

DIE TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT VON SAISONALER GEOTHERMISCHER WÄRMESPEICHERUNG

Peter BIERMAYR¹, Gregor GÖTZL², Stefan HOYER², Martin FUCHSLUGER², Gerald STICKLER³

Kurzfassung:

Die kostengünstige saisonale Wärmespeicherung wird von den Autoren als die Schlüsseltechnologie für eine vollsolare Wärmeversorgung von Wohn- und Servicegebäuden gesehen. Hierfür müssen innovative Ansätze geprüft werden, da im Bereich der verfügbaren wasserbasierten Speichersysteme abgesehen von einigen Demonstrationsanlagen keine nennenswerte Marktdiffusion zu beobachten ist.

Im Forschungsprojekt GEOSOL werden deshalb die technische Machbarkeit und die Erfolgsfaktoren für einen wirtschaftlichen und umweltverträglichen Betrieb von solaren Mikrowärmenetzen mit saisonaler geothermischer Wärmespeicherung untersucht. Das aus der Technischen Universität Wien, der Geologischen Bundesanstalt und der HTL Wiener Neustadt bestehende Projektteam analysiert hierfür ein Modellsystem aus Gebäuden, solarthermischen Anlagen und der Wärmespeicherung im Boden. Methodisch wird das Modellsystem in Computersimulationen abgebildet, wobei selbst programmierte Module und verfügbare Simulationssoftware kombiniert werden. Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit werden konkrete Fallstudien im Großraum Wiener Neustadt analysiert.

Die vorläufigen Projektergebnisse weisen die technische Machbarkeit des Ansatzes und eine Reihe von Eignungskriterien aus. Für einen wirtschaftlichen Betrieb des Modellsystems müssen mehrere strukturelle Rahmenbedingungen im Bereich des Speicherdesigns und im Bereich der versorgten Gebäude erfüllt werden. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass für den Einsatz des untersuchten Systems im österreichischen Gebäudebereich prinzipiell ein großes Potenzial vorhanden ist. Die Eignung potenzieller Strukturen muss jedoch im Einzelfall geprüft werden.

Keywords: Geothermische Wärmespeicher, saisonale Wärmespeicher, Solarthermie, Mikro-Wärmenetze;

Das Forschungsprojekt GEOSOL wird im Rahmen des Forschungsprogramms "Sparkling Science" vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung gefördert.

¹ Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, Energy Economics Group (EEG), Gusshausstr. 25-29/370-3, A-1040 Wien, Tel.: +43(0)1-58801-370358, Fax: +43(0)1-58801-370397, E-Mail: biermayr@eeg.tuwien.ac.at, Web: <http://www.eeg.tuwien.ac.at/>

² Geologische Bundesanstalt, Neulinggasse 38, A-1030 Wien, Tel.: +43(0)1-7125674-336, E-Mail: gregor.goetzl@geologie.ac.at, Web: www.geologie.ac.at/

³ HTBLuVA Wiener Neustadt, Dr. Eckener Gasse 2, 2700 Wiener Neustadt, Tel: +43(0)676-5134568, E-Mail: gerald.stickler@suXess-consulting.at, Web: <http://www.htlwrn.ac.at/auftritt>

1 Einleitung

Die Möglichkeit einer kostengünstigen saisonalen Wärmespeicherung eröffnet einen Weg zu einer vollsolaren Wärmeversorgung von energieeffizienten Wohn- und Servicegebäuden. Ab einer gewissen Energieeffizienz der Gebäude ist eine ausgeglichene Bilanz aus Jahres-Wärmebedarf und hypothetischer Wärmeproduktion aus solarthermischen Anlagen am Gebäude möglich. Die jeweils benötigten Temperaturniveaus sind ein weiterer wesentlicher Punkt der Betrachtungen, da die Effizienz des Gesamtsystems und damit verknüpft auch die Wirtschaftlichkeit des Systems von den Temperaturniveaus auf der Angebots-, Bedarfs- und Speicherseite abhängen.

Für die systematische Untersuchung der Fragestellung wurde ein Modellsystem definiert, welches in Abbildung 1 dargestellt ist. Das System besteht aus Gebäuden, einem geothermischen Speicher, solarthermischen Anlagen welche typischer Weise Element der Gebäude sind, sowie einer Wärmepumpe und allfälligen technischen Wasserspeichern.

