = -33 \text{ W/m}^2$ dargestellt.

Die Erdreichparameter sind aus [6] für einen lehmigen Boden in Klimazone 3 entnommen. Die Wärmediffusivität (Temperaturleitfähigkeit) von gefrorenem Boden ist deutlich höher (typisch ca. 50 %) als bei ungefrorenem Boden. Dies führt dazu, dass die Abnahme des Eises bei gleicher Wärmeleistung in kürzerer Zeit als die Eisbildung erfolgt.

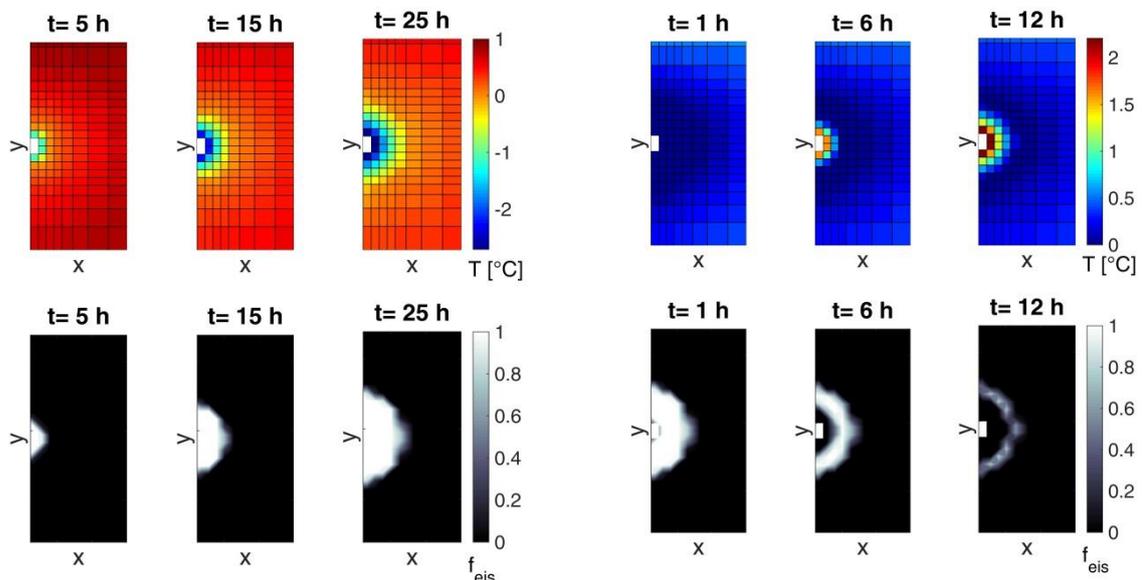


Abbildung 2: Temperaturfeld T (oben) und Eisanteil f_{eis} (unten) bei Wärmeentzug (linke Hälfte) und Wärmezufuhr (rechte Hälfte). Die Kantenlänge des kleinsten Elements beträgt ca. 11 mm, was einem Rohraußendurchmesser (weiß dargestellt) von $d_a=32\text{mm}$ entspricht.

5. Experimentalanlage

Um eine Validierung des Modells zu ermöglichen wird auf dem Gelände des ISFH in Emmerthal eine Experimentalanlage mit einer EWK-Fläche von 150 m^2 installiert. Wärmeentzug und –zufuhr werden durch eine Wärmepumpe in Kombination mit einem Heizstab realisiert. Dabei dient der Heizstab zum einen zur Modulation der Entzugsleistung, zum anderen kann er den Solarkollektor nachbilden. Um den Einfluss der Zuleitungen zu bestimmen, werden sowohl Leitungen mit als auch ohne Isolation verlegt. Der EWK besteht aus 4 Strängen à 60 m PE-Rohr, die optional zu 2 Strängen à 120 m verschaltet werden können. Diese Schaltung bietet die Möglichkeit, unabhängig vom Massenstrom, den Einfluss der Strömungsform im Rohr (laminar/turbulent) auf die Wärmeübertragungsleistung zu untersuchen.

