

Erdwärmekollektoren in Kombination mit Solarkollektoren als Quelle für Wärmepumpensysteme

Hauke Hirsch, Fabian Hüsing, Gunter Rockendorf
Institut für Solarenergieforschung Hameln, Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal
Tel.: 05151/999-646
E-Mail:hirsch@isfh.de
Internet:www.isfh.de

1 Einleitung

Wärmepumpen zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung werden, nicht zuletzt aufgrund aktueller klimapolitischer Entwicklungen, zur Deckung des Wärmebedarfs in einem zunehmend regenerativen Energiesystem unverzichtbar. Bisher kommen allerdings überwiegend Luft/Wasser-Wärmepumpen mit insbesondere bei niedrigen Lufttemperaturen geringerer Effizienz zum Einsatz. Erdreichgekoppelte Wärmepumpen deren Effizienz im Jahresmittel ca. 30% höher ist, werden hingegen in den letzten Jahren vergleichsweise immer weniger installiert [1], [2]. Dies ist vor allem auf den relativ hohen Installationsaufwand sowie die gesetzlichen Beschränkungen bzw. behördlichen Auflagen zurückzuführen. So wird die Installation und der Betrieb von Erdwärmesonden (EWS) etwa aus Gründen des Wasserschutzes beschränkt, während der Einsatz von horizontalen Erdwärmekollektoren (EWK) oft an der Verfügbarkeit geeigneter Flächen scheitert.

Ziel eines am ISFH laufenden Projekts, welches in Kooperation mit dem Bundesverband Wärmepumpe und der tewag GmbH durchgeführt wird, ist es, durch die Kombination horizontaler EWK mit Solarkollektoren, die benötigte Fläche von Erdwärmekollektoren um mindestens 50% zu verringern. Damit sollen die Möglichkeiten zum Einsatz erdreichgekoppelter Wärmepumpen verbessert werden.

Ergebnisse aus bisherigen Projekten mit Wärmepumpensystemen am ISFH zeigen, dass insbesondere Systeme mit unterdimensionierten Erdwärmesonden stark von einer Regeneration durch Solarwärme profitieren (siehe z. B. [3], [4]). Gründe hierfür sind einerseits die Erhöhung der mittleren Quellentemperatur und andererseits die Vermeidung einer langfristigen Auskühlung der Quelle. EWK besitzen bezüglich der solaren Regeneration bzw. Speicherung zudem gegenüber Erdwärmesonden den Vorteil, dass sie bei deutlich niedrigeren Temperaturniveaus betrieben werden können und somit die latente Wärme infolge des Phasenwechsels bei der Eisbildung im Erdreich nutzbar wird. Die praktische Anwendung der Kombination eines EWK mit

solarer Regeneration wurde bereits von Achberger et al. [5] erfolgreich untersucht. Für das dort verwendete System konnten sie feststellen, dass ein solar regenerierter EWK mit einer deutlich reduzierten Fläche auskommt. Die Ergebnisse bleiben allerdings auf die dabei verwendeten Komponenten und das untersuchte Gebäude beschränkt. Der Einfluss wesentlicher Auslegungsparameter des EWK unter verschiedenen Witterungseinflüssen und Gebäudelasten auf die Effizienz eines Wärmepumpensystems ist weder für solar-regenerierte noch für konventionelle EWK bisher ausreichend untersucht worden.

In einem ersten Schritt werden deshalb zunächst die Grenzen der Auslegung konventioneller EWK ermittelt. Es kommen dabei Systemsimulationen in TRNSYS zur Anwendung, welche auf einem am ISFH entwickelten und experimentell validierten Erdwärmekollektormodell basieren.

2 Erdwärmekollektormodell

2.1 Modellbeschreibung

Im Rahmen des Forschungsprojekts ist am ISFH ein Erdwärmekollektormodell für TRNSYS (Type 710) entwickelt worden. Ähnliche Modelle finden sich u.a. bei Ramming [6] und Glück [7]. Das hier vorgestellte Modell unterscheidet sich von diesen durch eine feinere räumliche Diskretisierung, die Berücksichtigung von Randeffekten, die Abbildung der Fluidkapazität sowie der rechenzeitoptimierten Integration in TRNSYS. Das Modell basiert auf der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung (Gl. 1) für das Erdreich und einer instationären Energiebilanz für das Wärmeübertragerfluid (Gl. 2). Die Gleichungen werden jeweils mit einem expliziten Finite-Differenzen-Verfahren gelöst.

$$\frac{\partial T_E}{\partial t} = \frac{\lambda_E}{\rho_E c_E} \left(\frac{\partial^2 T_E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_E}{\partial y^2} \right) + \dot{q}_{fl} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\left(\frac{\partial T_{fl}}{\partial t} + v_{fl} \frac{\partial T_{fl}}{\partial x} \right) = \frac{4k(T_E - T_{fl})}{d_{rohr} \rho_{fl} c_{fl}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Dabei ist T_E die Erdreichtemperatur, T_{fl} die Fluidtemperatur, λ_E, ρ_E, c_E und ρ_{fl}, c_{fl} die Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität des Erdreichs bzw. des Fluids, v_{fl} die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, d_{rohr} der Außendurchmesser des Rohrs und k der Wärmeübergangskoeffizient.

