GANZJÄHRIGE NUTZUNG VON ERDWÄRMESONDEN ZUM HEIZEN UND KÜHLEN VON GEBÄUDEN MIT REVERSIBLER WÄRMEPUMPE ODER KOMPRESSIONKÄLTEMASCHINE

Ruben Pesch, Mariela Cotrado, Maximilian Martin,
Dirk Pietruschka, Ursula Eicker
zafh.net-Zentrum für angewandte Forschung-nachhaltige Energietechnik,
Hochschule für Technik Stuttgart,
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
ruben.pesch@hft-stuttgart.de

ABSTRACT

Thermal utilization of subsurface soil by heat exchangers combined with a reversible heat pump is an innovative technique of saving energy in buildings. An effective usage of this technique can be achieved whenever there is an additional cooling or refrigeration load besides the conventional heating demand, e.g. in office buildings or supermarkets. In order to avoid a degradation of the soil temperature, a balanced relation in the thermal utilization of the soil as heat sink (cooling) and heat source (heating) is aspired. The influence of different operation modes (only heating, only cooling, heating and cooling in the seasonal change) to the temperature stability of the soil is investigated in a three-dimensional numerical simulation program.

KURZFASSUNG

Eine innovative Technik für die Einsparung von Energie in Gebäuden ist die thermische Nutzung des Untergrundes durch Erdreichwärmeübertrager in Kombination mit einer reversiblen Wärmepumpe. Eine effektive Anwendung findet diese Technik überall dort, wo neben der Wärmebereitstellung Kälte für die Klimatisierung von Räumen notwendig wird, also z.B. in Bürogebäuden oder Supermärkten. Um Temperaturdegradation des Erdreichs zu vermeiden, wird ein ausgewogenes Verhältnis in der thermischen Nutzung des Untergrundes als Wärmesenke (Kühlen) oder Wärmequelle (Heizen) angestrebt. Mit Hilfe eines dreidimensionalen, numerischen Simulationsprogramms wird der Einfluss unterschiedlicher Betriebsarten (nur Heizen, nur Kühlen, Heizen und Kühlen im jahreszeitlichen Wechsel) für die Temperaturstabilität des thermisch genutzten Untergrundes untersucht. Für den Anwendungsfall Kühlen wurden zusätzlich vergleichende Simulationen verschiedener Rückkühlarten (trockener Kühlturm, nasser Kühlturm und Geothermiefeld) von Kompressions-kältemaschinen durchgeführt.

EINLEITUNG

Der Primärenergiebedarf für die Gebäudebeheizung und -klimatisierung, hat einen Anteil von ca. 35,4% am Gesamtenergieverbrauch bundesweit [6]. Einspar-möglichkeiten im Gebäudebestand ergeben sich durch die Erhöhung des Dämmstandards der Außenhülle und der Nutzung energieeffizienter moderner Gebäudetechnik.

Durch höhere Dämmstandards wird sich der Heizwärmebedarf von Gebäuden in den nächsten Jahren stetig reduzieren. Die Klimatisierung, Beleuchtung und der für die Herstellung der Baumaterialien benötigte Energiebedarf fallen dann in der Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes stärker ins Gewicht.

Bereits heute erreicht der für die Klimatisierung von gewerblich genutzten Gebäuden benötigte Primärenergiebedarf einen Anteil von ca. 11% am Gesamtprimärenergiebedarf [9]. Die Klimatisierung dieser Gebäude erfolgt vorwiegend durch Kompressionskältemaschinen und seltener durch reversible Wärmepumpen, die über konventionell erzeugten Strom betrieben werden.

Der Anteil von Wärmepumpenanlagen an der Gebäudebeheizung beträgt in Deutschland zum heutigen Stand ca. 0,2% an der Wärmebereitstellung insgesamt, was einem Anteil von 2,3% der Wärme aus erneuerbaren Energieträgern entspricht [3].

Zum Einsatz kommen Luft-Luft-, Luft-Wasser-, Wasser-Luft-, Sole-Luft-, Wasser-Wasser- und Sole-Wasser-Systeme, von denen für die thermische Nutzung des Untergrundes nur die drei letzten Arten relevant sind.

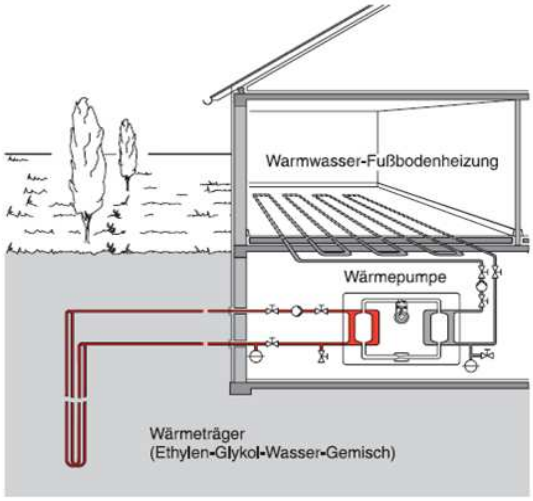

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Sondenanlage mit Wärmepumpe [8]

Neben dem Einsatz in Wärmepumpensystemen zu Heizzwecken (siehe Abbildung 1) findet oberflächennahe Geothermie in der Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden Verwendung. Hierbei ist das hohe Temperaturniveau des Sondenfluids von 15 bis 20°C der limitierende Faktor für die Nutzung der Geothermieanlagen im Sommer. Direkte Kühlung auf diesem Temperaturniveau beschränkt den Einsatz auf Flächenkühlsysteme (Wasser-Wasser/Sole-Wasser) oder Luftvorkühlung (Wasser/Sole-Luft). Eine interessante Anwendung für Erdsonden als sommerliche Wärmesenke ist der Ersatz hygienisch problematischer Rückkühlsysteme von konventionellen Kompressionskälteanlagen oder thermisch angetriebenen Absorptionskälteanlagen.