Das Temperaturfeld im Erdreich wird in verschiedenen Tiefen durch Pt100-Sensoren und in der Ebene des EWK zusätzlich durch Lichtwellenleiter erfasst. Eine separate Messstelle im ungestörten Erdreich dient dabei als Referenzpunkt. Um auch den Ein-

fluss der Bodenfeuchte auf die Wärmeübertragungseigenschaften des Erdreichs zu klären, werden sowohl im Bereich des EWK als auch im ungestörten Erdreich Feuchtesensoren eingebracht. Zusätzlich werden Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung gemessen.

6. Simulationsstudien

Mit der Validierung des Modells wird der Ausgangspunkt für detaillierte Simulationsstudien geschaffen. Im Fokus stehen Heizungssysteme für Ein- und Mehrfamilienhäuser unterschiedlicher Dämmstandards. Dabei sind verschiedene Systemschaltungen denkbar. Die solare Wärme kann ausschließlich zur Regeneration des EWK genutzt werden oder der Wärmepumpe als zweite Quelle zur Verfügung stehen. Eine mögliche Konfiguration, wie sie vom ISFH bereits in anderen Projekten, jedoch für Erdwärmesonden, Anwendung fand, ist in Abbildung 3 zu sehen [8]. Dabei wird wahlweise ein unabgedeckter Kollektor oder ein PVT-Kollektor als solare Wärmequelle genutzt.

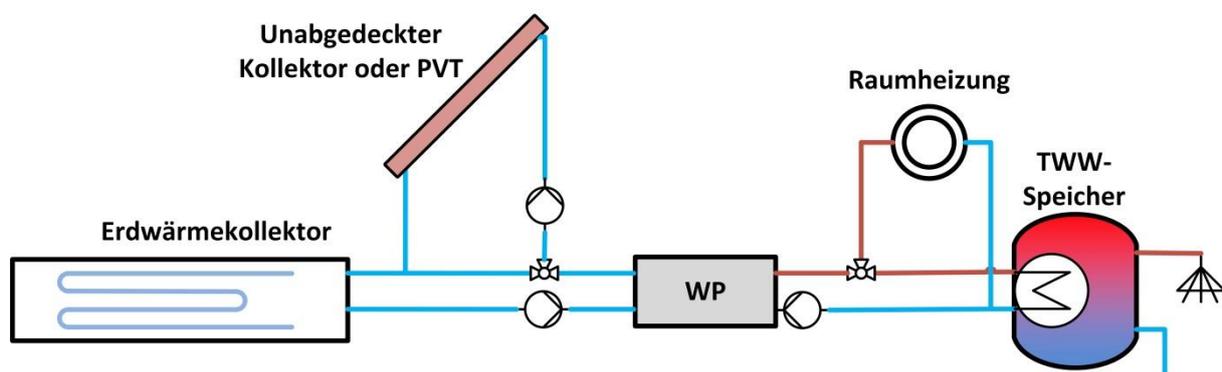


Abbildung 3: Einbindung eines Solarkollektors zur ausschließlichen Regeneration des EWK

Weitere Möglichkeiten stellen Systeme mit Flachkollektoren dar, die zur Trinkwarmwasserbereitung oder Heizungsunterstützung eingebunden sind. Hier sind komplexere Regelkonzepte notwendig, um ein sinnvolles Umschalten zwischen direkter Nutzung und Regeneration sicherzustellen, da die Temperaturniveaus der Senken Erde und Speicher sich deutlich unterscheiden [9].

Durch eine Variation der EWK- und der Solarkollektorfläche sollen die Simulationen sinnvoll dimensionierte Systeme aufzeigen und dabei insbesondere die Frage klären, welche Dimensionierung für regenerierte EWK minimal erforderlich ist. Die Ergebnisse können später wiederum Grundlage für weitere Versuche sein. So ist geplant, kri-

tische Betriebszustände aus den Simulationen über mehrere Tage oder Wochen experimentell nachzubilden.