Die Wärmeleitung im Erdreich kann, wie in Abbildung 1 gezeigt, durch zwei unterschiedliche Rechengebiete abgebildet werden, deren seitliche Ränder jeweils adiabat sind. Rechengebiet A beinhaltet ein halbes Rohr und entspricht in seiner Breite dem halben Rohrabstand. Es wird somit der innere symmetrische Teil eines EWK 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. Allerdings findet dabei keine Wärmeleitung zwischen den verschiedenen Rechengebieten statt.

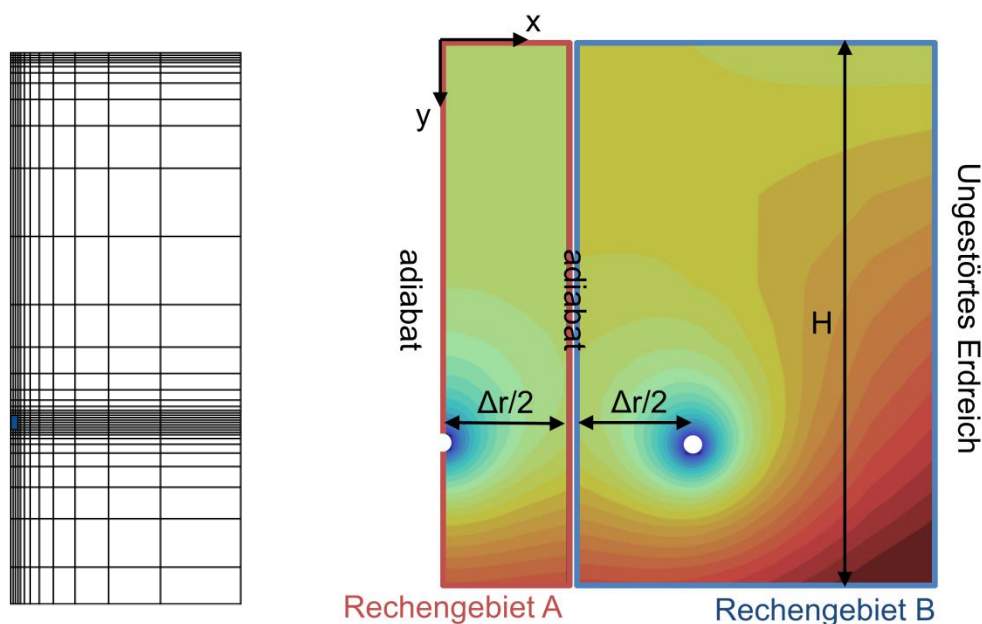


Abbildung 1: Rechengitter für Rechengebiet A (links), Position der Rechengebiete A und B relativ zum EWK-Rohr im Erdreich (rechts)

Die weiteren Randbedingungen für beide Rechengebiete lauten für den unteren Rand

$$T_E(y = H) = \bar{T}_{amb} \quad (\text{Gl. 3})$$

und für den oberen Rand

$$\lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial y}(y = 0) = \dot{q}_{surf} \quad (\text{Gl. 4})$$

Dabei ist \bar{T}_{amb} der Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur, H die Gesamthöhe des Rechengebiets und \dot{q}_{surf} der Wärmestrom an der Oberfläche, welcher sich aus Globalstrahlung, IR-Strahlung und Konvektion ergibt. Um im Modell auch den Gefriervorgang im Erdreich zu berücksichtigen, wird die Wärmekapazität des

Erdreichs in einem festgelegten Temperaturbereich $T_1 < T < T_2$ durch eine Gaußsche Normalverteilung so angenähert, dass für die Schmelzenthalpie des Bodens gilt:

$$\int_{T_1}^{T_2} c_E(T) dT = h_E \quad (\text{Gl. 5})$$

Das Rechengitter ist, wie in Abbildung 1 zu sehen, an der Erdoberfläche und am Rohr feiner diskretisiert und weitet sich in Richtung des ungestörten Erdreichs auf. Es hat sich gezeigt, dass der Diskretisierungsfehler, insbesondere während der Eisbildung, erst ab einer Gitterbreite von ca. 5 mm im Bereich um das Rohr vernachlässigbar ist.