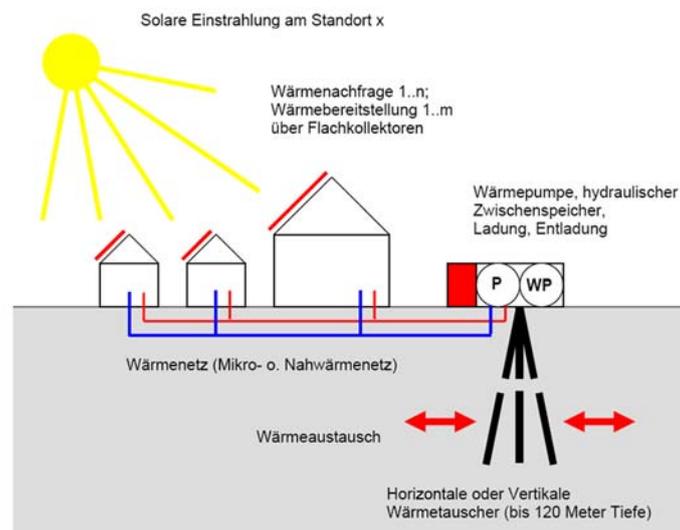


Abbildung 1: Das GEOSOL-Modellsystem.

Die langfristige geothermische Speicherung von Wärme wurde in der Vergangenheit in einigen Pilot- und Demonstrationsprojekten vor allem in Deutschland und in Skandinavien umgesetzt. Dabei können Aquifer-Wärmespeicher und Erdsonden-Speicher unterschieden werden. Technische Speicher, die bezüglich ihrer Größe für die saisonale Wärmespeicherung geeignet sind und aus bautechnischen Gründen in den Untergrund integriert werden (z.B. Wasserspeicher in künstlichen Kavernen oder isolierte Speicherseen), werden hier im weiteren nicht als geothermische Speicher bezeichnet und auch nicht weiter untersucht. Gebaute Beispiele wie die solare Nahwärmeversorgung in Neckarsulm (Sondenfeld) oder der Berliner Reichstag (Aquifer) zeigen die prinzipielle Machbarkeit von entsprechenden Anlagen. Bei den existierenden Pilot- und Demonstrationsanlagen handelt es sich jedoch oftmals um sehr spezielle Konstellationen, bei denen besonders günstige Rahmenbedingungen in einer Umsetzung mündeten. Dies sind beispielsweise ein optimierter Neubau des gesamten Systems, die zufällige Verfügbarkeit von günstigen Aquiferen oder ein Forschungsinteresse mit untergeordneten Forderungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit (vgl. hierzu Nußbicker et al., 2004 und Bauer D. et al., 2007). Eine prinzipielle Systematik der Speichermöglichkeiten ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Speichersysteme können dabei in

ATES (aquifer thermal energy storage), BTES (borehole thermal energy storage) und CTES (cavern thermal energy storage) untergliedert werden. Für das GEOSOL-Modellsystem werden im Weiteren ausschließlich BTES Systeme in Betracht gezogen, da ATES nur lokal verfügbar und CTES nur in Ausnahmefällen verfügbar oder nur durch sehr große Investitionen herstellbar sind.