7. Zusammenfassung

Ausgehend von vielversprechenden Ansätzen zur solaren Regeneration von Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren (EWK), stellt der Beitrag ein laufendes Projekt zur Untersuchung der Kombination von Solarthermie und EWK vor. Ziel des Projekts ist es, Wärmepumpensysteme mit deutlich reduzierter EWK-Fläche (mindestens 50% gegenüber einer üblichen Dimensionierung) sicher planbar zu machen. Dafür sind umfangreiche Simulationsstudien und Experimente geplant. Im Beitrag werden erste Ansätze eines neuen EWK-Modells gezeigt, welches sich für Systemsimulationen eignet und neben Eisbildung auch die Wärmekapazität des Fluidvolumens abbildet. Mit Hilfe der ebenfalls vorgestellten Experimentalanlage soll das Modell validiert und anschließend in Systemsimulationen eingebunden werden. Der Fokus der geplanten Simulationsstudien liegt dabei auf Systemen mit unabgedeckten Flachkollektoren oder PVT-Kollektoren für Ein- und Mehrfamilienhäuser.

Conclusion

Ground coupled heat pump systems are drawing interest as part of a sustainable heat supply. Due to their space requirement, horizontal ground heat exchangers (HGHX) are not as common as borehole heat exchangers. However, they have certain advantages (e.g. in installation effort) compared to borehole heat exchangers. A current project at ISFH aims to investigate the solar thermal regeneration of HGHX. In order to minimize the space required for HGHX, experiments as well as system simulations in TRNSYS will be carried out. Therefore a new HGHX-model need to be created to fulfill requirements in time step and accuracy of dynamic effects. The objective is to reduce the space required by at least 50% compared to non-regenerated systems for single- and multi-family houses.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“, Kurzbezeichnung „Terra-Solar-Quelle“, wird mit Mitteln des Bundesministeri-

ums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 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.

Quellenverzeichnis

- [1] PÄRISCH, PETER ; BERTRAM, E. ; TEPE, R.: Experimente und Modellvalidierung für die Erdsondenregeneration mit Solarwärme. In: Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie. Neumarkt, 2013
- [2] TEPE, RAINER ; PÄRISCH, PETER ; MERCKER, OLIVER ; BERTRAM, ERIK ; ARNOLD, OLIVER ; ROCKENDORF, GUNTER: Hocheffiziente Wärmepumpensysteme mit Geothermie- und Solarthermienutzung - Rückblick auf 3 Jahre Forschung und Entwicklung. In: OTTI Solarthermie. Bad Staffelstein, 2014
- [3] ACHBERGER, WERNER ; LUDWIG, MATTHIAS ; STIEFENHOFER, WALDEMAR: Optimierung der Energieflüsse zwischen Geothermie und Solarthermie. In: EnOB Symposium. Essen, 2014
- [4] GLEMBIN, JENS ; BÜTTNER, CHRISTOPH ; STEINWEG, JAN ; ROCKENDORF, GUNTER ; RUDOLPH, N ; RUST, J: Verbrauchen geht vor Speichern - Sonnenhäuser mit Bauteilaktivierung und kleinem Pufferspeicher. In: OTTI Solarthermie. Bad Staffelstein, 2014
- [5] MEI, V. C.: Horizontal ground-coil heat exchanger: Theoretical and experimental analysis. Oak Ridge : Oak Ridge National Laboratory, 1986
- [6] RAMMING, KLAUS: Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle, TU Dresden, 2007
- [7] GLÜCK, BERND: Simulationsmodell Erdwärmekollektor zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-/Kältespeichern
- [8] BERTRAM, ERIK ; KIRCHNER, MAIK ; ROCKENDORF, GUNTER ; STEGMANN, MARTIN: Solarthermie2000plus: Solare Gebäudewärmeversorgung mit unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Erdsonden und Wärmepumpen für 100% Deckungsanteil (Abschlussbericht) : ISFH, 2011
- [9] PÄRISCH, PETER ; ARNOLD, OLIVER ; BERTRAM, ERIK ; TEPE, RAINER ; ROCKENDORF, GUNTER: 5 Regelungskonzepte für die parallel/serielle Einbindung von Solarkollektoren von erdgekoppelte Wärmepumpensysteme. In: OTTI Solarthermie. Bad Staffelstein, 2014