2.2 Experimentelle Validierung

Um das EWK-Modell zu validieren wurde am ISFH eine Experimentalanlage errichtet. Diese umfasst u.a. einen 150 m^2 großen EWK, eine Wärmepumpe und einen Heizstab. Durch die Kombination aus Wärmepumpe und Heizstab kann Wärme mit verschiedenen Leistungen sowohl zu- als auch abgeführt werden.

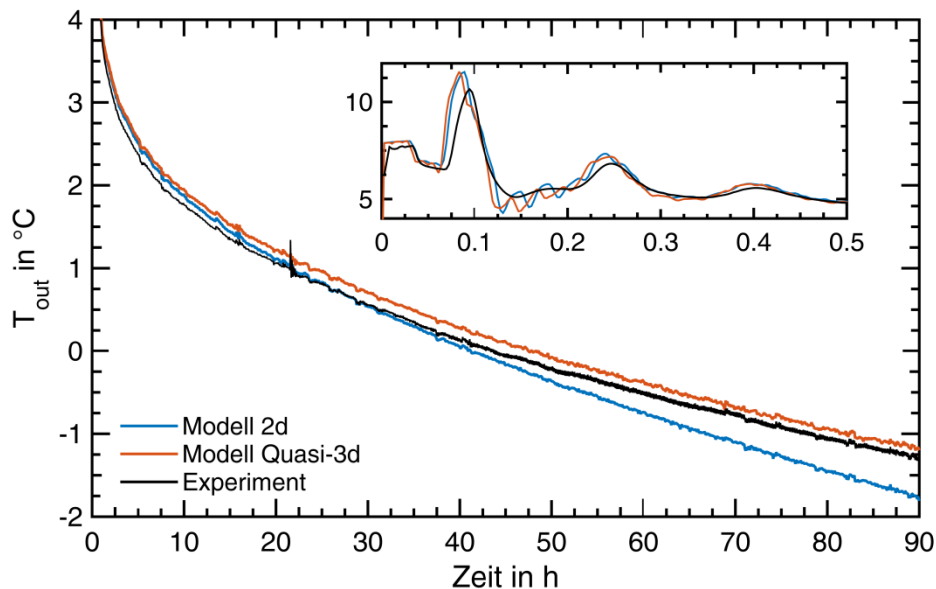


Abbildung 2: Austrittstemperatur des EWK im Experiment im Vergleich mit dem 2d- und dem Quasi-3d-Modell

Neben den Ein- und Austrittstemperaturen an EWK und Wärmepumpe sowie dem Volumenstrom, wird auch die Erdreichtemperatur in verschiedenen Tiefen und horizontalen Abständen gemessen. Weiterhin werden an der Oberfläche Globalstrahlung, Infrarotstrahlung, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit erfasst.

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 2 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 konstante Abweichung von ca. 0,2 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 in guter Näherung vorhersagen. Dies wird durch die Verwendung der instationären Energiebilanz (Gl. 2) erreicht, welche die Strömung im Rohr als eindimensionale Kolbenströmung annähert.

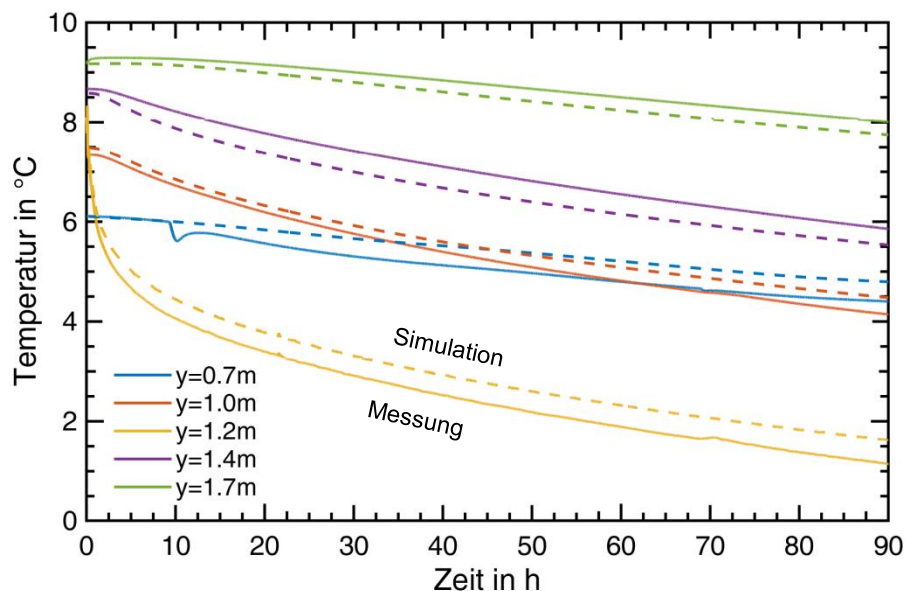


Abbildung 3: Vergleich der Messwerte (durchgezogen) und Simulationsergebnisse (gestrichelt) der Erdreichtemperaturen an verschiedenen vertikalen Abständen von der Erdoberfläche. Das Rohr befindet sich bei $y=1,2$ m.