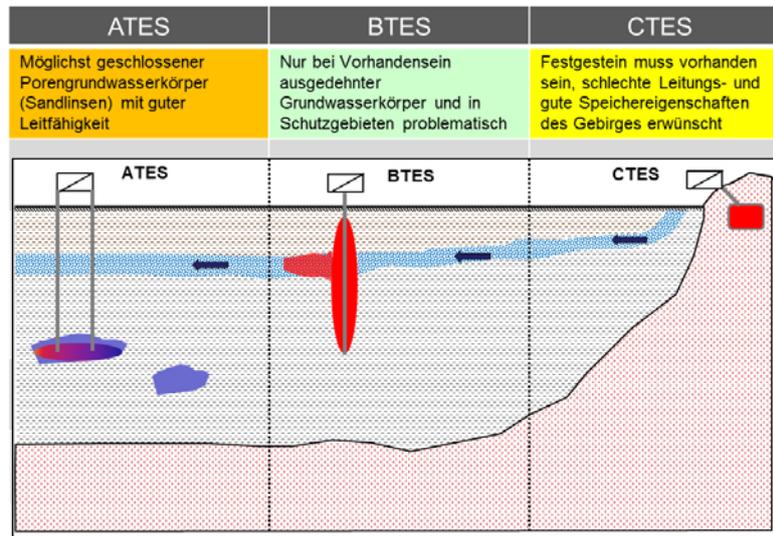


Abbildung 2: Systematik der geothermischen Wärmespeicherung

2 Methode und Daten

Zur Untersuchung der Erfolgsfaktoren für das GEOSOL-Modellsystem werden unterschiedliche Simulationszugänge verwendet. Prinzipiell wird das Gesamtsystem im Stundenraster über mehrere Jahre simuliert. Dabei wird durch die Verwendung der entsprechenden Testreferenzjahre für die Standortparameter (klimatische Parameter) auch der örtliche Bezug zu Fallstudien hergestellt, welche im Großraum Wiener Neustadt angesiedelt sind. Die Nachfrageseite und die solarthermische Wärmeproduktion wird bislang in selbst programmierten Modellen abgebildet, die geothermischen Speicher werden mit unterschiedlichen Softwarepaketen untersucht, wie dies in Abbildung 3 dargestellt ist.

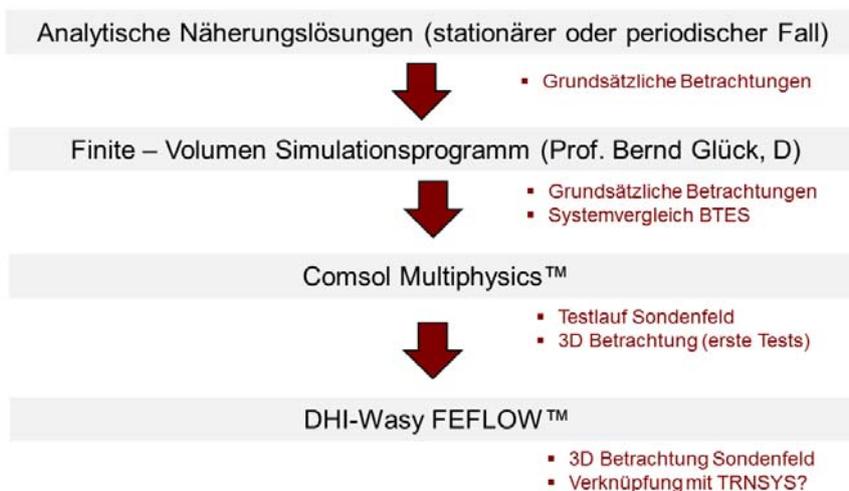


Abbildung 3: Methodische Ansätze zur Simulation der geothermischen Speicherung.

3 Ausgewählte Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden grundsätzliche Überlegungen zu solarthermisch gekoppelten saisonalen Wärmespeichern in Form von geschlossenen Sonden und Kollektoren durchgeführt. Hierbei handelt es sich um Systeme die in der klassischen, mit Wärmepumpen unterstützten oberflächennahen Geothermie zum Einsatz kommen. Die ausgewählten Ergebnisse beziehen sich auf den unterirdischen Teil des Modellsystems, da es sich hierbei um die innovative Komponente des Systems handelt.

In Abbildung 4 ist ein fiktives stationäres Szenario angenommen, in welchem in einem ersten Betriebsjahr eine hypothetische ganzjährige Einspeisung von Solarwärme auf einem konstanten Temperaturniveau von 70°C erfolgt. Im darauffolgenden zweiten Betriebsjahr wurde hingegen konstant Wärme auf einem Temperaturniveau im Vorlauf des Speichers von -2°C entzogen. Die Wärmeübertragung wurde am Beispiel einer Doppel U-Rohr Sonde rechnerisch abgebildet.