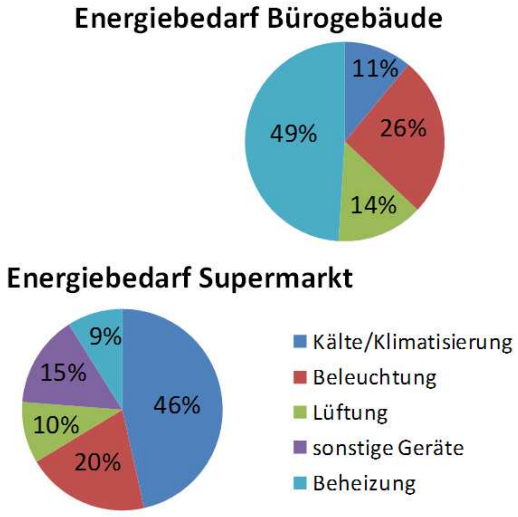

Abbildung 2: Energiebedarf Bürogebäude und Supermarkt [2], [7]&[9]

Zur Anwendung kommt diese Technik vor allem in Bürogebäuden und Supermärkten. Der Betrieb dieser beiden Gebäudetypen ist einerseits sehr energieintensiv, birgt dabei andererseits hohe Energieeinsparpotenziale.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, beträgt der Kühlbedarf eines durchschnittlichen Bürogebäudes 11% [9], bei einem typischen Supermarkt sind es sogar 46% [2], [7].
Da der Kühlbedarf in Deutschland in diesen und anderen Gebäudetypen weiter zunimmt, wird sich die klimatisierte Fläche pro Einwohner von 3 m² im Jahr 2000 auf 6 m² im Jahr 2020 verdoppeln [1].
Diese Tendenz zeichnete sich in Supermärkten bereits in den letzten Jahren ab. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach gekühlten Fertigprodukten und Tiefkühlkost, für deren Lagerung und Auslage im Markt Tieftemperaturkälte bereitgestellt werden muss, wird sich dieser Trend weiter fortsetzen.
In Bürogebäuden ist es vor allem der gestiegene Komfortanspruch der Nutzer, der zu verstärktem Einsatz von Kälte- bzw. Klimatisierungstechnik führt.
Da die Kühlleistungsprofile der unterschiedlichen Gebäudetypen stark differieren, werden im Folgenden exemplarisch beide Gebäudevarianten (Bürogebäude/Supermarkt) untersucht.
Hierbei werden die Varianten reines Kühlen, reines Heizen und der kombinierte Betrieb der Sondenanlage betrachtet. Den Untersuchungen vorangestellt ist die Beschreibung des an der HfT-Stuttgart entwickelten numerischen Simulationsprogramms „erdson.de“, mit welchem die Simulationen erstellt wurden.

Simulationsmodelle und -grenzen

Simulation stellt in der Regel eine mathematische Näherung realer physikalischer Vorgänge dar. Um der Realität ein mathematisches Modell gegenüberstellen zu können, welches die wesentlichen Effekte wie Stoff- und/oder Energieströme sowie Temperaturverteilungen realistisch abbildet, müssen die wesentlichen von den untergeordneten Einflüssen getrennt werden. Mathematische Modellbildung beinhaltet daher naturgemäß Vereinfachungen und Schematisierung. Der Grad der Vereinfachung wiederum bestimmt den Rahmen innerhalb dessen simuliertes und reales System zur Deckung gebracht werden können. Ein Beispiel gibt an dieser Stelle das 1987 von Eskilson entwickelte Modell für Erdwärmesondenfelder, das die Temperaturverteilung innerhalb des Erdreichs mit Hilfe der g-Functions beschreibt [5]. Eskilson entwickelt sein Modell der Sonde aus der analytischen Lösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie heraus, wobei mit einer mittleren Temperatur über die gesamte Sondenlänge gerechnet wird. Diese Vereinfachung ermöglichte es Eskilson, die sich im eingeschwungenen Zustand ergebende Tempera-

turverteilung im Erdreich zu simulieren und somit ein wichtiges Werkzeug für die Auslegung von Sondenfeldern zu schaffen. Wird die Geothermieanlage als Teil der Gebäudetechnik simuliert, um bei wechselnden Lasten das Verhalten der Anlagenkomponenten prognostizieren zu können, müssen dynamische Wärmeleitprozesse mit abgebildet werden. Simulationsmodelle, die auf den Arbeiten Eskilsons aufbauen, wie der Earth Energy Designer (EED) oder das teilnumerische Simulationsprogramm EWS (Erdwärmesonden-programm) bedienen sich der dimensionslosen g-Functions zur Berechnung des Fernfeldes (EWS) oder des gesamten Simulationsgebietes (EED). Der Nahbereich der Sonde, der im EWS-Programm durch ein eindimensionales Crank-Nicholson-Verfahren numerisch genähert wird, bildet die zweidimensionale Sondengeometrie innerhalb eines Berechnungshorizontes nicht ab. Um betriebs-begleitende Simulationen von Sondenfeldern in porösen Grundwasserleitern durchführen zu können, müssen Energiebilanzen für das Feld als Ganzes (dreidimensional) oder zumindest zweidimensional innerhalb eines Berechnungshorizontes gelöst werden. Hierzu ist es zweckmäßig die zwei- bzw. dreidimensionale Temperaturverteilung um die Sonde abzubilden, um in einem zweiten Schritt den Temperaturein- bzw. austrag durch Grundwasser-strömung darstellen zu können. Der konvektive Anteil an der Gesamtenergiebilanz ist nicht unerheblich [8], so dass an der Hochschule für Technik ein Simulationsmodell entwickelt wurde, das die Wärmeleitungsgleichung, entwickelt aus dem Fourie'schen Erfahrungssatz, in alle drei Raumrichtungen löst. Es steht somit ein numerisches Simulationswerkzeug zur Verfügung, das auf Basis finiter Differenzen die Temperaturverteilung im Erdreich auch bei wechselnden Lasten bzw. dynamischen Wärmeströmen innerhalb der Modellgrenzen ausreichend genau beschreibt. Nachfolgend werden die Grundlagen der Modellbildung sowie das Modell als solches kurz beschrieben.