Den Vergleich zwischen simulierter und gemessener Erdreichtemperatur zeigt Abbildung 3. Die Erdreichtemperatur ist in verschiedenen vertikalen Abständen über bzw. unter dem Rohr ($y=1,2$ 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.

3 Systemsimulationen

Um die Auswirkungen der Dimensionierung des EWKs auf die Effizienz erdreichgekoppelter Wärmeversorgungs-systeme untersuchen und bewerten zu können, wird am ISFH ein System-Simulationsmodell aufgebaut. In der Simulationsumgebung TRNSYS [8] werden dafür die Energieerträge und -bedarfe eines Einfamilienhauses und seiner Wärmeversorgungs-systeme witterungsabhängig im Jahresgang berechnet und bilanziert.

3.1 Randbedingungen

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) [9]. Als weitere Randbedingung ist das Bewohnerverhalten (Wärmegewinne durch anwesende Personen und elektrische Geräte, Warmwasserzapfprofil, Lüftungsverhalten, etc.) gemäß Task 44 implementiert [10].

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 der Heizwärmebedarf etwa 18000 kWh/a, während auch hier ein Trinkwarmwasser-Energiebedarf von 2200 kWh/a besteht.

3.2 Systemkonfiguration

In Abbildung 4 ist das untersuchte Wärmeversorgungs-system schematisch dargestellt. 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 °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. Als Quelle der Wärmepumpe wird das in Abschnitt 2 vorgestellte EWK-Modell (TRNSYS-Type 710) genutzt. Es sind Dimensionierungen der EWK für verschiedene Bodenarten in Anlehnung an die aktuelle Entwurfsfassung von Blatt 2 der VDI 4640 bestimmt worden [11]. Für den Standort Zürich haben wir die in der Richtlinie aufgeführten Werte der angrenzenden deutschen Klimazone 13 verwendet.

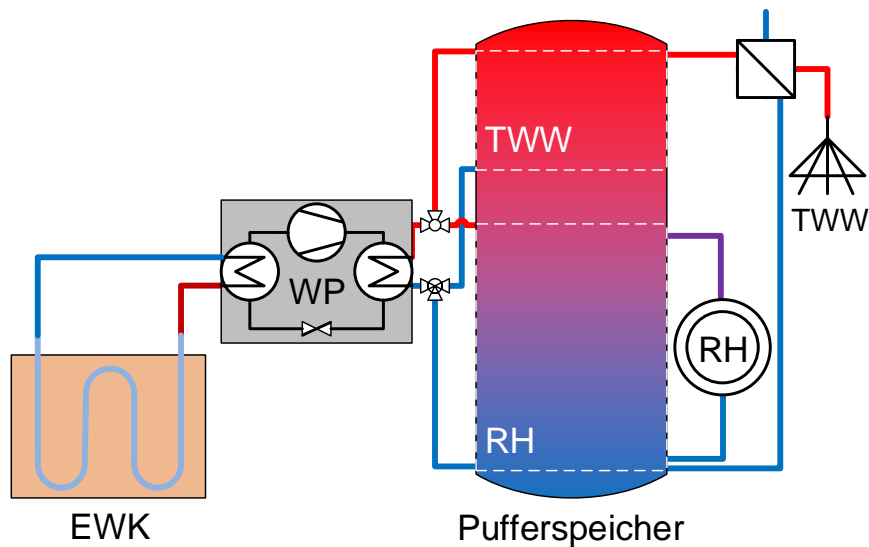


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Wärmeversorgungssystems

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der verwendeten Bodenarten aufgeführt. Die gewählten Bodenarten stellen eine Abschätzung der Bandbreite der unter realen Bedingungen anzutreffender Bodeneigenschaften dar.