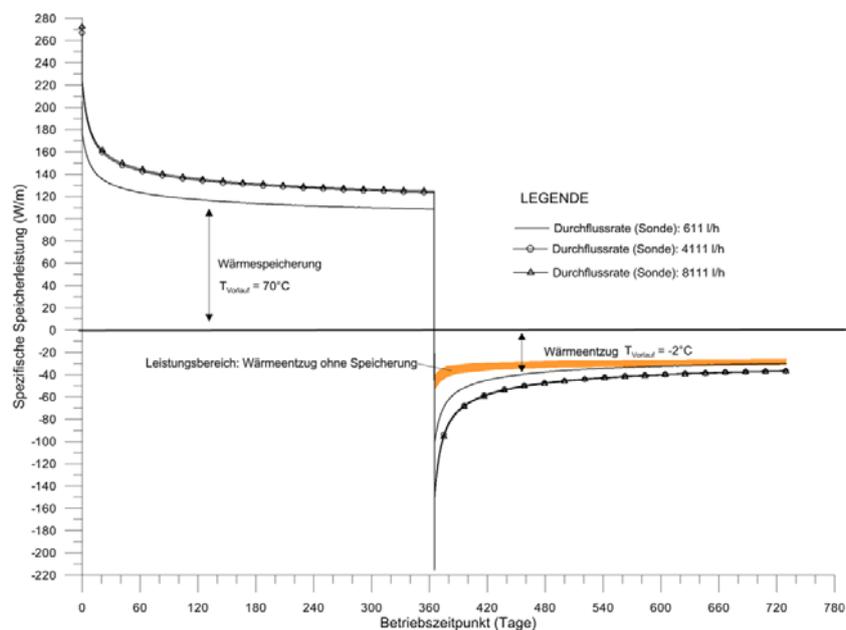


Abbildung 4: Wärmeübertragungsleistung einer typischen Doppel U-Rohr Sonde für 2 Betriebsjahre (Jahr 1: Wärmeeinspeisung auf einem Temperaturniveau von 70°C; Jahr 2: Wärmeentzug auf einem Temperaturniveau von -2°C). Die orange Linie kennzeichnet den Verlauf der Wärmeentzugsleistung ohne vorherige Wärmeeinspeisung.

Es zeigt sich dabei, dass die Wärmeübertragungsleistung der Sonde nach einem Jahr ununterbrochener Wärmeeinspeisung intakt und deutlich über der Wärmeentzugsleistung einer gleichartigen Sonde im klassischen geothermischen Heizbetrieb ist. Das Erreichen eines Sättigungszustandes kann nicht beobachtet werden. Die Wärmeübertragungsleistung ist im Fall der solaren Wärmeeinspeisung deutlich besser als im Fall des Wärmeentzugs. Dies bedeutet, dass mehr Energie in den Boden eingespeist wurde als anschließend entzogen werden konnte. Die Ursache dieses Phänomens liegt in den unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zur ungestörten Bodentemperatur.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse für eine Simulation der Wärmeübertragungsleistung für den Fall konstanter Wärmeeinspeisung auf einem Temperaturniveau von 70°C durch Variation des Massenstroms in der Doppel U-Rohr Sonde. Es wird dabei deutlich, dass die Erhöhung

des Massenstroms über einen Bereich von 2000 Liter pro Stunde kaum leistungssteigernde Effekte mit sich bringt, sehr wohl jedoch einen gesteigerten Pumpaufwand.