Grundlagen der numerischen Modellbildung

Die numerische Simulation realer Systeme erfordert die ein-, zwei-, oder dreidimensionale Zuordnung physikalischer Größen zu einem mathematischen Knotengitter. Die Knoten des Gitters repräsentieren in diesem Fall finite Volumenelemente des Erdreichs, der Betonverfüllung des Bohrlochs oder des Wärmefluidrohrs selbst (Abbildung 3). Die physikalischen Eigenschaften der Volumenelemente, wie spezifische Rhodichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und die Temperatur werden auf die Knoten übertragen. Die stoffliche Beschaffenheit der Volumenelemente findet so ihr mathematisches Spiegelbild im Knotengitter. Die geometrische Teilung des Simulationsbereichs kann hierbei physikalischen Effekten Rechnung tragen.

Abbildung 3 zeigt die horizontale Teilung des Simulationsbereichs in Sektoren und Zonen. Die Größe der Volumenelemente, die durch einen Knoten im mathematischen Modell repräsentiert werden, wächst nach außen hin an. Die feinere Diskretisierung in Sondennähe ermöglicht die genauere Abbildung der in diesem Bereich höherliegenden Wärmestrom-dichte.
Unter Annahme eines gänzlich homogenen Erdreichs und einer ungestörten Einzelsonde handelt es sich bei der Temperaturverteilung im Erdreich um die Sonde um ein radialsymmetrisches Problem. Diesem Umstand trägt die Einteilung des Simulationsbereichs in Sektoren Rechnung. Die Einteilung in Zonen wurde zur einfacheren mathematischen Darstellung eines Sondenfeldes statt ringförmig eckig gewählt. Die so geteilten Erdreichvolumina haben einen trapezförmigen Grundriss und bilden mit der eigentlichen Sonde, in der Mitte der Abbildung 3 dargestellt, Schicht für Schicht den dreidimensionalen Korpus des Berechnungsraums.

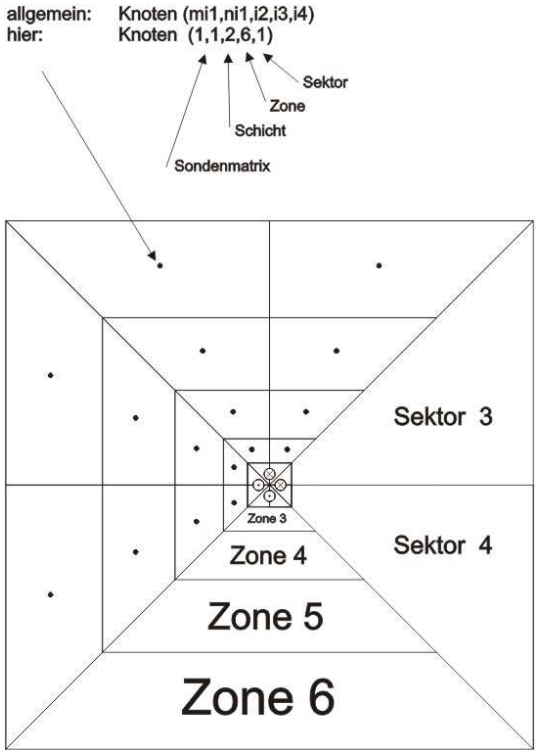

Abbildung 3: Schema der horizontalen Sonden-teilung im Simulationsprogramm

Die Berechnungsknoten liegen räumlich im Schwerpunkt der Volumenelemente und sind über Laufindices wie Schicht, Zone und Sektor eindeutig adressiert.
Zum Wärmeübertrag durch Leitung, wie er im Modell der ersten Ausbaustufe realisiert ist, wird in der folgenden Ausbaustufe des Programms der Wärmeübergang durch Konvektion (Grundwasser-strömung) parallel geschaltet.

Letzteres macht die Simulation ganzer Sondenfelder nötig, da sich gerade bei Sondenfeldern in porösen Grundwasserleitern Temperaturfahnen ausbilden, die auf die Temperaturverteilung und damit auf die resultierende Energiebilanz der einzelnen Sonden erheblichen Einfluss haben.
Um diese Randbedingungen des Simulationsmodells sicher abbilden zu können, wird am Rand der einzelnen Sonden ein Wärmeübergang von Sonde zu Sonde berücksichtigt und das Feld als ganzes simuliert.
Mit dem bis dato realisierten Simulationswerkzeug kann ein Sondenfeld von zwei auf fünf Sonden simuliert werden. Innerhalb der 2x5-Matrix können einzelne Sonden an- bzw. abgeschaltet werden, was die Abbildung kleiner bis mittlerer Sondenfelder mit unterschiedlichstem Grundriss ermöglicht. In Abbildung 4 sind Beispiele der möglichen Anordnung der Sonden dargestellt. Hierbei stellen die mit Kreuzen versehenen Orte Sonden im Betrieb dar, während die mit Ringen markierten Stellen Dummy-Sonden kennzeichnen. Dummy-Sonden erfüllen den Zweck das mathematische Modell variabel an die in der Realität vorgefundene Anordnung von Sonden anpassen zu können. Um den Programmieraufwand gering zu halten, werden Dummy-Sonden genau wie die in Betrieb stehenden Sonden geometrisch geteilt (Abbildung 3). Im zweiten Schritt werden die Stoffeigenschaften des Erdreichs allen Knoten, d.h. auch den Knoten der Betonitverfüllung des Bohrlochs und denen des Wärmeträgerfluids zugewiesen. Es ergibt sich so ein homogener Berechnungskörper mit der Teilung einer
Sonde und den Stoffeigenschaften des Erdreichs.