Tabelle 1: Parameter der verwendeten Bodenart

Bodennummer		1	2	3
Bodenart		Lehmiger Sand	Sandiger Ton Lehm	Sandiger Ton
Wassergehalt	m^3/m^3	14 %	27 %	37 %
Wärmeleitfähigkeit ungefroren	W/mK	1,18	1,61	1,9
Wärmeleitfähigkeit gefroren	W/mK	1,12	2,15	2,88
Wärmekapazität ungefroren	J/kgK	840	1000	1330
Wärmekapazität gefroren	J/kgK	770	860	1100
Rohdichte	kg/m^3	1515	1536	1820
Schmelzenthalpie	J/kg	30627	58259	67378

Tabelle 2 zeigt die in Anlehnung an VDI 4640-2 ermittelten EWK-Dimensionierungen. Für die Dimensionierung haben wir die Entzugsleistungen und -arbeiten der verwendeten Wärmepumpen (SFH45: 7 kW bzw. SFH100: 13 kW Heizleistung) herangezogen. Die Leistungsdaten der kommerziell erhältlichen 7 kW-Wärmepumpe wurden von Pärisch et al. [12] am ISFH experimentell ermittelt. Weiterhin wurde die realitätsnahe Abbildung des Verhaltens unter verschiedenen Betriebsbedingungen in TRN-SYS bei Verwendung von Type 401 validiert [13].

Tabelle 2: Gewählte Dimensionierung der Erdwärmekollektoren in Anlehnung an VDI 4640

Bodennummer		1	2	3
SFH 45				
Rohrlänge eines Kollektorkreises	m	90	90	90
Anzahl Kollektorkreise	-	7	5	5
Verlegeabstand der Kollektorrohre	m	0,6	0,65	0,65
Erdwärmekollektorfläche	m ²	378	292,5	292,5
SFH 100				
Rohrlänge eines Kollektorkreises	m	90	90	90
Anzahl Kollektorkreise	-	14	10	9
Verlegeabstand der Kollektorrohre	m	0,6	0,65	0,65
Erdwärmekollektorfläche	m ²	756	585	526,5

3.3 Ergebnisse

Im ersten Abschnitt der Untersuchungen wird der Einfluss wesentlicher Dimensionierungsgrößen des EWKs auf das Verhalten des Wärmeversorgungssystems betrachtet. Dazu werden unter verschiedenen Randbedingungen (Gebäude- und Bodenart) jeweils die verlegte Kollektorrohrlänge und der Verlegeabstand variiert. Ausgehend von den in Tabelle 2 beschriebenen Referenzdimensionierungen werden Verkleinerung und Vergrößerung der Kollektorrohrlänge und des Verlegeabstands betrachtet.

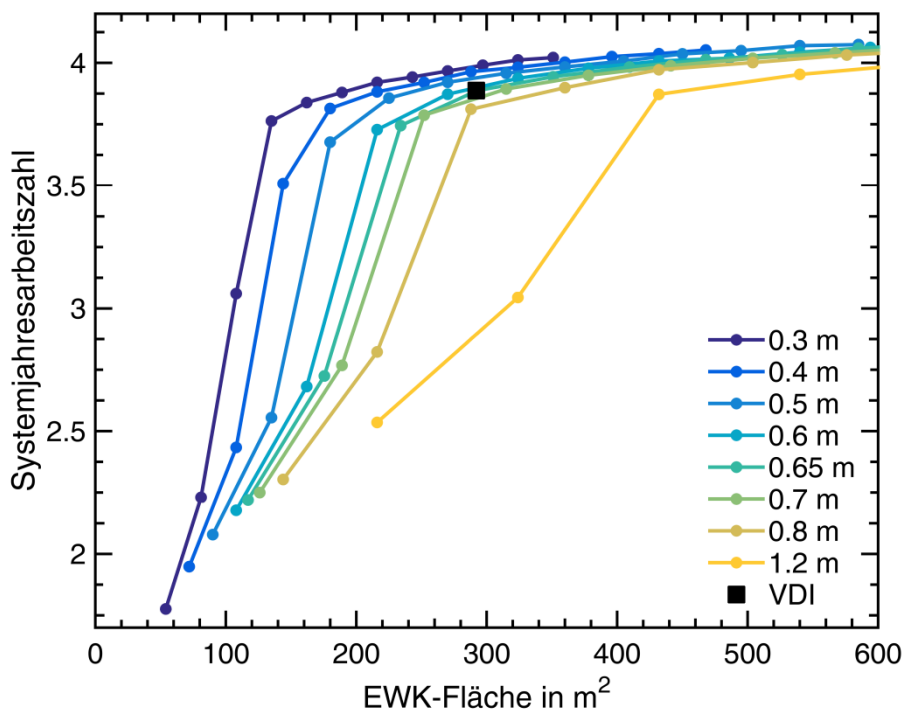


Abbildung 5: Systemjahresarbeitszahl für verschiedene Verlegeabstände über der EWK-Fläche bei Verwendung des Gebäudes SFH45 und Boden 2

Wesentliche Kenngrößen zur Bewertung der Effizienz der untersuchten Konfigurationen sind der elektrische Nachheizbedarf, die Systemjahresarbeitszahl (JAZ_{Sys}) und die energetisch gemittelte Verdampfertemperatur. Die Systemjahresarbeitszahl ist das Verhältnis aus zur Deckung des Bedarfs bereitgestellter Wärme zur Summe der innerhalb Wärmeezeugungssystem aufgewendeten elektrischen Energie.