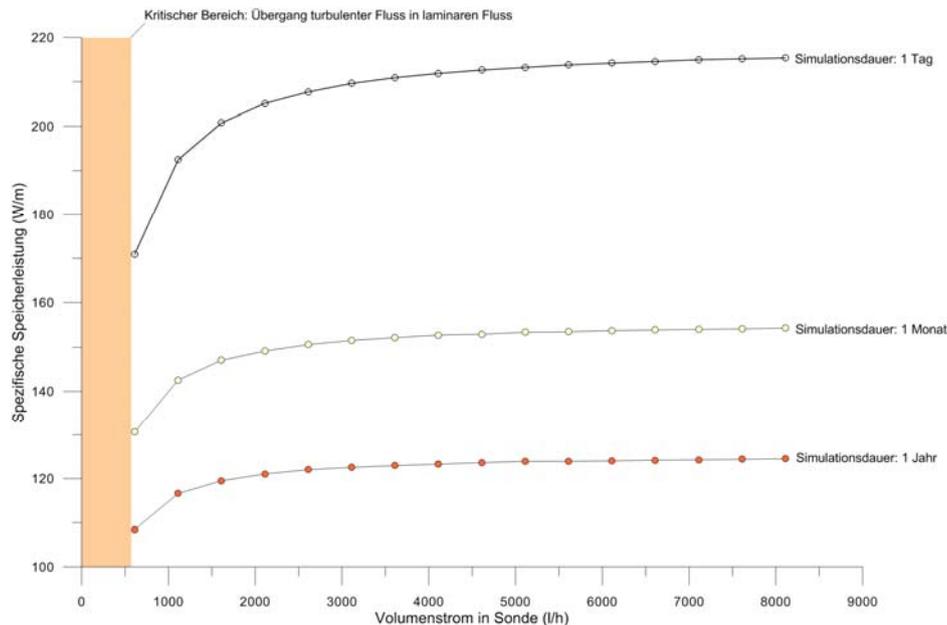


Abbildung 5: Änderung der Wärmeübertragungsleistung für den Fall konstanter Wärmeeinspeisung auf einem Temperaturniveau von 70°C durch Variation des Massenstroms in der Doppel U-Rohr Sonde.

Abbildung 6 zeigt die Temperaturverläufe in unterschiedlichen Distanzen um die Sonde. Es zeigt sich dass bei einer deutlichen Temperaturüberhöhung an der Bohrlochwand dieser Temperaturanstieg jedoch nur in einem räumlich sehr begrenzten Umfeld zu beobachten ist. Im Fall einer ausgeglichenen Energiebilanz der Einspeisung und Entnahme bewegen sich die Temperatureffekte im Abstand von einem Meter von der Sonde und bei Annahme von einer ungestörten Bodentemperatur von 10°C im Bereich von maximal 26°C.