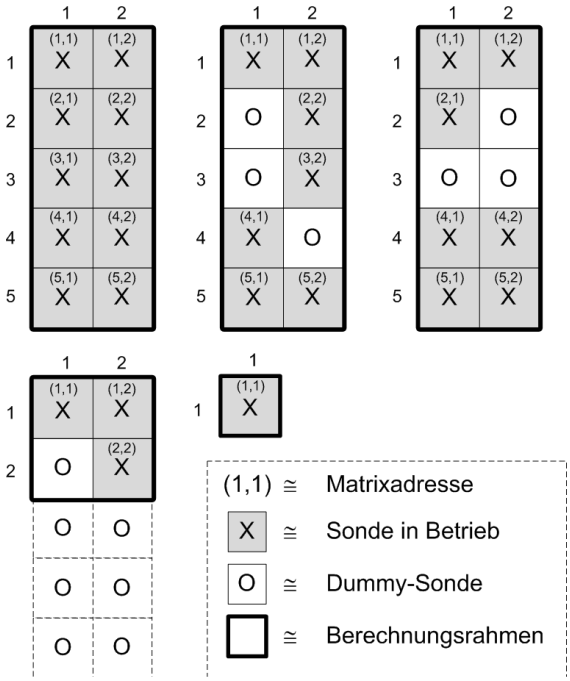

Abbildung 4: Darstellung möglicher Geometrien abbildbarer Sondenfelder

Dieser wird, da er innerhalb des Berechnungsrahmens liegt, mit überrechnet. Der Wärmeeintrag erfolgt jedoch im Gegensatz zu in Betrieb stehenden Sonden ausschließlich über die Randzone der angrenzenden Sonden und nicht über die Temperaturanomalie durch das Wärmeträgerrohr in Sondenmitte.
Ausgehend von grundlegenden Parametern, wie dem Abstand der Sonden innerhalb des Feldes in x/y-Richtung sowie der Sondentiefe ab Geländeoberkante (z-Richtung) generiert das Programm ein Knotengitter.
Jeder Knoten ist innerhalb der Matrix eindeutig adressiert und durch kartesische Koordinaten innerhalb des Simulationsgebietes räumlich fixiert. Neben den Matrizen für die kartesischen Koordinaten werden die physikalischen Stoffeigenschaften (Dichte, Wärmekapazität und -leitfähigkeit) der Knoten in jeweils eigenen Matrizen gespeichert. Dadurch ist eine theoretische Auflösung von differierenden Stoffeigenschaften des Erdreichs bis auf eine einzelne Volumeneinheit (Knoten) möglich.
Bei der Fertigung von Erdwärmesonden werden die anstehenden Gesteine unter Angabe der jeweils erreichten Bohrtiefe dokumentiert, was die Zuweisung der jeweiligen Stoffeigenschaften des anstehenden Gesteins pro Simulationshorizont ermöglicht. Um die Abbildung der realen Verhältnisse im Feld auf das mathematische Modell effektiv umsetzen zu können, sollte die Zuordnung der Stoffeigenschaften zu den jeweiligen Simulationshorizonten automatisiert erfolgen. Hierfür besteht noch Entwicklungsbedarf, so dass bei den im zweiten Teil beschriebenen Modellen jeweils von homogenem Erdreich mit gemittelten Stoffwerten ausgegangen wurde.
Nach der räumlichen und stoffspezifischen Definition des Knotengitters wird unter Berücksichtigung der Jahreszeit die Temperaturverteilung im Feld zum Zeitpunkt t_0 berechnet. Die Eindringtiefe der jahreszeitlich oszillierenden Temperaturwelle in das/den halbunendliche/en Erdreich/Raum (siehe Abbildung 5) beträgt in etwa 15 m unter Geländeoberkante (GOK). Sind Datum des Simulationszeitraumes und Klimadaten bekannt, können die Erdreichstarttemperaturen für die Berechnungshorizonte ermittelt werden. Bereits beim aktuellen Programmstand mitberücksichtigt sind die an DIN V 4108 Teil 6 angelehnten 15 Klimaregionen Deutschlands, deren Jahresmitteltemperatur und Amplitude in die Berechnung eingeht [4]. In der Abbildung 5 ist die jahreszeitlich wechselnde Temperaturverteilung des Erdreichs bezogen auf die Klimaregion 15, Garmisch-Partenkirchen, dargestellt.
Die Simulation kurzer Sonden (z.B bis 20m), deren oberer Bereich gegenüber dem oberflächennahen Erdreich ungedämmt ausgeführt ist, wird so durch die beschriebene Programmroutine möglich.