Abbildung 5 zeigt die JAZ_{Sys} des modernen Gebäudes (SFH45) für Boden 2 in Abhängigkeit der EWK-Fläche für verschiedene Verlegeabstände. Für die Referenzdimensionierung (VDI) wird eine JAZ_{Sys} von 3,89 erreicht. 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 Effizienzverluste hinnehmen zu müssen. Inwiefern solche geringen Verlegeabstände zu problematischen Frostzuständen bzw. Vegetationsverzögerungen führen, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen am ISFH. Unterhalb einer kritischen EWK-Fläche nimmt die Systemjahresarbeitszahl dann stark ab, was auf den zunehmenden Heizstabeinsatz zurückzuführen ist.

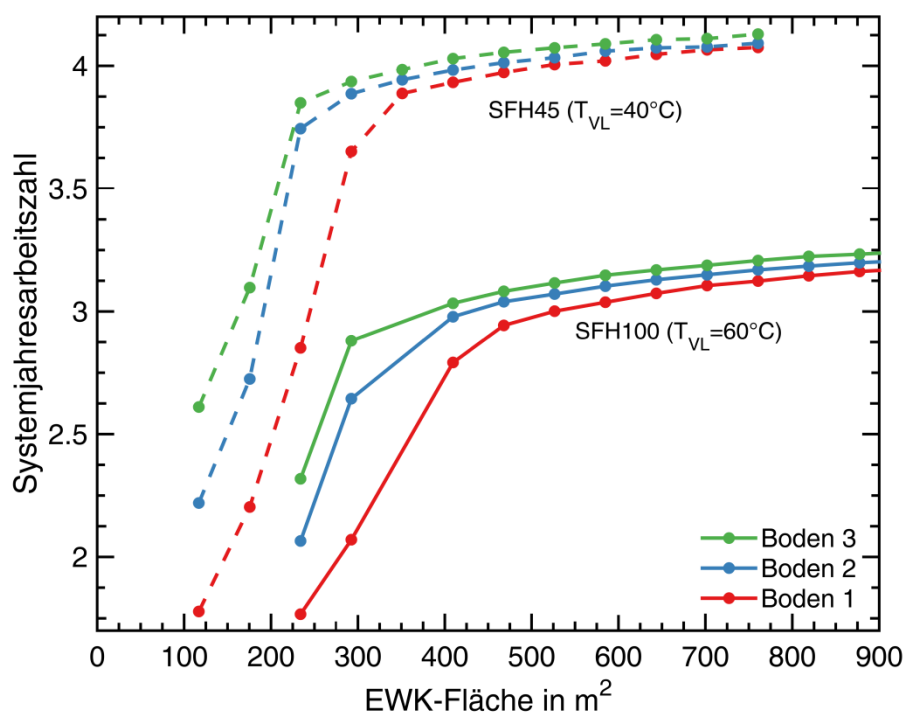


Abbildung 6: Systemjahresarbeitszahl für verschiedene Bodenarten und Heizlasten über der EWK-Fläche bei Verwendung eines festen Verlegeabstands von 0.6 m

In Abbildung 6 ist die JAZ_{Sys} für verschiedene Bodenarten und Gebäudetypen über der EWK-Fläche dargestellt. Das Bestandsgebäude (SFH100) erreicht 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 unterschied-

lichen Heizsysteme (höhere Auslegungs-Heizungsvorlauf­temperatur von 60 °C (SFH100) gegenüber 40 °C (SFH45)) und folglich ungünstigere Betriebspunkte der Wärmepumpe zurückführen. Dennoch ist der vorhergehend diskutierte Kurvenverlauf auch hier über ein breites Spektrum an Randwerten zu erkennen und kann somit als charakteristisch für ein EWK-basiertes Wärmepumpenversorgungssystem bezeichnet werden. 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 7 zeigt den elektrischen Heizstabeinsatz und die energetisch gemittelte Verdampfer­temperatur in Abhängigkeit der installierten EWK-Fläche. Der bei geringen EWK-Flächen auftretende Nachheizbedarf erklärt die massive Verschlechterung der Systemjahresarbeitszahl bei unterschreiten einer minimalen Kollektorfläche. Die energetisch gemittelte Verdampfer­eintrittstemp­eratur (entspricht der EWK-Austrittstemp­eratur) steigt hingegen, ab Erreichen einer erschöpfungsfreien Konfiguration, degressiv mit zunehmender EWK-Fläche.

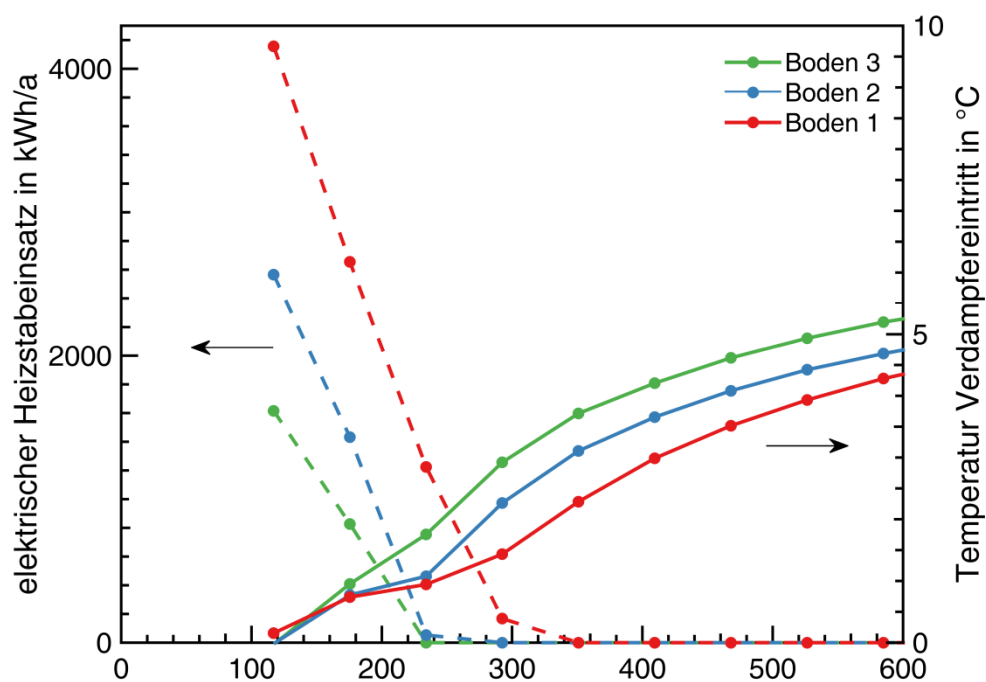


Abbildung 7: Elektrischer Heizstabeinsatz und energetisch gemittelte Verdampfer­temperatur für verschiedene Bodenarten über der EWK-Fläche bei Verwendung eines festen Verlegeabstands von 0.6 m für das Gebäude SFH45

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.

4 Aktuelle Untersuchungen

Die vorangegangenen Untersuchungen haben die Grenzen der Auslegung konventioneller Erdwärmekollektoren aufgezeigt. Um das Projektziel einer deutlichen Flächenreduktion von 50% ohne Einbußen in der Effizienz zu erreichen, scheint demnach eine solare Regeneration unerlässlich. Abbildung 8 zeigt die dafür geplante Systemkonfiguration. In aktuell laufenden Untersuchungen wird ein unabgedeckter Kollektor und alternativ ein PVT-Kollektor ausschließlich auf der Quellenseite der Wärmepumpe eingebunden.

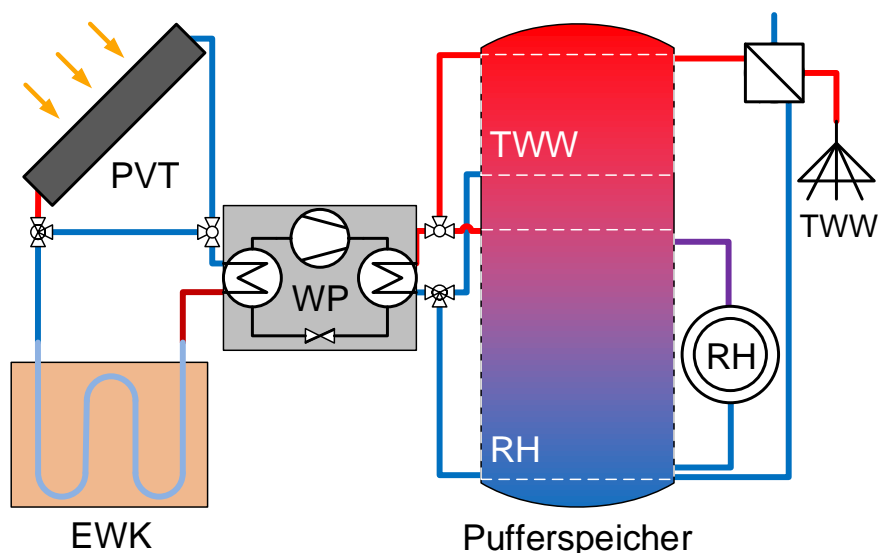


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Wärmeversorgungssystems mit solar-regeneriertem Erdwärmekollektor