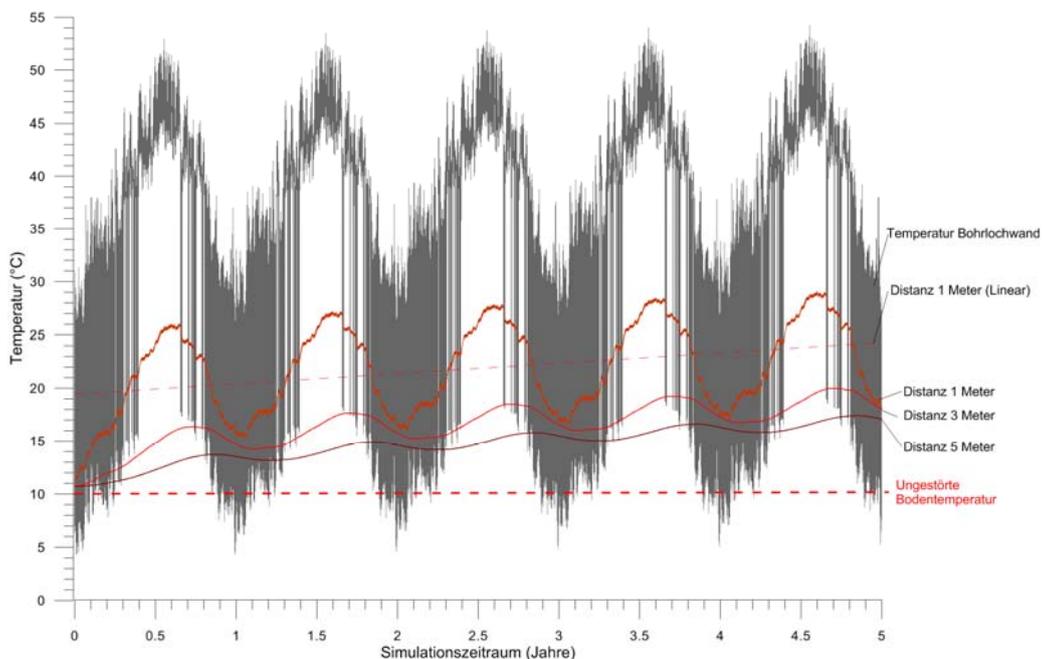


Abbildung 6: Temperaturen in unterschiedlichen Distanzen von der Sonde

Eine weitere wesentliche Fragestellung betrifft die zu erwartenden Temperaturniveaus bzw. deren Bandbreite am Verdampfer der Wärmepumpe während des Heizbetriebs, da dies einen großen Einfluss auf die insgesamt erreichbare Effizienz des Systems hat. In Abbildung 7 ist diesbezüglich ein Histogramm der Rücklauftemperaturen von der Sonde in die Wärmepumpe auf Grundlage des kombinierten Heiz- und Speicherbetriebs dargestellt. Zwecks Vereinfachung wurden etwaige Temperaturänderungen infolge von Leitungsverlusten zwischen Sonde und Wärmepumpe vorerst vernachlässigt. Es zeigt sich, dass die Wärmepumpe für einen Temperaturbereich von -2°C bis $+18^{\circ}\text{C}$ ausgelegt werden muss, wobei das mittlere Temperaturniveau bei $+9^{\circ}\text{C}$ liegt. Eine Direktversorgung des Heizkreislaufes ohne einer Wärmepumpe ist in diesem Fall nicht möglich.

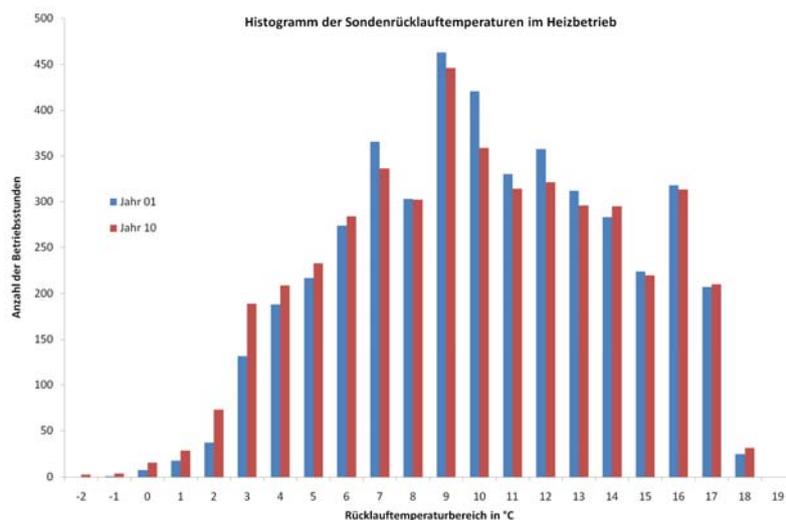


Abbildung 7: Histogramm der Temperaturniveaus am Rücklauf der Sonde im kombinierten Heiz- und Speicherbetrieb nach einem und 10 Betriebsjahren.

Abbildung 8 zeigt abschließend die Simulationsergebnisse eines Sondenfeldes von 3 Sonden, die um eine zentrale mittlere Sonde angeordnet sind. Diese Geometrie ist nach aktuellem Erkenntnisstand die Konstellation mit der geringsten Sondenzahl, in der noch ein sehr hoher Speicherwirkungsgrad erreicht werden kann.

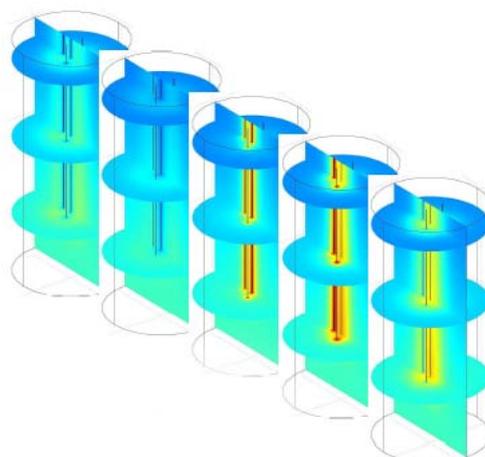


Abbildung 8: jahreszeitlicher Verlauf der Temperaturverteilung in einem Sondenfeld vom Hochwinter (links) bis in den Herbst (rechts); Quelle: Geologische Bundesanstalt

4 Zusammenfassung und vorläufige Schlussfolgerungen

Angesichts der vorläufigen Ergebnisse und der recherchierten Pilot- und Demonstrationsanlagen in Europa kann davon ausgegangen werden, dass eine prinzipielle technische Machbarkeit des GEOSOL-Modellsystems gegeben ist. Die Wirtschaftliche Machbarkeit des Modellsystems hängt jedoch von einigen Erfolgsfaktoren ab, welche im Einzelfall geprüft und bewertet werden müssen. Basierend auf den bereits verfügbaren Ergebnissen können folgende generell gültigen Aussagen getätigt werden:

- Herkömmliche horizontale Erdkollektoren sind aufgrund ihrer hohen Oberflächenverluste für die saisonale Wärmespeicherung ungeeignet. Die hohen Verluste zur Oberfläche hin könnten aus technischer Sicht mit großflächigen Wärmedämmmaßnahmen deutlich reduziert werden, was jedoch ein wirtschaftliches Problem darstellt. Des Weiteren müssten entsprechend gedämmte horizontale Erdkollektoren auch gegen die Durchdringung von Oberflächenwasser geschützt werden, da sonst ein zusätzlicher Wärmeverlust auftritt. Die Anwendung dieses Konzeptes bleibt somit auf Spezialfälle beschränkt (z.B. Aktivierung des Bodens unter einem Gebäude) und wird deshalb als Option für das GEOSOL-Modellsystem ausgeschieden (vgl. Nußbicker et al., 2004).
- Vertikale Sonden bis 120 Meter Tiefe sind für die saisonale Wärmespeicherung prinzipiell geeignet, wobei der Einfluss von Grundwasserleitern erst untersucht werden muss. Die untersuchten Systeme „Doppel-U-Rohr-Sonde“ und „Koaxialsonde“ weisen hierbei vergleichbare Wärmeübertragungsleistungen auf.
- Eine thermische Übersättigung des Sondennahfeldes (Bohrlochwand) tritt im Ladebetrieb voraussichtlich nicht auf. Die thermische Speicherleistung („Schluckfähigkeit“) der Sonden ist in praxisrelevanten Fallbeispielen ausreichend.
- Eine vertikale Einzelsonde weist hohe Verluste in das umgebende Gebirge auf. Durch die saisonale Verschiebung von Beladung und Entladung können Teile der ablaufenden Wärmewelle nicht mehr wieder gewonnen werden. Eine Lösung dieses Problems besteht in der Errichtung von Sondenfeldern. Ein Sondenfeld ermöglicht im Vergleich zu einer Einzelsonde eine deutliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrades, da die horizontal ablaufende Wärmewelle einer Ladesonde von den Entladesonden „eingefangen“ werden kann. In der optimalen dynamischen Ansteuerung der Sonden in einem Sondenfeld (kurz-, mittel- und langfristige Lade- und Entladestrategien) liegt voraussichtlich ein sehr hohes Potenzial zur Maximierung des Jahres-Gesamtwirkungsgrades.
- Vertikale Einzelsonden weisen ein hinreichendes Ladeverhalten auf, die deutlich geringere maximale Entladeleistung macht jedoch voraussichtlich ebenfalls ein Sondenfeld mit z.B. 4 oder mehr korrespondierenden Sonden erforderlich.
- Die saisonale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärmewelle im Untergrund lässt eine kompakte Anordnung von mehreren Sonden auch auf kleiner Grundfläche zu. Die Sondenabstände bewegen sich angesichts der aktuellen Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der geologischen Situation im Bereich von einzelnen Metern.

- Existierende rechtliche Rahmenbedingungen für thermische Einträge in den Untergrund werden bei den aktuellen Simulationen maximal im Nahfeld der Bohrlochwand überschritten. Hierbei wird noch geklärt, inwiefern eine Anpassung der Vorschriften (sofern keine ökologischen oder geotechnischen Aspekte dagegen sprechen) eine effizientere Nutzung des geothermischen Wärmespeichers ermöglichen würde.
- Die von den SchülerInnen der HTL Wr. Neustadt untersuchten Fallstudien weisen teilweise günstige Systemeigenschaften auf und werden in Hinblick auf mögliche Pilot- und Demonstrationsanlagen für eine Vertiefung und Detailanalyse herangezogen.
- Eignungsparameter für Gebäudestrukturen, welche sich für das GEOSOL Modellsystem eignen, sind ein geringer Heizungsvorlauf-Temperaturbedarf sowie ein nicht zu geringer Wärmebedarf. Außerdem muss an den Gebäuden ein ausreichendes Flächenpotenzial für solarthermische Kollektoren verfügbar und ausreichend Raum für die Sonde bzw. das Sondenfeld vorhanden sein. Ein gewisser Wärmebedarf der Gebäude im Modellsystem ist aus Wirtschaftlichkeitsgründen erforderlich, da sonst bei z.B. Niedrigstenergiegebäuden aus den erforderlichen Investitionen ein nicht wettbewerbsfähiger Wärmepreis resultieren würde. Optimal geeignet erscheinen sanierte oder zu sanierende Gebäudestrukturen mit einem nicht zu geringen Volumen, einem guten Wärmeschutz und einem Niedertemperatur-Wärmeverteilsystem. Der erforderliche Mindest-Wärmebedarf ist bei großvolumigen Gebäuden (Mehrfamilienhäuser) und bei dicht verbauten Strukturen (z.B. geschlossener Bauweise) in der Regel gegeben. Ein weiterer interessanter Gebäudecluster sind Gebäude mit bestehender Sole-Wasser Wärmepumpenanlage mit einer vertikalen Sonde als Wärmequellensystem. Bei dieser Gruppe sollte es möglich sein, durch geringe Zusatzinvestitionen eine große Steigerung der Jahresarbeitszahl der bestehenden Wärmepumpenanlage zu erreichen. Die saisonale Energiespeicherung dürfte bei diesem Cluster jedoch auf Grund der oftmals anzutreffenden Einzelsonden nur mit höheren Verlusten möglich sein. Streusiedlungen mit Niedrigstenergiehäusern, Passivhäusern oder Gebäude mit hohem Heizungsvorlauf-Temperaturbedarf sind dagegen für die Anwendung des GEOSOL Modellsystems ungeeignet.
- Das GEOSOL Modellsystem ist im statischen Vergleich zu einer dezentralen Wärmebereitstellung mit Ölkesseln unter der Annahme konstanter Strom- und Ölpreise wirtschaftlich wettbewerbsfähig. Die Kostenstruktur ist dabei beim GEOSOL-Modellsystem investitionslastig, beim Ölkessel-Vergleichssystem stehen die Brennstoffkosten im Vordergrund. Die Investitionslastigkeit des GEOSOL Modellsystems stellt unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einen Nachteil für das System dar, dem mit Finanzierungs- u. Contracting Modellen begegnet werden kann.
- Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse kann bei einer wirtschaftlichen Darstellbarkeit des Gesamtsystems von einem hohen zukünftigen Marktpotenzial für das GEOSOL Modellsystem ausgegangen werden.

5 Literatur

ALANNE K. & PAATERO J. (2008), Seasonal Heat Storages and residential micro-cogeneration. In proceedings of the 1st International Conference on Micro-Generation and Application, Ottawa Canada, April 29 – May 1 2008.

BAUER D. ET AL. (2007), Der Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim. Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik.

BRIX F., PLÖCHINGER B. FUCHS G., 1982, Geologische Karte der Republik Österreich, 1:50.000, Blatt 76 Wiener Neustadt. – Geol. B. –A., Wien.

GLÜCK Bernd (2008), Simulationsmodell “Erdwärmesonden”, open report 2008.

MANGOLD D. (2011), Baukonzepte für große thermische Energiespeicher. Vortrag an der 2. Fachtagung Wärmespeicher, Messe Stuttgart am 10.02.2011.

NIEDERBRUCKNER Richard (2011), Erkenntnisse aus faseroptischen Temperaturmessungen in Erdwärmesonden, talk at VDI-forum in Linz, April 2011

NUßBICKER J., MANGOLD D., HEIDEMANN W. & MÜLLER-STEINHAGEN H. (2004), Bau und Betrieb eines Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm-Amorbach, 8. Geothermische Fachtagung, 10.-12.11.2004, Landau/Pfalz.

REUß M. (2011), Wärmespeicherung im Untergrund – Aquifer- und Erdwärmesonden-Speicher.

STRYI-HIPP G. ET AL. (2007), GroSol – Studie zu großen Solarwärmeanlagen, Bundesverband Solarwirtschaft e.V. November 2007.