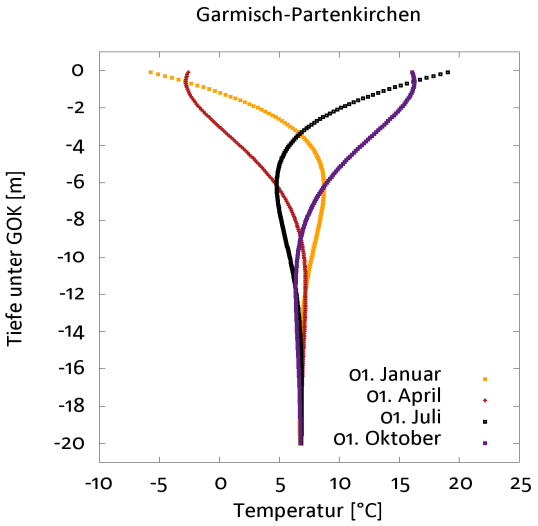

Abbildung 5: Eindringtiefe der jahreszeitlich wechselnden Temperaturwelle unter Geländeoberkante (GOK) [4]

Rechenroutine, Berechnungsablauf

Der Rechenablauf gliedert sich insgesamt in drei Teile. Hierbei wird der erste Abschnitt, in dem aus grundlegenden Parametern des Sondenfeldes die Geometrie des Knotengitters bestimmt wird, nur beim ersten Aufruf der Rechenroutine durchlaufen. Die darauf folgenden Rechenabschnitte zwei und drei werden hingegen pro Zeitschritt berechnet.
Im Rechenschritt zwei wird zunächst der Temperaturgradient im U-Rohr der Sonde bestimmt. Hierzu wird die Energiebilanz der einzelnen Sondenabschnitte aufgestellt (Abbildung 6 & 7).

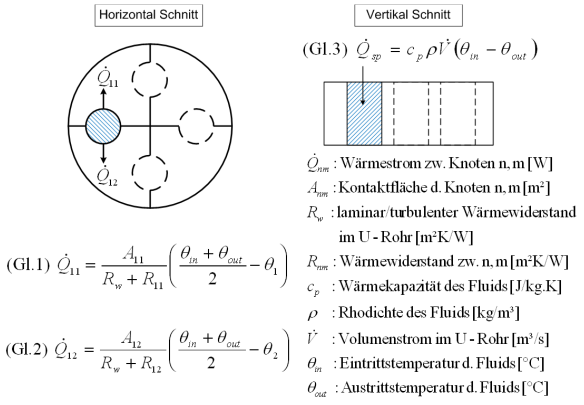

Abbildung 6: Energiebilanzen in der Sonde (Berechnung des Temperaturgradienten im Wärmeträgerrohr)

Den Verlustwärmeströmen $\dot{Q}_{11}$und $\dot{Q}_{12}$ (Gl. 1 & 2) wird die Wärmespeicherleistung im Wärmeträgerfluid $\dot{Q}_{st}$ (Gl.3) gleichgesetzt.
Die für die Wärmeleitung ins Erdreich relevante Mitteltemperatur eines U-Rohrabschnitts ergibt sich als arithmetisches Mittel aus der Eintrittstemperatur Θ_{in} und der Austrittstemperatur Θ_{out} des simulierten Volumenelements (Gl.4). Abbildung 6 und 7 zeigen die für die Temperaturbestimmung des U-Rohrelementes getroffenen Annahmen und Bilanzen.

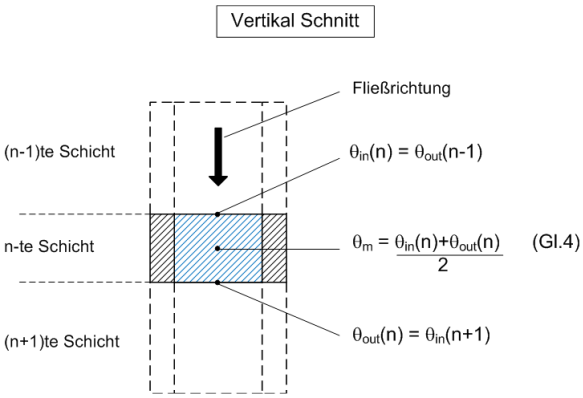

Abbildung 7: Mittlere Temperatur des Wärmeträgers im n-ten Berechnungshorizont

Im dritten Rechenschritt wird der Wärmeübergang zwischen den Knoten des Bohrlochs und angrenzenden Erdreichs echt dreidimensional kalkuliert. Um den Programmieraufwand, der angesichts der Simulation ganzer Sondenfelder entsprechend hoch ist, nicht zusätzlich zu vergrößern, wurde die Anwendung mit Hilfe finiter Vorwärtsdifferenzen programmiert.
Bei der gewählten Diskretisierung des Sondenfeldes wird für eine stabile Berechnung eine maximale Zeitschrittweite von ca. 10 Minuten erforderlich, die bei der Simulation von Tagen oder Monaten kein Problem darstellt, jedoch bei Simulationszeiträumen von mehreren Jahren mit langen Rechenzeiten verbunden ist.

Validierung des Programms

Die Validierung des Programms wurde an der hochschuleigenen Geothermieanlage vorgenommen. Bei dieser Anlage handelt es sich um zwei 80 m tiefe Erdwärmesonden, an denen zu Lehrzwecken regelmäßig Thermal-Response-Tests durchgeführt werden. Hierfür werden die Sonden abwechselnd mit 3 kW Heizleistung beaufschlagt, wobei die erreichte Rücklauftemperatur der Sonde und der Volumenstrom der Umwälzpumpe vermessen wird. Die aus den Tests gewonnenen Werte für die mittlere Leitfähigkeit des Untergrundes wurden zur Erstellung des Modells verwendet. Diagramm 8 zeigt gemessene wie simulierte Werte für den Sondenrücklauf. Aufgetragen in diesem Diagramm sind die gemessene Vorlauftemperatur (in Orange-Gelb), die gemessene Rücklauftemperatur (in Violett) und die simulierte Rücklauftemperatur (in Rot) über der Zeit.
Der zur Messung eingestellte Volumenstrom ist im Diagramm in Schwarz dargestellt.