Erfahrungen mit der solaren Regeneration von Erdwärmesonden zeigen, dass eine Reihenschaltung des Solarkollektors vor dem EWK sinnvoll ist. Damit werden zu hohe Verdampfereintrittstemperaturen vermieden, welche zu Hochdruckstörungen der Wärmepumpe führen können. Neben der Verkleinerung der Erdreichquelle soll die direkte Einspeisung solarer Wärme problematische Frostzustände und Vegetationsverzögerungen verhindern.

5 Zusammenfassung

Erdwärmekollektoren kommen im Vergleich zu anderen Wärmequellen für Wärmepumpensysteme aufgrund ihres hohen Flächenbedarfs relativ selten zum Einsatz. In

einem aktuell laufenden Forschungsprojekt am ISFH soll der Flächenbedarf deshalb durch die Kombination mit Solarkollektoren deutlich reduziert werden. Dazu ist zunächst ein neues Erdwärmekollektormodell für TRNSYS entwickelt worden, welches sowohl instationäre Effekte als auch Randeffekte und Eisbildung berücksichtigt. Dieses haben wir mit Messdaten aus einer eigens errichteten Versuchsanlage verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

Auf Grundlage des neu entwickelten Modells ist die Auslegung von Erdwärmekollektoren bei unterschiedlichen Verlegeabständen, Rohrlängen, Bodenarten und Wärmerversorgungssystemen 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 Verdampfertemperaturen, nur eine geringe Verbesserung der Systemjahresarbeitszahl. Im Vergleich mit der VDI-Auslegung, scheint es möglich, kleinere Flächen durch eine engere Verlegung zu erreichen. Eine weitere Flächenreduktion soll die solare Regeneration des Erdreichs bewirken. In aktuellen Untersuchungen wird dazu ein unabgedeckter Kollektor bzw. PVT-Kollektor auf der Quellenseite der Wärmepumpe eingebunden. Dieser speist Wärme direkt in das Erdreich ein.

6 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“ wurde (in Kooperation mit der Firma tewag-Technologie-Erdwärmearbeitsanlagen-Umweltschutz 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.

7 Quellen

- [1] M. Y. Haller und E. Frank, „Solarwärme & Wärmepumpen–Interpretation der Simulationen des IEA SHC Task 44/HPP Annex 38“, 24. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2014.
- [2] M. Miara, D. Günther, R. Langner, S. Helmling, und J. Wapler, „WP Monitor‘ Feldmessung von Wärmepumpenanlagen“, Fraunhofer ISE, Abschlussbericht, 06 2014.

- [3] P. Pärish, E. Bertram, und R. Tepe, „Experimente und Modellvalidierung für die Erdsondenregeneration mit Solarwärme“, in Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, Neumarkt, 2013.
- [4] R. Tepe, P. Pärish, O. Mercker, E. Bertram, O. Arnold, und G. Rockendorf, „Hocheffiziente Wärmepumpensysteme mit Geothermie- und Solarthermienutzung - Rückblick auf 3 Jahre Forschung und Entwicklung“, 24. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 2014.
- [5] W. Achberger, M. Ludwig, und W. Stiefenhofer, „Optimierung der Energieflüsse zwischen Geothermie und Solarthermie“, EnOB Symposium, Essen, 2014.
- [6] K. Ramming, „Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle“, Dissertation, TU Dresden, 2007.
- [7] B. Glück, „Simulationsmodell Erdwärmekollektor zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-/Kältespeichern“.
- [8] S. A. Klein, et al., und et al., „TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program“. University of Wisconsin - Solar Energy Laboratory.
- [9] R. Dott, M. Y. Haller, J. Ruschenburg, F. Ochs, und J. Bony, „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, 2012.
- [10] M. Y. Haller, R. Dott, J. Ruschenburg, F. Ochs, und J. Bony, „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.“ 2012.
- [11] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 4640 Blatt 2 Entwurf (Gründruck): Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“. Mai-2015.
- [12] P. Pärish, O. Mercker, J. Warmuth, R. Tepe, E. Bertram, und G. Rockendorf, „Investigations and model validation of a ground-coupled heat pump for the combination with solar collectors“, *Appl. Therm. Eng.*, Bd. 62, Nr. 2, S. 375–381, Jan. 2014.
- [13] P. Pärish, J. Warmuth, M. Kirchner, und R. Tepe, „Durchfluss- und Temperaturabhängigkeit von Wärmepumpen“. 23. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 2012.