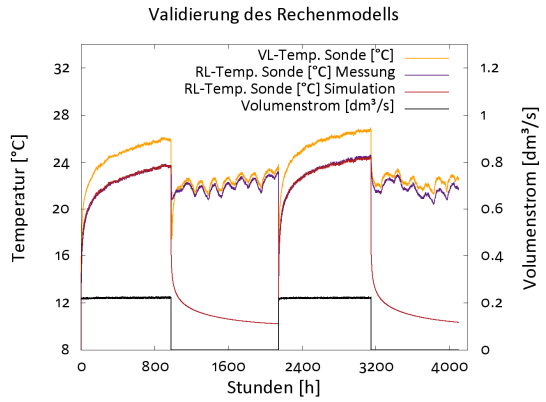

Abbildung 8: Vergleich gemessener und simulierter Rücklauftemperatur eines Thermal-Response-Tests

Die Messstellen für die Bestimmung der Vor- bzw. Rücklauftemperatur der Sonde liegen innerhalb des unbeheizten Technikraumes des Laborgebäudes. Deshalb liegt die gemessene Rücklauftemperatur bei Abschalten der Heizung höher als die simulierte, da nicht die ungestörte Erdreichtemperatur, die sich im Fall der Simulation einstellt, gemessen wird, sondern die Umgebungstemperatur im Technikraum. Ist die Anlage in Betrieb, liegt die berechnete rote Temperaturkurve nur wenige Zehntel Kelvin unter der gemessenen Rücklauftemperatur, so dass von einer guten Abbildung der realen Verhältnisse durch das mathematische Modell ausgegangen werden kann.

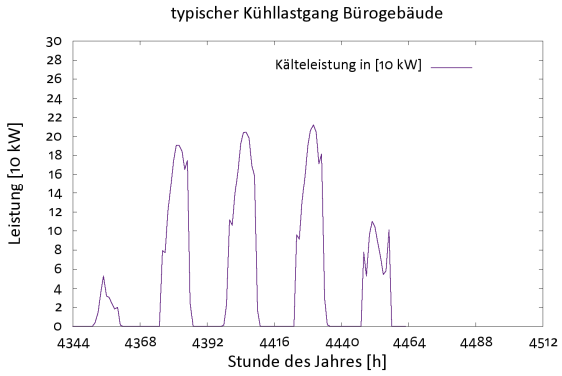

Abbildung 9: typischer Kühllastgang Bürogebäude

Weiter verläuft die simulierte Kurve in den Zeiten ohne Heizleistung der Theorie entsprechend gemäß einer kapazitiven Entladekurve, bis die ungestörte Erdreichtemperatur bei ca. 10 °C erreicht ist.

Simulation der Anwendungsfälle

Mit dem entwickelten Simulationsmodell werden nun die Lastgänge von einem durchschnittlichen Bürogebäude sowie einem Supermarkt untersucht.
In der Abbildung 9 sind die Kühllasten eines am Chiemsee in Bayern liegenden Bürogebäudes dargestellt.
Der Lastgang zeigt über den Zeitraum einer Woche (Montag - Sonntag) eine regelmäßige Wiederkehr des täglichen Kühllastverlaufs. Während außerhalb der üblichen Büroarbeitszeiten keine Kühlung notwendig ist, steigt die Kühllast während des Morgens sprunghaft an, erreicht um die Mittagszeit ihr Maximum und nimmt zum Feierabend erneut stark ab. Diesem für Bürogebäude typischen Verlauf, ohne ausgeprägte Grundlast außerhalb der Büroarbeitszeiten, steht im Anwendungsfall Supermarkt ein Lastgang gegenüber, der sehr markante Grundlastbereiche aufweist (Abbildung 10).
Zu beachten ist hier, dass in Abbildung 10 die Woche mit einem Sonntag beginnt, an dem die Kühllast deutlich tiefer liegt. Die Kühllast eines Supermarktes setzt sich im Wesentlichen aus dem Grundlastanteil für die Lebensmittelkühlung sowie dem Spitzenlastanteil für die Verkaufsflächenklimatisierung zusammen.

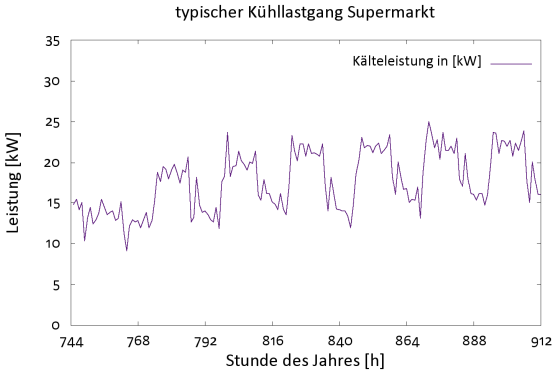

Abbildung 10: typischer Kühllastgang Supermarkt

Letzterer Anteil ist am Sonntag wegen des fehlenden Publikumsverkehrs nicht gegeben, so dass an diesem Tag im Vergleich zu den verkaufsoffenen Tagen, gut das Verhältnis zwischen Grund und Spitzenlast abgeschätzt werden kann.

Diskussion der Ergebnisse

Die Simulation des Bürogebäudes erfolgte vorrangig, da für dieses Gebäude ein vollständiger Datensatz für die Kühl- und Heizlasten (in stündlicher Auflösung für ein Kalenderjahr) vorhanden war.
Gegenstand der Untersuchung ist der Vergleich unterschiedlicher Rückkühlarten einer reversiblen Wärmepumpe, deren Leistung zur Deckung der nötigen Heiz- bzw. Kühllast ausreicht (monovalente Wärme- bzw. Kältegestehung). Untersucht wird die Rückkühlung über einen trockenen Kühlturm (Variante1), durch einen nassen Kühlturm (Variante 2) sowie mit Hilfe einer Geothermieanlage (Variante 3).
Weiter wurden für den Zeitraum eines Jahres für die Variante 3 drei Fälle unterschiedlicher Art des Betriebs der Anlage simuliert (Varianten 3.1-3.3). Zur Untersuchung kamen hierbei der reine Heizbetrieb im Winter, der reine Kühlbetrieb im Sommer sowie der ganzjährige kombinierte Betrieb der Anlage.

Eine Besonderheit des modellierten Gebäudes ist die asymmetrische Verteilung der Lasten zwischen Sommer und Winter. Die benötigte Heizleistung übersteigt die geforderte Kühlleistung um das Dreifache, was für die Auslegung des Sondenfeldes ein Problem darstellt. Wird das Feld auf die größere Leistung (hier die Heizleistung) ausgelegt, ist die Anlage für den kleineren Leistungsbereich stark überdimensioniert, was die Effekte der Temperaturdegradation des Erdreichs bei ganzjährigem kombiniertem Betrieb minimiert. Wird die Anlage dagegen auf die kleinere Leistung ausgelegt, treten diese Effekte deutlicher in Erscheinung als bei symmetrisch verteilter Last. Um das Simulationsmodell einfach zu strukturieren, kam eine Deckung der Spitzenlast durch eine andere Quelle nicht in Betracht, was dazu führt, dass in diesem Fall die Entscheidung zu Gunsten des größeren Effekts ausfiel, was in den untersuchten Fällen zu nicht praxistauglichen spezifischen Entzugsleistungen und Vorlauftemperaturen des Sondenfeldes im Winter führt (Abbildung 11 – 13) [8].

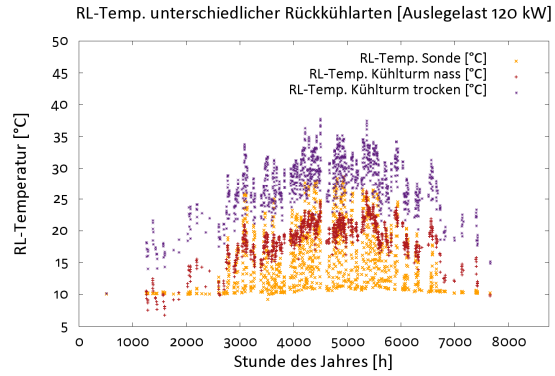

Abbildung 11: erreichte Rückkühltemperaturen [°C] (nur Kühlen) der Varianten 1-3

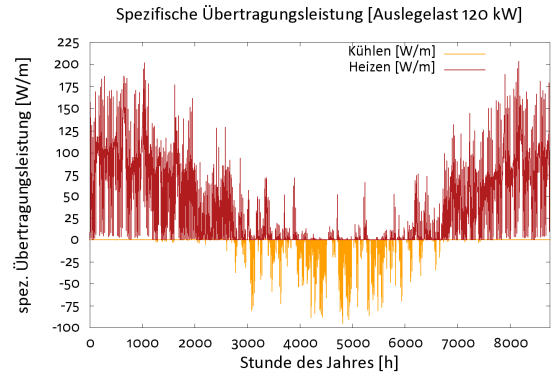

Abbildung 12: spezifische Entzugsleistung der Sonden [W/m] (kombinierter Betrieb) Variante 3.3

Abbildung 14 zeigt die aufsummierten Season-Performance-Factors sowie die Jahresarbeitszahl (Spalte 14) für die Varianten 1-3 (reines Kühlen). Für die Monaten Januar und Dezember ergeben sich keine Werte, da in diesen Monaten der Datensatz des Bürogebäudes keine Kühllasten aufweist. Auffällig ist der geringe Unterschied zwischen den Varianten nasser Kühlturm und Geothermieanlage, der noch genauer untersucht werden muss.

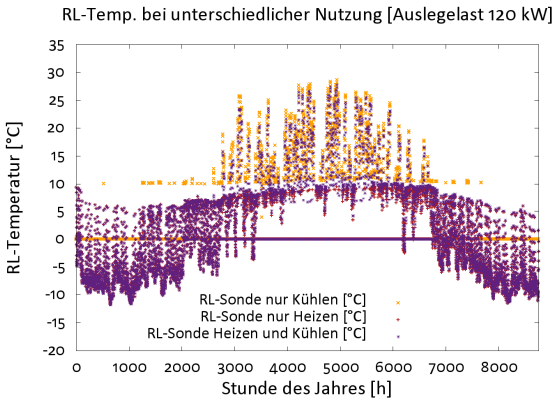

Abbildung 13: Vergleich der Rücklauftemperaturen der Sonden [°C] für reinen Heiz-/ Kühlfall oder kombinierten Betrieb (Varianten 3.1-3.3)

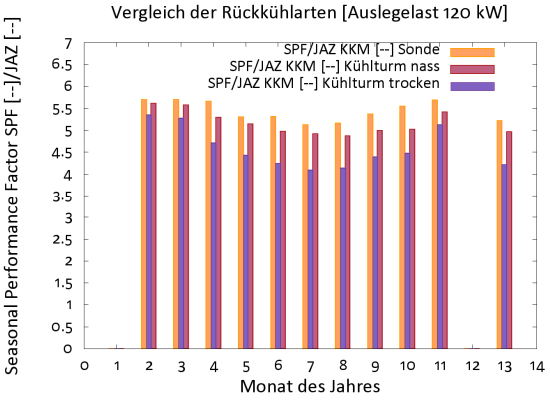

Abbildung 14: erreichte COP's der Varianten 3.1-3.3

Die Simulation des Supermarktes, dessen Geothermiefeld mit 10 Sonden zu 99 m Länge eine Nennleistung von 40-50 kW aufweist, wurde bei der Durchsicht der Messdaten, die von Oktober 2008 bis Mai 2010 aufgezeichnet wurden vorbereitet.
Abbildung 15 und 16 zeigen exemplarisch für die Betriebsart Heizen bzw. Kühlen die Vor- und Rücklauftemperaturen, mit denen die Sonden beaufschlagt wurden. Die Anlage wird im High-Flow gefahren, was die Spreizung, die üblicherweise im Bereich von 4-5 Kelvin liegen müsste auf 1-2 Kelvin verringert. Die Anlage entzieht, wie in Abbildung 15 dargestellt auf einem Temperaturniveau von ca. 10°C dem Erdreich Wärme.
Im sommerlichen Betrieb wird auf einem Temperaturniveau von ca. 15°C knapp die Hälfte der vom Normalkältekreislauf anfallenden ca. 100 kW thermischer Kälteleistung an das Erdreich abgegeben. Die restliche Wärmelast aus dem Normalkältekreis geht auf einen Speicher, sowie zur Trinkwassererwärmung. Dies macht das Simulationsmodell der Anlage komplexer als im Fall

des Bürogebäudes, weswegen die Berechnungen bei Abschluss dieses Artikels noch nicht abgeschlossen waren. Nach Aussage der Anlagenbetreiber, soll die Umwälzpumpe, die derzeit nur den Betrieb im High-Flow gestattet, auf eine regelbare Pumpe umgerüstet werden, die im mittleren und Grundlastbereich höhere Spreizungen des Wärmeträgerfluids zu lässt, wodurch sich ein günstigerer Temperaturgradient zwischen Bohrlochverfüllung und angrenzendem Erdreich ausbildet, der höhere Entzugsleistungen in diesen Betriebspunkten erwarten lässt. Nähere Simulationen zu spezifischen Entzugsleistungen und Rücklauftemperaturen werden zeitnah angestrengt.

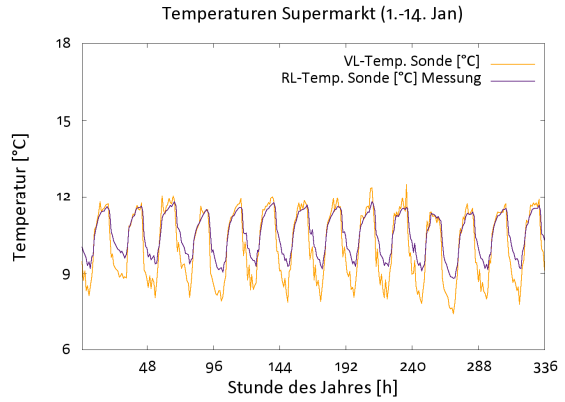

Abbildung 15: Temperaturverlauf des Supermarktes im Januar 2009

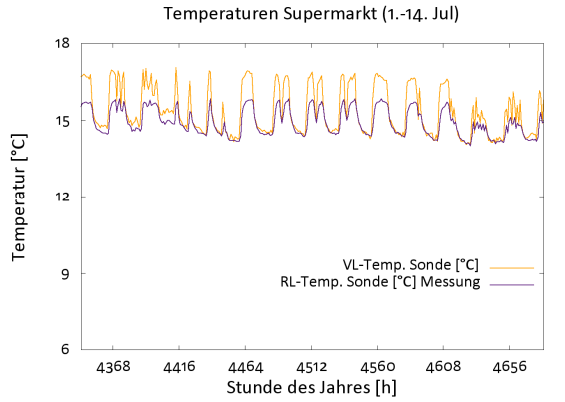

Abbildung 16: Temperaturverlauf des Supermarktes im Juli 2009

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand der Simulation für das Bürogebäude, für die Betriebsarten reines Kühlen, reines Heizen und kombinierter Betrieb, ist bereits im ersten Jahr ein Unterschied in den Rücklauftemperaturen feststellbar. Die Temperaturdifferenz beträgt ca. 0,2-0,5 Kelvin. Inwieweit die asymmetrische Verteilung der Last zwischen sommerlichem Kühlbetrieb und dem Heizfall im Winter für diesen Effekt verantwortlich ist, sollte genauer untersucht werden. Die Temperaturlangzeitstabilität des Sondenfeldes muss mit weiteren mehrjährigen Simulationen geprüft werden, wobei davon ausgegangen werden kann, dass sich der bereits im ersten Jahr ersichtliche Temperaturunterschied zwischen den Varianten 3.1-3.3 noch vergrößert. Sind die Daten des Supermarktes ausgewertet und weisen diese eine größere Symmetrie zwischen Wärmeab- bzw. -aufnahme auf, ist es zweckdienlich mit diesen Daten ebenfalls Langzeituntersuchungen anzustellen.

DANKSAGUNG

Bedanken möchte wir uns für die gute Zusammenarbeit mit Dr. Jürgen Schuhmacher, der an der Entwicklung des Simulationsmodells maßgeblich beteiligt war und dessen Unterstützung und Hinweise uns stets eine große Hilfe war(en). Weiterer Dank geht an Christoph Vorschulze, dessen Modell für Einzelsonden „VEBOHEX“ für die „erdson.de“ Pate stand.

LITERATUR

[1] Adnot, J. 2003. Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC), DGTREN, Armines, Frankreich

[2] Arias, J. 2005. Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden

[3] Böhme, D. 2009, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008, Berlin, Deutschland

[4] DIN V 4108 Teil 6 2003-06. Vornorm Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergie-bedarfs

[5] Eskilson P. 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Department of Mathematical Physics and Building Technology University of Lund, Sweden

[6] Schmidt, D. 2009. Projektverbund LowEx: Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Exergiesystemen, Abschlußbericht, Fraunhofer IBP, Kassel, Deutschland

[7] Schraps, S. 2005. Energiekostenreduzierung in Supermärkten, Kälte Klima Aktuell 2/2005, perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Aachen, Deutschland

[8] VDI 4640 Blatt 2 2001-09. Technische Regel Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

[9] Weber, L. 2002. Energie in Bürogebäuden, Verbrauch und energierelevante Entscheidungen vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich