

Block 2 - Erdsonden, Aquiferspeicher

WÄRME- UND KÄLTESPEICHERUNG IM GRÜNDUNGSBEREICH ENERGIEEFFIZIENTER BÜROGEBÄUDE

Christian Sasse, Herdis Schnürer, M. Norbert Fisch
Institut für Gebäude- und Solartechnik .- Technische Universität Braunschweig
Mühlenpfordtstr. 23, D-38106 Braunschweig
Tel.: +49-531-391-3557, Fax: +49-531-391-8125
E-Mail: sasse@igs.bau.tu-bs.de, schnuerer@igs.bau.tu-bs.de

1 Einführung

Im Projekt „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich von energieeffizienten Bürogebäuden“ werden Erdwärmesonden-, Energiepfahl- oder Fundamentabsorber-Anlagen zur Wärme- und Kälteversorgung im Gründungsbereich von Bürogebäuden untersucht (Abbildung 1). WKSP nutzt die Methode eines großen Feldversuchs, um durch Kombination von in der Praxis gewonnen Erkenntnissen und Erfahrungen von Planern, Bauherren und Betreibern mit der wissenschaftlichen Analyse fundierte Planungsbausteine zu schaffen sowie einen effizienteren, nutzerorientierten Betrieb bestehender und zukünftiger Anlagen zur Wärme- und Kälteversorgung zu realisieren.

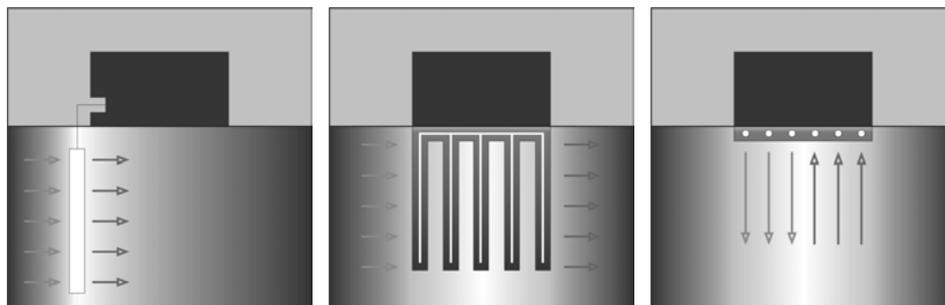


Abbildung 1 - Prinzipschema von Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund, von links nach rechts: Erdwärmesondenspeicher, Energiepfahlanlage und Fundamentabsorber

Die Reduzierung von Bewirtschaftungskosten und die Steigerung von Energieeffizienz und Nutzerkomfort sind selbstverständliche Ziele im Planungsprozess von Bürogebäuden. Aus diesem Grundsatz heraus werden seit Mitte der neunziger Jahre in Deutschland immer mehr Bürogebäude mit Energiepfahl-, Erdwärmesonden- oder Fundamentabsorber-Anlagen zur Wärme- und Kälteversorgung gebaut. Die Entwicklung der Systemkonzepte für diese Gebäude und die Auslegung der Anlagen erfolgt jeweils angepasst an die geologischen Verhältnisse, die Baukonstruktion sowie den Wärme- und Kältebedarf des Gebäudes. Bis heute kommt in der Planung hochkomplexe Simulationssoftware zum Einsatz. Einfache Planungsbausteine stehen für eine breite Nutzung derzeit nicht zur Verfügung. Zur Entwicklung solcher Planungswerkzeuge fehlen systematische Untersuchungen von ausgeführten Anlagen.

Das vom BMWi geförderte Forschungs- und Entwicklungsprojekt WKSP soll diese Lücke durch messtechnische Begleitung sowie Analyse der Energieeffizienz und des Betriebsverhaltens dieser speziellen Anlagentechnik zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund schließen. Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse und die Dokumentation von erfolgreichen Konzepten und Optimierungspotenzialen helfen sowohl den Bauherrn, da sie eine optimale Betriebsweise ihres Gebäudes schnell und dauerhaft erreichen als auch allen Akteuren in Architektur und Bauwesen für zukünftige Projekte.

2 Grundlagen – Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund

Eine Möglichkeit zur Erschließung der Wärme- und Kältespeicherfähigkeit des Untergrunds besteht in im unmittelbaren Umfeld oder unterhalb des Gebäudes abgeteufte Erdwärmesondensysteme. Um Synergieeffekte zu nutzen und Kosten sowie Arbeitsaufwand zu reduzieren, kommt darüber hinaus oftmals die Gebäudegründung in Verbindung mit dem umgebenden Erdreich zum Einsatz. In der Regel werden Pfahlgründungen oder Fundamentplatten als Wärmeübertrager zum Einspeichern von thermischer Energie in den Untergrund zu „Energiepfählen“ bzw. „Fundamentabsorbern“ aktiviert. Gründungsstatische Gesichtspunkte begrenzen in diesen Fällen die Wärme übertragende Fläche.

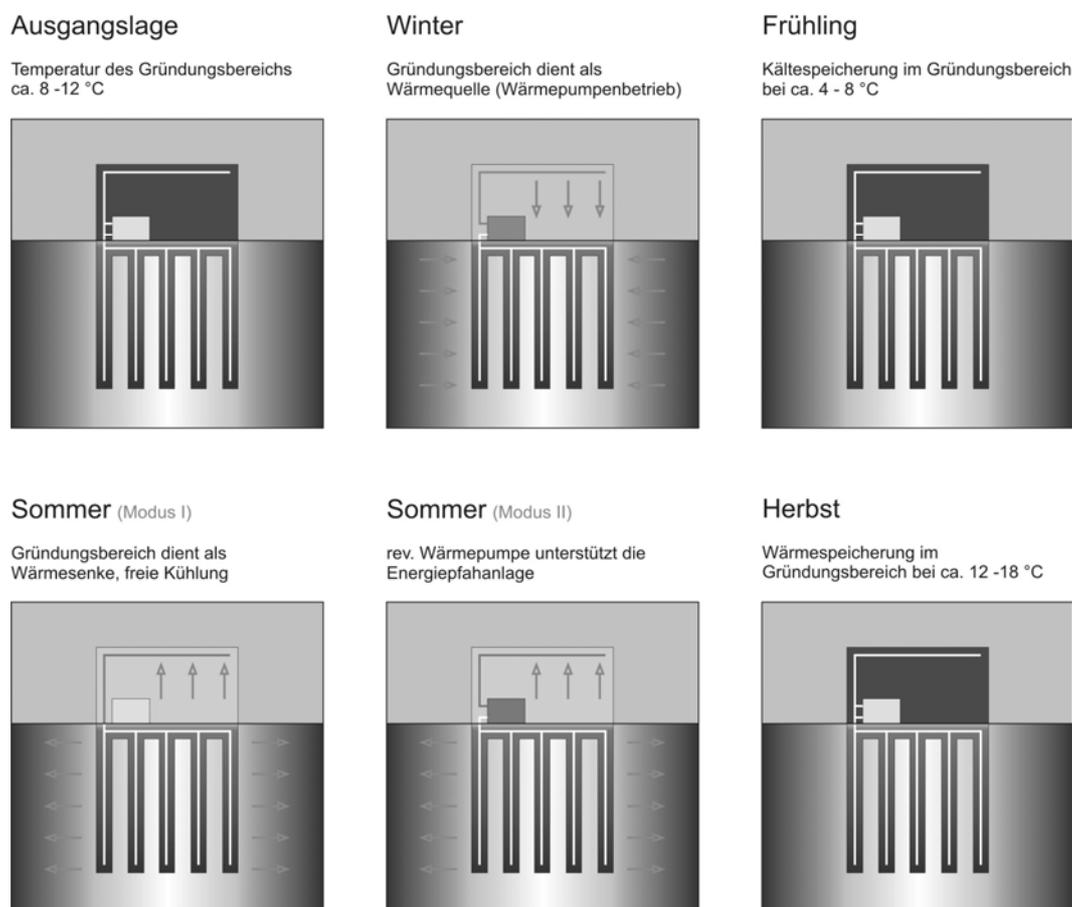


Abbildung 2 - Prinzipschema saisonale Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund

Bei der thermischen Nutzung des Erdreichs zum Heizen und Kühlen von Gebäuden wird im saisonalen Wechsel über ein in Rohrschleifen zirkulierendes Wärmeträgerfluid Wärme aus dem Boden entzogen bzw. in den Boden eingetragen (Abbildung 2).

Da während der Heizperiode das Temperaturniveau im Erdreich zur Beheizung von Gebäuden nicht ausreicht, wird das im Erdreich erwärmte Trägermedium mit einer zwischengeschalteten Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau angehoben und dann dem Bauwerk zu Heizzwecken zugeführt. Der stetige Wärmeentzug im Winter führt zum Auskühlen des Erdreichs und bildet eine Wärmesenke.

Im Sommer wird das niedrige Temperaturniveau zum Kühlen des Gebäudes genutzt. Dieses geschieht im Idealfall im „Free-Cooling“-Betrieb (Freier Umlaufbetrieb über trennenden Wärmeübertrager) eventuell unterstützt durch eine Kältemaschine. Das im Gebäude erwärmte Wärmeträgerfluid wird im Erdreich wieder heruntergekühlt und bildet damit den Grundstock der Wärmespeicherung im Gründungserdreich.

Bei der energetischen Bewirtschaftung des Erdreichs mit den beschriebenen Systemen spielen folgende Einflussfaktoren eine Rolle:

- Energiekonzeption des Bauwerks
- Anordnung, Abstand, Geometrie, Herstellungsart und Betoneigenschaften der Pfähle, Schlitzwände, Erdwärmesonden usw.
- Klimatische Bedingungen
- Bodenphysikalische Eigenschaften
- Thermische Bodeneigenschaften
 - Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Sättigungsgrad, Porenanteil und Wichte
 - Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur des Bodens
- Hydrogeologische Eigenschaften des Untergrundes
 - Tiefe und Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels
 - Grundwasserströmung und Fließgeschwindigkeit

Das Temperaturniveau bei der kombinierten Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund liegt zwischen minimal 4 °C und maximal 20 °C. Die Speichertemperatur weicht somit nur geringfügig von der durchschnittlichen Erdreichtemperatur von 8-12 °C im Bereich der ersten 20 m Untertiefe ab. Aufgrund dieses Temperaturniveaus bieten sich für eine Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund ein Wärmepumpengestütztes Heizen und ein Kühlen des Gebäudes mittels thermisch aktivierter Bauteile (TAB) an.

Bedingt durch niedrige Systemtemperaturen von thermisch aktivierten Bauteilen (Heizen: 25/23 °C, Kühlen: 19/21 °C) ist eine Jahresarbeitszahl β_a der Wärmepumpe von 4 erreichbar (β_a = jährl. Nutzleistung Wärme/Elektrische Leistungsaufnahme, vgl. VDI 2067).

3 WKSP Objektübersicht

Umgesetzt wurden in Deutschland mittlerweile eine ganze Reihe von Büro- und Verwaltungsgebäuden, die das Erdreich zur saisonale Wärme- und Kältespeicherung nutzen. Im am IGS laufenden Forschungsprojekt WKSP werden neun Bürogebäude und eine Bibliothek untersucht. Davon werden die nachfolgend in Tabelle 1 aufgeführten fünf Gebäude messtechnisch genauer erfasst. Vertreten sind im Projekt sowohl Gebäude mit Erdsondenspeichern, mit Energiepfahlanlagen als auch mit Fundament- bzw. Bodenabsorbbern.

Tabelle 1 : Gebäude- und Anlagendaten einiger der im Forschungsprojekt WKSP untersuchten Gebäude

VW-Bibliothek der TU- und der UdK-Berlin 	
Nutzung / Nutzfläche	Bibliothek / 34.000 m ² (Fertigstellung 2004)
Anlagentyp	8.000 m ² horizontaler Fundamentabsorber für Heiz- und Kühlzwecken über Betonkerntemperierung
Heizleistung	80 kW Wärmepumpe (Grundlastversorgung)
Kühlleistung	100 kW Freie Kühlung (Grundlastversorgung)
NORD-LB, Hannover 	
Nutzung / Nutzfläche	Bürogebäude / 1.400 Arbeitsplätze / 73.334 m ²
Anlagentyp	122 Energiepfähle zu Heiz- und Kühlzwecken über Betonkerntemperierung
Heizleistung	155 kW Wärmepumpe (Grundlastversorgung)
Kühlleistung	128 kW Freie Kühlung (Spitzenlastdeckung)

VGH-Versicherung, Lüneburg 	
Nutzung / Nutzfläche	Bürogebäude / 3.500 m ² (Fertigstellung 2002)
Anlagentyp	98 Energiepfähle zu Heiz- und Kühlzwecken über Betonkerntemperierung und raumluftechnischen Anlagen
Heizleistung	90 kW Wärmepumpe
Kühlleistung	60 kW Freie Kühlung (Grundlastversorgung)
Rickmers Rederei, Hamburg 	
Nutzung / Nutzfläche	260 Arbeitsplätze / 9920 m ² (Fertigstellung 2002)
Anlagentyp	17 Erdwärmesonden (Tiefe: 100 m) zu Heiz- und Kühlzwecken über Betonkerntemperierung und raumluftechnische Anlagen
Heizleistung	90 kW Wärmepumpe (Grundlastversorgung)
Kühlleistung	60 kW Freie Kühlung (Grundlastversorgung)
EnergieForum Berlin, Berlin 	
Nutzung / Nutzfläche	Bürogebäude / 21.200 m ² (Fertigstellung 2003)
Anlagentyp	198 Energiepfähle (Tiefe: 8.50 m) zu Heiz- und Kühlzwecken über Betonkerntemperierung
Heizleistung	107 kW Wärmepumpe (Grundlastversorgung von Gebäudebereichen)
Kühlleistung	60 kW Freie Kühlung (Grundlastversorgung von Gebäudebereichen)

Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen



Nutzung / Nutzfläche	Bürogebäude / 20.000 m ² (Fertigstellung 2003)
Anlagentyp	48 Energiepfähle (Tiefe: 150 m) zur Versorgung von Heiz- und Kühldecken
Heizleistung	320 kW über 2 Wärmepumpen (Grundlastversorgung)
Kühlleistung	260 kW (Grundlastversorgung)

3.1 Projektbeispiel – EnergieForum Berlin

Ein Gebäude mit Energiepfahlanlage zur Wärme- und Kältespeicherung ist beispielsweise das EnergieForum in Berlin. 198 Gründungspfähle mit einer durchschnittlichen Länge von 8,50 m werden als geothermisches Heiz- und Kühlsystem in Verbindung mit einer Wärmepumpe und der Betonkerntemperierung des Gebäudes genutzt (vgl. Abbildung 3).

Beim EnergieForum Berlin wurde im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts Solarbau:Monitor bereits seit der Inbetriebnahme 2003 ein Gebäude- und Anlagenmonitoring durchgeführt, welches nun innerhalb des Forschungsprojekts WKSP fortgesetzt wird. Das EnergieForum stellt innerhalb des Projekts WKSP somit das Objekt dar, für das die meisten Betriebserfahrungen als auch Messdaten vorliegen. Aus dem Monitoring wurden seit der Inbetriebnahme zahlreiche Optimierungsmaßnahmen für den Anlagenbetrieb abgeleitet. Dennoch zeigt sich bis heute, dass der Anlagenbetrieb, speziell auch die Nutzung der vorhandenen Energiepfahlanlage, weiterhin Optimierungspotenziale in sich birgt.

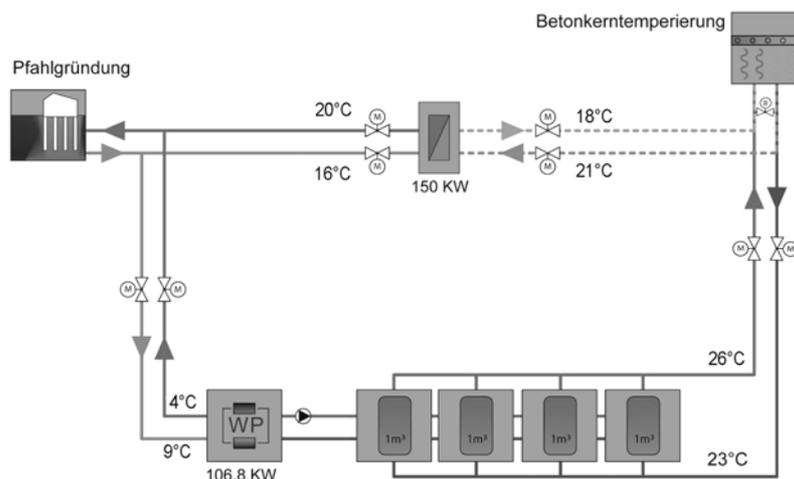


Abbildung 3 - Funktionsschema der Energiepfahlanlage des Energieforums Berlin. Die Leistungsangaben stellen die maximalen Auslegungswerte dar.

Die Energiepfahlanlage versorgt im Heizfall 4.100 m² und im Kühlfall ca. 460 m² Betonkernaktivierung (BKT). Im Kühlfall wird eine kleinere BKT-Fläche versorgt, da für eine Gesamtversorgung der BKT die Leistungsfähigkeit der Energiepfahlanlage nicht ausreicht.

Wie aus der Abbildung 4 ersichtlich, führten Fehler in der Hydraulik sowie falsche Regelstrategien der BKT anfänglich zu einem unkontrollierten Wärmeentzug und -eintrag. Im Juni 2004 wurden die Regelstrategien der Gebäudeleittechnik mit Hilfe des IGS umgestellt, seither findet ein kontrollierter Wechsel zwischen Wärmeentzug und Eintrag statt. Dennoch wurde die in der Planung angestrebte ausgeglichene Energiebilanz der Energiepfahlanlage mit einem Wärmeentzug bzw. -eintrag von ca. 80 MWh pro Saison bisher nicht erreicht. Trotz größerem Wärmeentzug als Wärme eintrag wurden während der Kühlperioden 2004 bis 2006 schon nach Zweidrittel der

Kühlphase Austrittstemperaturen aus dem Erdreich von 18,5 °C erreicht. Das Kältepotenzial des Untergrunds scheint schneller erschöpft, als ursprünglich in der Planung angenommen. Eine allgemein höhere Grundwasser- bzw. Erdreichtemperatur sowie ein von den Planungswerten abweichender Grundwasserstrom, der zu wenig Wärme aus dem Untergrund abführt oder auch Wärme aus der Umgebung nachführt, können mögliche Ursachen sein. Eine weitere Ursache könnte unter anderem eine Langzeitfolge der ersten Anlageninbetriebnahme im Sommer 2003 ohne einen vorhergehenden Wärmeentzug sein. Aufgrund des anfänglich fehlenden Kältepotenzials ist es möglicherweise zu einer deutlichen Erwärmung des Untergrundes gekommen.

Da vergleichbare Probleme auch bei den anderen untersuchten Objekten auftreten, ist die Bedeutung einer sorgfältigen Voruntersuchung sowie -planung, Ausführung, Bauabnahme und Inbetriebnahme zu betonen.

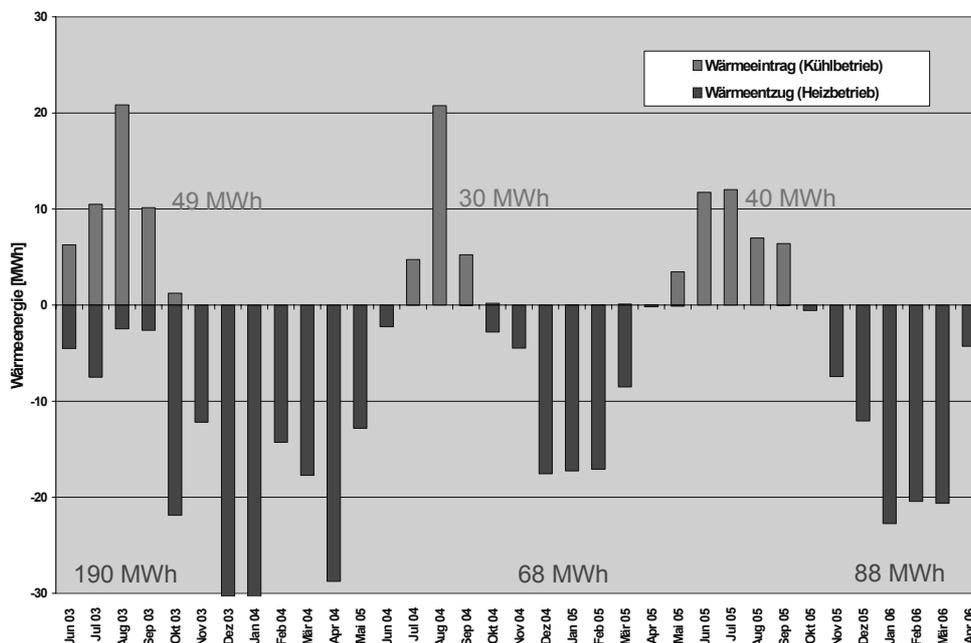


Abbildung 4 – Monatlicher Wärmeeintrag und -entzug aus dem Erdreich durch die Energiepfahlanlage, Juni 2003 bis April 2006.

4 Allgemeine Betriebserfahrungen und Monitoringergebnisse

Die Erfahrungen des Forschungsprojekts WKSP zeigen, dass es möglich und sinnvoll ist Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund in innovative Energiekonzepte von Büro- und Verwaltungsgebäuden zu integrieren.

Die Anlagen sollten mit Niedertemperatur Heiz- und Hochtemperatur Kühlsystemen wie Thermische Bauteilaktivierungen (TBA) oder Heiz- und Kühldecken kombiniert werden. Erdgekoppelte Wärmepumpen arbeiten in Kombination mit diesen Systemen sehr effizient und erreichen hohe Jahresarbeitszahlen. Im Kühlfall ist zu beachten, dass Hochtemperatur Kühlsysteme (Temperatur des Kühlmediums 17 bis 22 °C) moderne Fassaden benötigen, die die externen Lasten draußen halten.

Um einen langfristigen Betrieb sicherstellen zu können, ist eine ausgeglichene saisonale Energiebilanz der Anlagen von großer Bedeutung. Wichtig ist, dass die erste Inbetriebnahme der Anlage in einer Heizperiode liegt. Während der Heizperiode muss dem Erdreich genügend Wärme entzogen werden, um für den Betrieb im Sommer eine Wärmesenke mit ausreichend niedrigem Temperaturniveau gewährleisten zu können, so dass auch zum Ende des Sommers noch genügend Kühlleistung für den freien Kühlbetrieb zur Verfügung steht.

Neben der Tatsache, dass in Bürogebäuden der Kältebedarf in der Regel deutlich größer ist als der Wärmebedarf, hat sich in der Praxis die Kombination von trägen Heizsystemen wie der thermischen Bauteilaktivierung mit deutlich flinkeren Heizsystemen wie der statischen Heizung als problematisch herausgestellt. Die träge thermische Bauteilaktivierung wird in der Regel zur Grundlastdeckung herangezogen und zur Abdeckung von Spitzen mit flinken Systemen wie der statischen Heizung kombiniert. Da das flinke System deutlich schneller auf Temperaturänderungen reagieren kann, besteht die Gefahr, dass die träge Bauteilaktivierung nur selten zum Zuge kommt und dem Erdreich deutlich weniger Wärme entzogen wird als erforderlich und in der Planung angenommen. Um das außer Kraft setzen der trägen Betonkerntemperaturierung durch flinkere Systeme zu vermeiden, müssen entweder entsprechende Regelstrategien vorgesehen oder die beschriebenen Hybridsysteme ganz vermieden werden.

Für die Regelung ebenfalls sehr wichtig ist, dass der Betrieb in den Übergangszeiten Frühling und Herbst richtig in den Regelstrategien Berücksichtigung findet. Während dieser Zeit führen fehlerhafte Regelstrategien häufig zu Problemen im Betrieb. Nicht selten kommt es vor, dass das Gebäude in der Nacht über die thermische Bauteilaktivierung beheizt wird und am Tage aufgrund der internen Lasten im Gebäude wieder heruntergekühlt werden muss. Die Folge ist ein unnötiger Energieverbrauch für den Betrieb von Wärme- und Umwälzpumpen. Vermieden wird dieses Problem durch ein Totband beispielsweise für einen Bereich der über 72 Stunden gemittelten Außentemperatur, bei dem weder geheizt noch gekühlt wird.

Insgesamt zeigt das durchgeführte Forschungsprojekt, dass ein optimaler Betrieb während der ersten Zeit in der Regel nicht gleich erreicht wird. Es bedarf einer deutlichen Einregulierungsphase, während der das direkte Zusammenspiel zwischen Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund mit dem Gebäude, weiteren Anlagen zur thermischen Konditionierung und nicht zuletzt den Nutzern optimiert wird. Fehlende Erfahrungen bei ausführenden Firmen und den Betreibern der Anlagen verlängern diese Einregulierungsphase häufig deutlich. Aufgrund ihrer Trägheit reagieren die beschriebenen Anlagen auf Betriebsfehler und Störungen sehr sensibel, so dass diese langfristige Folgen haben können. Um Fehler im Betrieb zu vermeiden, sollten Regelstrategien doppelt geprüft und der Betrieb bis zum Erreichen des Regelbetriebs messtechnisch begleitet werden.

5 Fazit und Ausblick

Das seit Juli 2005 am IGS laufende Forschungsprojekt „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Gebäude“ und die damit verbundene messtechnische Begleitung von Gebäuden und deren Anlagen zeigen, wie

wichtig es ist, die tatsächliche Funktion von Gebäuden und Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich zu dokumentieren. Entscheidend für den erfolgreichen Betrieb ist in der Regel nicht die Anlage zur Wärme- und Kältespeicherung an sich, sondern die sinnvolle technische und betriebliche Einbindung der Anlage in das komplexe Gesamtsystem aus Anlagen, Gebäude und Nutzer. Bei den fünf im Rahmen von WKSP messtechnisch begleiteten Anlagen und Gebäuden konnten in Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement Fehler Schritt für Schritt aufgedeckt, der Betrieb optimiert und die Einregulierungsphase verkürzt werden. Ziel ist es, die Erfahrungen für zukünftige Projekte zu bündeln, Planungswerkzeuge zu optimieren sowie Betriebsregeln zu entwickeln. Zur Erlangung einer vollen Nutzerakzeptanz und besserer Kosteneffektivität von Erdsondenspeichern, Energiepfahlanlagen und Fundamentabsorbbern besteht allerdings weiterhin Optimierungs- und Entwicklungsbedarf.

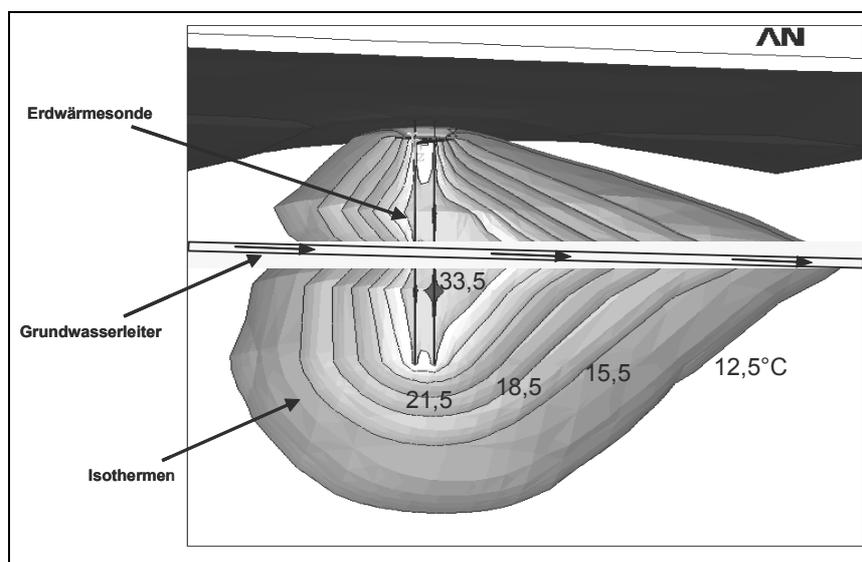


Abbildung 5 – Ein mit ANSYS simuliertes Temperaturfeld um eine Erdwärmesonde. Dargestellt ist die Verschleppung des sich um die Erdwärmesonde einstellenden Temperaturfeldes durch einen linienförmigen Grundwasserleiter.

So ist beabsichtigt, im Rahmen einer WKSP Projektfortsetzung weitere drei Gebäude mit dem Schwerpunkt auf die Temperaturen im Untergrund messtechnisch zu erfassen, um Abweichungen zwischen simulierten und in der Realität gemessenen hydrogeologischen Randbedingungen genauer untersuchen zu können. Klare Differenzen wurden bei den prognostizierten und den gemessenen Untergrundtemperaturen zum Zeitpunkt der Anlageninbetriebnahme festgestellt. Da zurzeit noch nicht alle wesentlich beeinflussenden hydrogeologischen Randbedingungen in Simulationen Berücksichtigung finden, sollen in den nächsten Monaten die im Projekt gewonnenen Monitoringergebnisse mit dynamischen Gebäude- und Anlagensimulationen verknüpft werden. Um durch Grundwasserströmung induzierte Temperaturverschleppungen besser in Simulationen abbilden zu können, wird momentan an einer Kopplung der Simulationsprogramme TRNSYS und ANSYS gearbeitet. Die Simulationen sollen mit Hilfe der im Erdsondenfeld des „Neuen Regionshauses Hannover“ vorhandenen Temperatursensoren validiert werden. Hier wurden im August und September 2006 an drei der zwölf Erdwärmesonden Temperaturfühler auf verschiedenen Höhen ent-

sprechend der anstehenden Schichtung verbaut. Eine vierte Messbohrung wird in 20 m Entfernung vom Erdwärmesondenfeld abgeteuft. Hierüber soll die Verschleppung von Wärme aus dem Erdwärmesondenfeld durch den Grundwasserfluss im ungestörten Fall und während des Betriebs dokumentiert werden.

6 Literatur

N. Fisch, M. Bodmann, L. Kühl, C. Sasse, H. Schnürer, Köln 2005, BINE Informationsdienst Wärmespeicher, ISBN 3-8249-0853-0

Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Berlin Sept. 2000, VDI-Richtlinie 2067

ERDWÄRMESONDEN ALS GEOTHERMISCHE WÄRMEÜBERTRAGER. TECHNOLOGIE UND PLANUNGSWERKZEUGE

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff
Hochschule Biberach
Karlstraße 11, 88400 Biberach
Tel.: +49-7351 / 58 22 55, Fax: +49-7351 / 58 22 99
E-Mail: koenigsdorff@fh-biberach.de

Dipl.-Phys. Manfred Reuß
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. - ZAE Bayern
Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching
Tel.: +49-89 / 329 442-30, Fax: +49-89 / 329 442-23
E-Mail: reuss@muc.zae-bayern.de

1 Einleitung

Erdwärmesonden ermöglichen die vertikale, Platz sparende Erschließung des Erdreichs für die oberflächennahe geothermische Heizung und Kühlung mit hoher Leistungsdichte. Sie kommen nicht nur für Neubauten in Frage, sondern können auch nachträglich in den Bestand von Gebäuden und Anlagen integriert werden, sofern die geologischen Gegebenheiten, technische oder sonstige Randbedingungen dem nicht entgegenstehen. Durch kompakte Anordnung von Erdwärmesonden-Feldern und entsprechende Betriebsweise ist auch die gezielte Erschließung des Erdreichs als thermischer Speicher möglich. Im Folgenden werden Stand und Trends der Technologien von Erdwärmesonden und der zugehörigen Planungswerkzeuge dargestellt.

2 Technologien von Erdwärmesonden (EWS)

2.1 Bauarten

Im Laufe der technischen Entwicklung wurde eine ganze Reihe von Sondenkonstruktionen vorgeschlagen und gebaut, wobei sich auf dem Markt hauptsächlich drei Typen durchgesetzt haben, siehe Abbildung 1. Die einfachste Bauform ist die Einfach-U-Erdwärmesonde. Zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche werden insbesondere bei reinem Wärmeentzug meist Doppel-U-Sonden verwendet. Dieser Typ dominiert heute den Markt. Die dritte Bauform ist die Koaxialsonde, die in der einfachen Variante aus zwei konzentrischen Rohren besteht. Diese Typen von Erdwärmesonden werden normalerweise in Bohrlöcher eingesetzt.

Darüber hinaus wurden z. B. in Schweden und den Niederlanden Techniken entwickelt, bei denen Sonden in den Untergrund gerammt werden. Voraussetzung ist dabei allerdings, dass sich die Geologie für diese Verfahren eignet (Reuß et al., 2005). Ebenso werden Erdwärmesonden inzwischen in Rammpfähle aus duktilem Gussei-

sen (Amann, 2005) eingebaut. Sonderkonstruktionen verwenden mitunter noch weitere Bauarten bzw. Varianten. Heat-Pipe-Sonden lassen sich mit Einfachrohren realisieren (Kruse et al., 2004), in Koaxialsonden kommen inzwischen auch Wellrohre zum Einsatz (Amann, 2005).

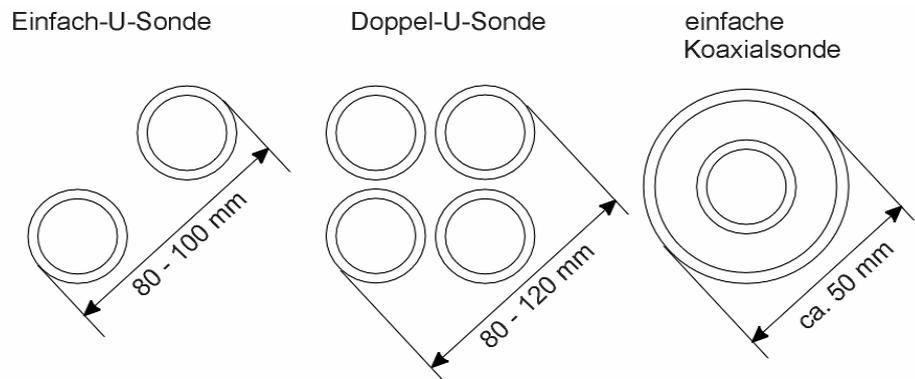


Abbildung 1 - Bauarten von Erdwärmesonden, nach VDI 4640-2 (2001)

2.2 Materialien

Während zu Beginn der Entwicklung Sonden aus Stahl oder Edelstahl verwendet wurden, werden sie heute fast ausschließlich aus Kunststoff gefertigt. Die wichtigsten Materialien sind Polyethylen, Polypropylen und Polybuten. Bei Anlagen mit Direktverdampfung oder den CO_2 -Heat-Pipes wird aus Gründen des Korrosionsschutzes ein kunststoffummanteltes Kupferrohr (Kältequalität) verwendet (Reuß, 2005). Für Niedertemperaturanwendungen wird in der Regel Polyethylen (HDPE) als Rohrmaterial eingesetzt. Bei Wärmespeichern, die für höhere Temperaturen konzipiert sind, kommen Materialien wie vernetztes Polyethylen (PEX) oder Polybuten (PB) zum Einsatz.

Bei Erdwärmesonden ist die thermische Ankopplung der Rohre an das Gebirge von entscheidender Bedeutung und wird durch eine Verfüllung mit einer Bentonit-Zement-Suspension erreicht. Seit einigen Jahren werden auf dieser Basis thermisch verbesserte Verfüllmaterialien auf dem Markt angeboten. Dies wird durch Beimischung von meist mineralischen Materialien mit einer hohen thermischen Leitfähigkeit (Quarzsand oder Graphit) erreicht. Um den Einschluss von Hohlräumen zu vermeiden, muss die Verpressung der Bohrung von unten nach oben erfolgen, wobei das Verfüllrohr im Bohrloch verbleiben muss. Das Verfüllmaterial übernimmt zudem die Abdichtung des Bohrlochs nach oben (Reuß, 2006). Die mechanische und thermische Qualität der Bohrlochverfüllung sowie der zugehörigen Materialien ist nach wie vor Gegenstand von Forschung und Entwicklung.

Bei konventionellen Erdwärmesonden (keine Heat-Pipes oder Direktverdampfung) werden als Wärmeträgerfluide meist Wasser-Glykol-Gemische verwendet, mitunter auch andere organische oder salzhaltige Gemische sowie bei entsprechender Betriebsweise auch Wasser ohne Frostschutzzusatz (z. B. Speicherbetrieb außerhalb des Frostbereichs).

2.3 Systemtechnik und Hydraulik

Die planerisch und ausführungstechnisch korrekte Anbindung der Sonden sowie die Einbindung in die Gesamtanlage sind wichtig für Funktion und Effizienz im Betrieb.

Die Anbindung in dem aus der Heizungstechnik bekannten Tichelmann-System hat zwar den Vorteil eines einfachen hydraulischen Abgleichs, ist bei Erdwärmesonden aber nur bedingt zu empfehlen. Vorteilhaft ist in jedem Falle die direkte Anbindung jeder Sonde an einen (Unter-)Verteiler mit einer Absperrmöglichkeit für jeden Sondenkreis. So kann jeder Sondenkreis einzeln geprüft und entlüftet werden. Auch lässt sich im Falle einer Leckage eines Kreises dieser einfach stilllegen, ohne den Betrieb der restlichen Sondenanlage zu beeinträchtigen.

Neben den korrekten Betriebstemperaturen (z. B. kritische Zustände bei direkter geothermischer Kühlung) ist auch die Frage von Strömungsgeschwindigkeit und Wärmeübergang des Wärmeträgerfluids wichtig. Eine turbulente Strömung (großer umgewälzter Massenstrom) bringt zwar einen sehr guten Wärmeübergang mit sich, allerdings um den Preis eines deutlich höheren Aufwandes an Antriebsenergie für die Umwälzpumpen. Fällt die Antriebsenergie ohnehin kaum ins Gewicht, ist im Regelfall die turbulente Strömung vorzuziehen. Ist dies nicht der Fall, so liegt hinsichtlich des elektrischen Gesamt-Energieaufwandes (Kompressoren der Wärmepumpe plus Umwälzpumpen) eine Optimierungsaufgabe vor. Dabei kann der optimale Betriebspunkt durchaus im Bereich einer laminaren Strömung in den Erdwärmesonden liegen (Koenigsdorff, 2005) - ein Optimierungspotenzial, welches bislang noch nicht regelmäßig untersucht oder genutzt wird.

2.4 Sonderbauarten

Neben der Weiterentwicklung von Komponenten, Materialien und Bausystemen von Erdwärmesonden, deren Wärmeträgerfluid ausschließlich im flüssigen Zustand vorliegt, werden derzeit verschiedene Entwicklungen von direkt verdampfenden Sonden bzw. Heat-Pipes verfolgt, von denen einige bereits am Markt sind. Neben CO₂-Sonden werden z. B. auch Heat-Pipes mit Ammoniak und Propan untersucht (Wagner et al., 2005). Sehr tiefe Sonden erfordern wegen der Aufwärtsströmung der Dampfphase relativ große Rohrdurchmesser. Es sind zwar auch kürzere Sonden mit sehr hoher spezifischer Entzugsleistung möglich, aber um den Preis sehr tiefer Verdampfungstemperaturen. Dies führt neben einer verringerten Leistungszahl der Wärmepumpe auch zu periodischer Frostbildung an der Sonde, mit allen potenziellen Problemen für den Kontakt zum Gebirge und die dauerhafte Dichtheit der Verfüllung. Zunächst eignen sich die klassischen Heat-Pipes nur für den Wärmeentzug (Heizbetrieb mit Wärmepumpe). Eine Heat-Pipe für den Wärmetransport in beiden Richtungen wurde von Bienert et al. (1977) in den USA patentiert.

3 Planungs- und Auslegungswerkzeuge

Kernfrage bei der Bemessung von Erdwärmesonden ist die nach der Leistungsfähigkeit einer bestimmten Sondenkonfiguration bzw. nach der benötigten Anzahl und Länge (Bohrtiefe) von Sonden zur Erbringung einer vorgegebenen Leistung. Auch

wenn Erdwärmesonden im Grundsatz nichts anderes als Wärmeübertrager sind, ist eine Charakterisierung über die spezifische Leistung (Flächenbezug: W/m², bei Erdwärmesonden meist Längenbezug: W/m) bei bestimmten anlagenseitigen Betriebsbedingungen alleine nicht ausreichend. Vielmehr muss zusätzlich die jeweilige Erdreichtemperatur an den Sonden bekannt sein. Diese ist aufgrund der Wärmekapazität des Erdreichs aber von der gesamten thermischen Vorgeschichte, d. h. von der Vergangenheit des Lastverlaufs abhängig. Der Betrieb von Erdwärmesonden ist damit immer ein Speicherlade- und -entladebetrieb, auch wenn es sich nicht um einen Erdwärmesonden-Speicher im engeren Sinne handelt.

3.1 Tabellen und Nomogramme

Für eng eingegrenzte Randbedingungen, wie sie z. B. bei der Beheizung kleinerer Wohnhäuser vorliegen, können die Ergebnisse detaillierter Auslegungsberechnungen in Tabellen oder Nomogrammen dargestellt werden und so als Auslegungsgrundlage dienen. Die Richtlinie VDI 4640, Blatt 2 (2001) enthält Tabellen für Erdwärmekollektoren und kleine EWS-Anlagen (Tabelle 1) sowie für letztere auch ein Nomogramm. Die dort aufgeführten Daten gelten für Fluidtemperaturen, die max. ±10 K von der Temperatur des ungestörten Untergrundes im Dauerbetrieb abweichen (±15 K bei Spitzenlast), und sind in ihrer Gültigkeit u. a. auf Wärmepumpenanlagen mit max. ca. 30 kW Heizleistung beschränkt.

Tabelle 1: Spezifische Entzugsleistungen bei < 30 kW Heizleistung, VDI 4640-2 (2001)

Untergrund	spezifische Entzugsleistung	
	für 1800 Voll-Betriebs-h:	für 2400 Voll-Betriebs-h:
Wärmeleitfähigkeit:		
$\lambda < 1,5 \text{ W/m/K}$	25 W/m	20 W/m
$1,5 \text{ W/m/K} \leq \lambda \leq 3,0 \text{ W/m/K}$	60 W/m	50 W/m
$\lambda > 3,0 \text{ W/m/K}$	84 W/m	70 W/m

3.2 Analytische Methoden

Einzelne Erdwärmesonden können näherungsweise als Linienquellen in einem unendlich ausgedehnten Medium betrachtet werden. Für eine konstante spezifische Wärmeleistung an der Sonde kann das daraus resultierende Temperaturfeld um das Bohrloch, also die Übergangsfunktion, mit Hilfe der Kelvin'schen Linienquellentheorie berechnet werden:

$$T_b(r, t) - T_b(t=0) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r^2/4at}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du.$$

Für das uneigentliche Integral in dieser Gleichung wurden verschiedene Approximationen durch Abbruch der zugehörigen Reihenentwicklung oder unter Verwendung von Polynomen vorgeschlagen, z. B. in VDI 4640-2 (2001):

$$\Delta T = \frac{0.1833 * q}{\lambda} \left[\log_{10} * \frac{at}{r^2} + 0.106 \frac{r^2}{at} + 0.351 \right].$$

Damit lässt sich beispielsweise die thermische Reaktion auf eine kurzzeitige Spitzenleistung mit Wirkungsdauern im Bereich von Stunden bis Tagen am Bohrlochrand ermitteln. Für periodische Lastverläufe, z. B. einen Jahresverlauf, findet sich eine analytische Lösung bei Eskilson, 1987. Weiterhin existieren analytische Lösungen bzw. Ergebnisse numerischer Berechnungen für die Reaktion auf einen langfristigen Netto-Wärmeentzug von mehreren Jahren Dauer (z. B. stationärer Endzustand). Werden diese drei Komponenten (s. Abbildung 2) um den Bohrlochwiderstand ergänzt, der den Wärmetransport vom Wärmeträgerfluid bis zum Bohrlochrand zusammenfasst, ergibt dies eine vollständige analytische Approximation der Temperaturreaktion auf ein jahresperiodisches Lastprofil.

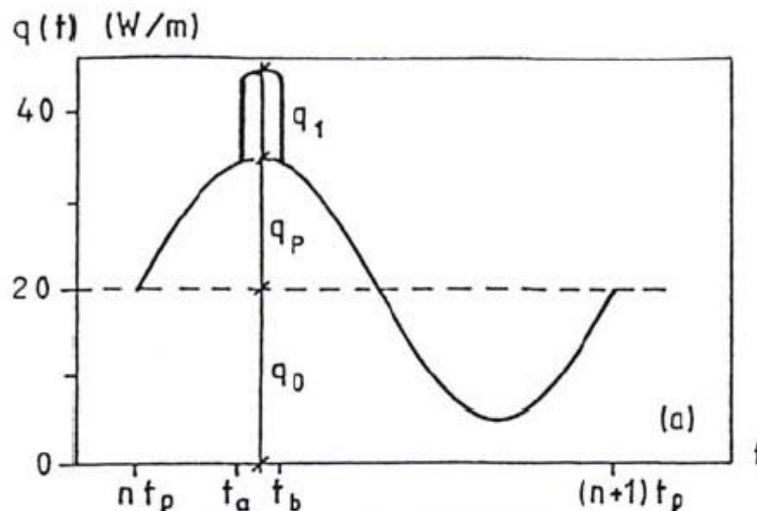


Abbildung 2 - Grund-, Perioden- und Spitzenlastanteile bei EWS, nach Eskilson, 1987

Die in diesem Ansatz verwendeten analytischen Funktionen lassen sich grafisch aufbereiten, so dass ein leicht anzuwendendes Handrechenverfahren entsteht (Koenigsdorff, 2006). Damit kann die bisherige überschlägige Auslegung nach VDI 4640-2 (2001) ergänzt und auf Erdsondenfelder sowie die Kombination von geothermischer Heizung und Kühlung erweitert werden.

3.3 Simulation auf Basis analytischer Ansätze

Ausgehend von den vorstehend erläuterten analytischen Ansätzen sowie mit Hilfe von Ähnlichkeitsbetrachtungen wurden so genannte „g-functions“ (im Prinzip Gewichtsfunktionen) gebildet bzw. aus numerischen Typ-Simulation für EWS-Felder abgeleitet, z. B. von Eskilson (1987). Solche „g-functions“ liegen inzwischen für eine Vielzahl von Sondenkonfigurationen und reine Wärmeleitung im Erdreich vor, nicht jedoch für den Fall eines konvektiven Einflusses (Grundwasserströmung). Für einen festen Zeitschritt der Berechnung (z. B. Monatsschritte) lassen sich damit beliebige zeitvariable Lastverläufe sehr einfach berücksichtigen.

Die Berechnung der Reaktion kurzzeitiger Spitzenlasten, bei denen keine Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Sonden eines Feldes auftreten, kann dagegen mit den oben aufgeführten analytischen Ansätzen für Einzelsonden erfolgen.

Die Kombination dieser beiden Methoden führt zu einfachen, robusten und sehr schnellen Simulationsverfahren, welche z. B. den Programmen EED (Sanner und Hellström, 1996) und GEOSYST (Koenigsdorff et al., 2004) zu Grunde liegen. Komplexität, Eingabeaufwand und Rechengeschwindigkeit derartiger Programme sind so hoch, dass sich damit problemlos Simulationen von Erdwärmesondenfeldern im Planungsalltag durchführen lassen. Diesen Vorteilen stehen allerdings die Nachteile einer geringen Flexibilität (z. B. feste Zeitschrittweite, ausschließlich jahresperiodische Lasten) und Detailschärfe (keine Konvektion, keine Ortsauflösung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes) gegenüber.

3.4 Numerische Simulation

Grundsätzlich lassen sich die thermischen Verhältnisse in Erdwärmesonden-Feldern und Erdwärmesonden-Speichern mit allen gängigen Programmen berechnen, welche mehrdimensionale, dynamische Wärmetransportprobleme (Wärmeleitung und Konvektion) behandeln (Finite Differenzen FD, Finite Volumen FV oder Finite Elemente FE). Die Nachteile der analytisch basierten Simulationen sind dabei prinzipiell vermeidbar. Es sind drei Gruppen von Programmen, die für die numerische Simulation von oberflächennahen geothermischen Systemen eingesetzt werden, zu unterscheiden:

- a) speziell für EWS entwickelte Programme (SBM, TRNSYS-Modul DST usw.),
- b) allgemeine Strömungssimulationsprogramme („general purpose CFD“: z. B. FLUENT, CFX usw.),
- c) geologische Simulationsprogramme (FEFLOW, SHEMAT, SPRING, PLAXIS, usw.), ggf. mit Erweiterungen für Wärmeübertragungssysteme wie Erdwärmesonden.

Diese Programme setzen die Nutzung durch Experten voraus, insbesondere die Anwendung allgemeiner Programme der Gruppen b) und c) auf die speziellen Randbedingungen oberflächennaher Geothermie. Derzeitige Entwicklungen bei einigen FE-Programmen betreffen die Anpassung der Numerik (Diskretisierung) sowie der phy-

sikalischen Randbedingungen an die Gegebenheiten der geothermischen Wärmeübertrager (Leyens et al., 2004).

Außer bei Programmen, die als Module für eine Simulationsumgebung zur Verfügung stehen (z. B. DST in TRNSYS), ist die Kopplung mit bzw. Einbindung in eine Simulationsumgebung, welche z. B. Gebäude und Anlagentechnik abbildet, schwierig oder unmöglich. Es lassen sich zwar u. U. beliebige Lastverläufe einlesen, aber eine iterative Rückkopplung auf das oberirdische System, wie z. B. Wärmepumpe, wird nicht abgebildet.

3.5 Hybride Simulationsverfahren

In der Sonde, d. h. in den Sondenrohren und im verfüllten Bohrloch, sowie in der näheren Umgebung kann eine detaillierte numerische Betrachtung von Vorteil sein, weil dort komplexe Wärmeübertragungsprozesse auf kleinem Raum ablaufen. Die großräumige und vor allem auch längerfristige Interaktion zwischen den Sonden in einem Feld kann dagegen recht gut und mit geringem Aufwand mit Hilfe der „g-functions“ berechnet werden – zumindest, wenn die Beschreibung des Erdreichs zwischen den Sonden als rein Wärme leitendes Material mit einheitlicher und konstanter Wärmeleitfähigkeit hinreichend ist.

Im Programm EWS (Huber, 1999) ist diese Kombination umgesetzt. EWS berechnet die Umgebung um die einzelne Sonde ohne Berücksichtigung der Nachbarsonden numerisch mit einem Finite-Differenzen-Verfahren und koppelt den Rand des Berechnungsgebietes an eine Berechnung des Sondenfeldes „im Großen“ mit „g-functions“.

4 Qualitätssicherung von Erdwärmesonden

Neben einer zu Erdwärmesonden kompatiblen Systemtechnik (Gebäude, Anlage, Betriebskonzept) erfolgt die Sicherung der Qualität von Erdwärmesonden in drei Stufen:

- a) Die fachgerechte Eruiierung der (geologischen) Randbedingungen für Planung und Bohrung ist Aufgabe der Geologen, Baugrundgutachter, Bohrfirmen und Behörden.
- b) Fachgerechte Materialwahl und Ausführung durch die Bohrfirma: Aus der Schweiz kommend gibt es hierfür inzwischen ein Gütesiegel des Bundesverbandes WärmePumpe und anderer Verbände, welches Bohrfirmen erlangen können (BWP, 2006).
- c) Versuchstechnische Qualitätsprüfungen: Neben Druck- und Durchflussprüfungen der Sonden hat sich hierfür vor allem der Thermal Response Test (TRT) etabliert. Beim TRT wird der Sonde über einen bestimmten Zeitraum eine definierte (i. d. R. konstante) thermische Last aufgeprägt und über den gesamten Versuchszeitraum die Temperaturantwort der in der Sonde umgewälzten Wärmeträgerflüssigkeit gemessen. Mit Hilfe einer Approximation der Kelvin'schen Linienquellenlösung lassen sich aus den Messdaten die effektive

Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes sowie der Bohrlochwiderstand ermitteln. Alle diese Prüfungen und Messverfahren sind noch Gegenstand der mess- und modelltechnischen Weiterentwicklung, des Tests sowie der Vereinheitlichung, um bessere und standardisierte Test- und Abnahmeverfahren für EWS zu erreichen.

5 Erdwärmesonden-Speicher (EWS-Speicher)

Erdwärmesonden-Speicher unterscheiden sich von sonstigen Erdwärmesonden-Feldern im Prinzip nur durch die möglichst hohe Kompaktheit und die enge Packung der Sonden (1,5 bis max. 4 m Sondenabstand je nach Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes). EWS-Speicher gehören zur Kategorie der Konduktiv-Speicher und eignen sich als Wärme-, Kälte- oder kombinierte Wärme-Kälte-Speicher (Reuß, 2006). Speichermedium ist der natürliche Untergrund, welcher bis auf die Bohrungen unverändert belassen wird und in dem möglichst keine Grundwasserströmung vorhanden sein soll. Dem Vorteil einer einfachen Bauweise steht der Nachteil der fehlenden Wärmedämmung an den Seiten und nach unten gegenüber, EWS-Speicher werden höchstens an der Erdoberfläche gedämmt. Kompaktheit und großes Volumen (mehrere tausend Kubikmeter) sind deshalb Voraussetzungen für eine hohe Effizienz, v. a. bei höheren Temperaturen (Schmidt, 2005).

Erdwärmesonden-Speicher können inzwischen auf eine über 20jährige Entwicklung zurückblicken, von ersten Versuchen 1983 bis zu aktuellen Projekten in Neckarsulm-Amorbach, Attenkirchen (s. Abbildung 3) und Crailsheim. Die bisherigen FuE-Ergebnisse zeigen, dass EWS-Speicher funktionsfähig und kostengünstig sind (Investitionskosten netto in Attenkirchen: 18 €/m³ wasseräquivalent bzw. 46 € pro Bohrmeter Sonde).

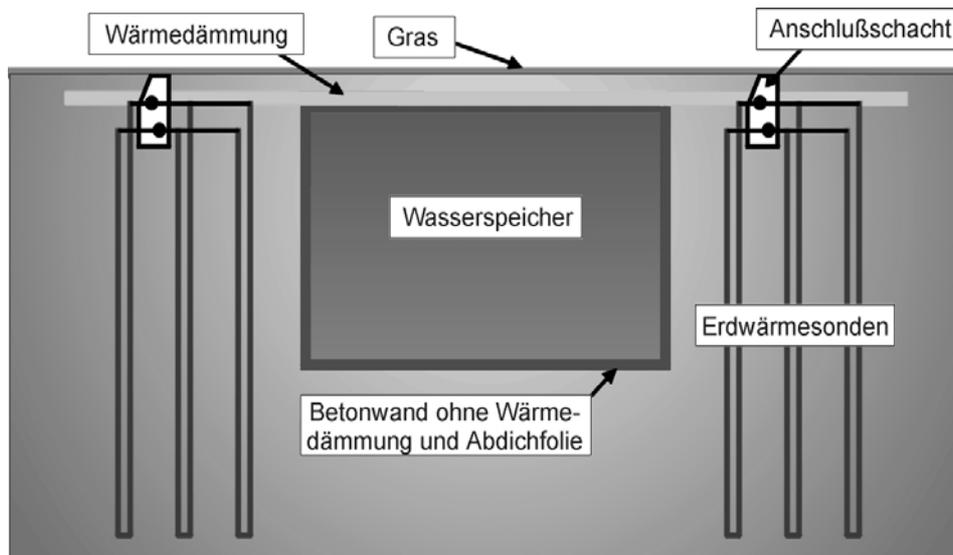


Abbildung 3 – kombinierter Erdbecken-Erdsonden-Speicher Attenkirchen (Reuß, 2004)

6 Zusammenfassung

Erdwärmesonden in Standard-Bauformen sind eine inzwischen etablierte und weit verbreitete Technologie. Neben Sonderbauformen (z. B. Heat-Pipes) sowie konstruktiven und materialtechnischen Verbesserungen liegen weitere Entwicklungspotenziale in den Themen Qualitätssicherung und Systemtechnik.

Obwohl bereits Planungs- und Auslegungswerkzeuge unterschiedlicher Komplexität existieren, ist die Entwicklung hierzu noch keineswegs abgeschlossen. Auf der Ebene einfacher Verfahren ist z. B. die Einbeziehung der Kühlung und des kombinierten Heiz-Kühl-Betriebs in Arbeit. Bei den Simulationsverfahren steht die weitere Schließung der Lücke zwischen einfachen, aber weniger genauen Programmen und hochgenauen, aber sehr komplexen Werkzeugen an.

Aufgrund bisheriger Ergebnisse erscheint auch die weitere Entwicklung von Erdwärmesonden-Speichern parallel zu den bekannten anderen Speicherbauformen lohnenswert.

Mit ca. 50 €/m (Größenordnung 1 €/W Entzugsleistung) sind Erdwärmesonden zunächst relativ teure Komponenten. Das wirtschaftliche Potenzial ist dennoch, v. a. bei effektiver Systemeinbindung (z. B. Mehrfachnutzung für Heizung und Kühlung), als hoch einzustufen, ebenso der energetische und ökologische Nutzen.

7 Literatur

Amann, A., 2005, Tragpfähle aus duktilem Gusseisen zur thermischen Nutzung des Untergrundes, Tagungsband OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg

Bienert et al., 1977, US Patent No. 4,050,509

Bundesverband WärmePumpe, 2006, Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen, www.waermepumpe-bwp.de, Bundesverband WärmePumpe (**BWP**) e. V., München

Eskilson, P., 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden

Huber, A., 1999, Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder, Schlussbericht zum Vorhaben im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Kraft-Wärme-Kopplung (UAW), Zürich

Koenigsdorff, R. et al., 2004, Auslegungswerkzeug für die geothermische Heizung und Kühlung von Bürogebäuden mit thermischer Bauteilaktivierung, 5. Symposium

Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau, Herausgeber: Geothermische Vereinigung (GtV)

Koenigsdorff, R. et al., 2005, Messungen und Monitoring zur Optimierung der Betriebsführung und zukünftiger Planungen, Tagungs-CD 2. Biberacher Geothermietag, Bauakademie Biberach

Koenigsdorff, R. et al., 2006, Test und Weiterentwicklung des Programms GEO-SYST und Bemessung von Erdwärmesondenfeldern mit einem daraus abgeleiteten Handrechenverfahren, Tagungsband OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg

Kruse, H. et al., 2004, Entwicklung einer CO₂-Erdwärmesonde nach dem Prinzip des Wärmerohrs, KI Luft- und Klimatechnik 2/2004

Leyens, D. et al., 2004, Neue Entwicklung bei der Planung von Erdwärmesondenanlagen, 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau, Herausgeber: GtV

Reuß, M., 2004, Solare Nahwärmeversorgung Attenkirchen, Tagungsband 7. Internationales Symposium für Sonnenenergienutzung SOLAR 2004, Gleisdorf, Österreich

Reuß, M., Kuckelhorn, J., 2005, Konstruktion von Erdwärmesonden, Tagungsband OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg

Reuß, M., 2006, Techniken der Oberflächennahen Geothermie, Tagungsband OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg

Sanner, B., Hellström, G., 1996, "Earth Energy Designer", eine Software zur Berechnung von Erdwärmesondenanlagen. Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, Konstanz

Schmidt T., 2005, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher in Deutschland, Tagungsband OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg

VDI 4640-2, 2001, Thermische Nutzung des Untergrundes - Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Beuth Verlag, Berlin

Wagner, S. et al., 2005, Innovative Verfahrenstechnik der Wärme-/Kältenutzung in geothermischen Sonden – erweiterte Nutzungskonzepte der Direkterdampfung, OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg

WÄRME- UND KÄLTEVERSORGUNG DER PARLAMENTSBAUTEN IM BERLINER SPREEBOGEN MIT AQUIFERSPEICHER

Silke Köhler, Stefan Kranz, Ernst Huenges
GeoForschungsZentrum Potsdam
Telegrafenberg, 14473 Potsdam
Tel.: +49-331 / 288 1574, Fax: +49-331 / 288 1577
E-Mail: skoe@gfz-potsdam.de

Jan Albers, Cagatay Berkyürek, Felix Ziegler
Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik
Marchstraße 2, 10587 Berlin
Tel.: +49-30 / 314-25314, Fax: +49-30 / 314-22253
E-Mail: jan.albers@tu-berlin.de

Jörn Bartels, Markus Wolfgramm, Andrea Seibt, Frank Kabus
Geothermie Neubrandenburg GmbH
Seestraße 7A, D-17033 Neubrandenburg
gtn@gtn-online.de

Oliver Opel, Wolfgang K.L. Ruck
Umweltchemie Universität Lüneburg
Scharnhorststr. 1/13, 21335 Lüneburg
Tel.: +49-4131 / 677-2880, Fax.: +49-4131 / 677-2822
E-mail: ruck@uni-lueneburg.de

1 Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich international verpflichtet die CO₂-Emissionen nachhaltig zu senken. In diesem Kontext wurden für die notwendigen Baumaßnahmen im Rahmen des Hauptstadtumzuges von Bonn nach Berlin hohe Anforderungen an die energetische Gebäudequalität sowie die Energieversorgung gestellt. Um diesem Anspruch zu genügen, wurde für die Energieversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen ein bisher einzigartiges Energieversorgungssystem geplant und realisiert, mit dem die benötigte Nutzenergie bei minimalem Primärenergieeinsatz und unter maximaler Ausnutzung regenerativer Energieträger bereitgestellt werden kann. Hierzu dienen vor allem Blockheizkraftwerke (BHKW) in Verbindung mit zwei Aquiferspeicher zur saisonalen Wärme- bzw. und Kältespeicherung. Außerdem sind Absorptionsanlagen vorhanden, mit denen einerseits die Abwärme der BHKW zur Kälteerzeugung genutzt werden kann. Andererseits werden die Absorptionsanlagen auch als Wärmepumpe betrieben.

Die beiden Aquiferspeicher in einer Tiefe von ca. 50m (Kältespeicher) und ca. 300m (Wärmespeicher) dienen dem Ausgleich der unterschiedlichen saisonalen Lastverläufe bei der Energieerzeugung und -nutzung sowie zur besseren Auslastung der technischen Anlagen. Der Kältespeicher ermöglicht die Nutzung der niedrigen Um-

gebungstemperaturen der kalten Jahreszeit in den Sommermonaten und der Wärmespeicher führt zu einer Vergrößerung des Anteils der Kraft-Wärme-Kältekopplung an der Gesamtenergiebereitstellung. Über einen Energieverbund sind die beiden Aquiferspeicher mit den Erzeugern (Blockheizkraftwerke, Absorptionsanlagen, Rückkühlwerke etc.) und den Verbrauchern (Parlamentsgebäude, Kanzleramt und Kindertagesstätte) in das Gesamtenergieversorgungssystem eingebunden.

Mit den Erfahrungen des Betreibers aus den ersten Jahren der Nutzung wurde deutlich, dass gegenüber der geplanten Betriebsweise umfangreiche Anpassungen an das reale Abnehmer- und Betriebsverhalten vorgenommen werden mussten. Diese Maßnahmen hatten vorrangig zum Ziel, eine zuverlässige Versorgung der Gebäude sicherzustellen und weniger den energetisch optimierten Betrieb des Gesamtsystems zu erreichen. Die energetische Optimierung der Einbindung der Aquiferspeicher in das komplexe Wärme- und Kälteversorgungssystem für die Berliner Parlamentsbauten ist die übergeordnete Zielstellung für das gesamte Verbundprojekt.

2 Anlagenbeschreibung

Die Energieversorgungsanlage ist ausgelegt für die Bereitstellung von:

Strom	8,6 MW _{el}	19,5 GWh/a
Wärme	12,5 MW _{th}	16 GWh/a
Kälte	6,2 MW _{th}	2,8 GWh/a

Wesentliche Bestandteile der Versorgungsaufgabe werden mit 8 BHKW-Modulen (Brennstoff Pflanzenölmethylester PME, alternativ Heizöl), Gesamtleistung 3,2 MW_{el}, erfüllt. In engem Zusammenhang damit können drei Absorptionsanlagen als Kältemaschine (KM) oder als Wärmepumpe (WP) betrieben werden. Außerdem finden sich in dem System sechs Kompressionskältemaschinen, sorptive Luftentfeuchter (DEC), Heißwasserkessel und Dampfkessel als aktive Elemente. Lokal sind vier Photovoltaik-Anlagen installiert.

Die Wärme wird auf zwei Temperaturniveaus (Wärmeverbund gebäudeübergreifend 110°C, innerhalb der Gebäude 90°C/60°C und 45°C/30°C) und Kälte ebenfalls auf zwei Temperaturniveaus (HT-Kälte 16°C/19°C, NT-Kälte 6°C/12°C) verteilt.

Die BHKW stellen über Motor- und Rauchgaskühlung Wärme mit 110°C und über Ladeluft- und Generatorkühlung Wärme mit 41°C (für NT-Wärme) zur Verfügung.

Die BHKW werden jederzeit stromgeführt betrieben. Daher besteht zum Ausgleich von sommerlichen Überschüssen und winterlichen Wärmedefiziten großer Bedarf für einen saisonalen Wärmespeicher.

Der Wärmespeicher ist durch eine Dublette erschlossen. Die Beladung erfolgt in der Regel mit maximal 70°C, die Entladung mit 65 – 30°C. Aus betrieblichen Gründen wurde in der letzten Saison versuchsweise nur eine maximale Einspeichertemperatur von 60 °C gefahren. Wärme aus der Entladung wird in das NT-Heiznetz gespeist und

dient außerdem als Wärmequelle für die Absorptionswärmepumpen, wenn die Ausspeichertemperatur für eine direkte Beheizung nicht mehr ausreicht.

Der darüber hinaus existierende Kältespeicher ist durch jeweils 5 Bohrungen auf der warmen und der kalten Seite erschlossen. Er wird im Winter auf 5°C abgekühlt (regeneriert). Die Wärme wird dabei in direkter Luftkühlung (Trockenkühler) an die Umgebung abgeführt. Er dient außerdem im Winter als Wärmequelle der Absorptionswärmepumpen. Im Sommer versorgt der Kälteaquiferspeicher vorrangig die HT-Kälte. Je nach erreichter Temperatur am Ende der Regenerationsphase ist jedoch auch eine (zeitweise) Versorgung der NT-Kälte möglich.

Die AKM und die Kompressionskältemaschinen für die Spitzenlast bedienen die NT-Kälte. Ihre Rückkühlung erfolgt in den o.g. Trockenkühltürmen. Bei hohen Außentemperaturen dient darüber hinaus der Kältespeicher als Wärmesenke.

3 Methodischer Ansatz

Das Forschungsprojekt wird im Verbund von GFZ, dem Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin, der Bundestagsverwaltung, der Geothermie Neubrandenburg GmbH und dem Institut für Umweltchemie der Universität Lüneburg bearbeitet. Diese Zusammensetzung des Konsortiums ist erforderlich, da für eine Gesamtverständnis des Systems ganz unterschiedliche Aspekte – vom Speicherchemismus der Aquifere über eine Bedarfsanalyse bis hin zum Teillastverhalten einzelner energietechnischer Komponenten – beleuchtet werden müssen. Das Projekt umfasst vier Arbeitspakete.

<p>1. Bestandsaufnahme</p> <p>Zeitliche Bedarfsanalyse, Nutzercharakterisierung; Anlagentechnik, Steuerung und Regelung</p>	<p>2. Charakteristik der einzelnen Systemkomponenten</p> <p>TRNSYS-Modell, Abbildung der Wandlungsmaschinen, Schnittstellenparameter</p>	<p>3. Verhalten der Aquiferspeicher</p> <p>Hydraulisch-thermische Simulation, Geochemie, Betriebsführungsstrategien</p>
<p>4. Gesamtsystem</p> <p>TRNSYS-Modell, Abbildung der Steuerung- und Regelung der Anlage, ausgewählte Szenarien, Übertragbarkeit auf andere Standorte</p>		

Abbildung 1: Projektstruktur

3.1 Bestandsaufnahme

Vor Beginn jeglicher Analyse oder Modellierung muss Kenntnis des Planungsstandes und des Ausführungsstandes bestehen. Diese Bestandsaufnahme ist aufgrund der Komplexität des Systems zwingend erforderlich, aber gleichzeitig auch aufwändig und nur in sehr enger Zusammenarbeit mit der Bundestagsverwaltung möglich.

Die Kenntnis der zu erfüllenden Versorgungsaufgabe bildet die Grundlage für die Optimierung des Energieversorgungssystems. Für Erfassung des Bedarfs wird, soweit möglich, auf vorhandene Messeinrichtungen zurückgegriffen. Die dafür notwendigen Messpunkte werden im Gesamtsystem identifiziert und ein Gesamtbild der Anlage erstellt. Nicht vorhandene Verbrauchswerte müssen mit entsprechenden Prognosetools (z.B. GOMBIS, Saadat und Korb, 1998) abgeschätzt werden.

Die Algorithmen zur Regelung und Steuerung der Gesamtanlage und ihrer Untersysteme („Fahrweise“) bestimmen alle Reaktionen des Systems auf eine Bedarfsanforderung. Eine möglichst weitgehende Kenntnis der Steuerungs- und Regelungsstrategien ist daher sowohl für eine Analyse des Gesamtsystems als auch für die Untersuchung von Untersystemen unerlässlich.

3.2 Abbildung und Modellierung der einzelnen Systemkomponenten

Ein wesentliches Ziel des F&E Projektes ist es, den Primärenergieeinsatz im gesamten Energieverbund der Parlamentsbauten durch eine bestmöglichen Ausnutzung der Aquiferspeicher sowie eine optimierte Fahrweise der energietechnischen Versorgungsanlagen zu minimieren. Zur Ermittlung der optimalen Fahrweise werden Jahres-Simulationen zum Lastgang des gesamten Energieverbundes durchgeführt.

Für eine Gesamtoptimierung ist es jedoch notwendig, das Betriebsverhalten aller wesentlichen Einzelkomponenten mit ausreichender Genauigkeit bezüglich des transienten und stationären Teillastverhaltens simulieren zu können. Gleichzeitig sollen möglichst breite Parametervariationen bei der Optimierungsrechnung zugelassen werden können, ohne dass es zu numerischen Problemen kommt.

Aus dem Energieverbund werden insgesamt sieben Gebäude mit Energie versorgt (Bundeskanzleramt, Jakob-Kaiser-Haus, Paul-Löbe-Haus, Marie-Elisabeth-Lüders-Haus, Reichstagsgebäude, Kindertagesstätte und ein unterirdisches Erschließungssystem). Insgesamt kommen im Energieverbund zwölf unterschiedliche Typen von Energiewandlungsanlagen und -speichern zum Einsatz (*Tabelle 1*). Die eingesetzten Anlagentypen sind in unterschiedlicher Anzahl, mit unterschiedlicher Dimensionierung und z.T. von verschiedenen Herstellern vorhanden. Inklusive der beiden Aquiferspeicher setzt sich das zu simulierende Gesamtsystem damit aus 83 Einzelkomponenten zusammen. Für eine geeignete Abbildung des Gesamtsystems soll für jeden Anlagentyp bzw. jede Komponente eine Charakterisierung und Modellbildung durchgeführt werden.

Bei der Abbildung des Gesamtsystems muss außerdem beachtet werden, dass im Energieverbund die Erzeugung und Wandlung von Strom und HT-Wärme vom Verbrauch (d.h. von den Gebäuden) entkoppelt sind. So kann z.B. die im Reichstagsgebäude erzeugte HT-Wärme eines BHKW im Jakob-Kaiser-Haus für den Betrieb einer Absorptionswärmepumpe genutzt werden. Diese Komplexität des Gesamtsystems erfordert eine weitere Untergliederung der energietechnischen Anlagen in Subsysteme. Die Abbildung des Gesamtsystems erfolgt in vier Detaillierungsstufen (siehe *Abbildung 2*):

Ebene 1: Energietechnische Anlagen im gesamter Energieverbund

Ebene 2: Energietechnische Anlagen in einzelnen Gebäuden (z.B. Jakob-Kaiser-Haus)

Ebene 3: Subsysteme von energietechnischen Anlagen in einem Gebäude (z.B. Kältebereitstellung im Jakob-Kaiser-Haus einschließlich aller Kälteerzeuger und der zugeordneten Verteiler, Sammler, Speicher)

Ebene 4: Einzelaggregate der Energieversorgung (z.B. eine Kompressionskältemaschine)

Ebene 4 beinhaltet den höchsten Detaillierungsgrad. In diese Ebene erfolgt – als eine ganz wesentliche Entwicklungsphase – die Modellentwicklung bzw. Modellüberprüfung und -anpassung der einzelnen Anlagentypen. In Abbildung 3 ist hierzu beispielhaft dargestellt, wie sich das Teillastverhalten der Absorptionskälteanlage im Jakob-Kaiser-Haus relativ gut als lineare Funktion darstellen lässt, wenn man die Temperaturen von Heiz- Kühl- und Kaltwasser zu einer geeigneten charakteristischen Temperaturdifferenz zusammenfasst (siehe z.B. Ziegler et al., 1998).

In allen Detaillierungsstufen erfolgt im Projektverlauf die Überprüfung und Validierung der Modelle anhand von Messdaten aus dem Energieversorgungsverbund. Mit den Simulationsrechnungen sind dadurch zuverlässige Aussagen über Optimierungspotenziale ermittelbar.

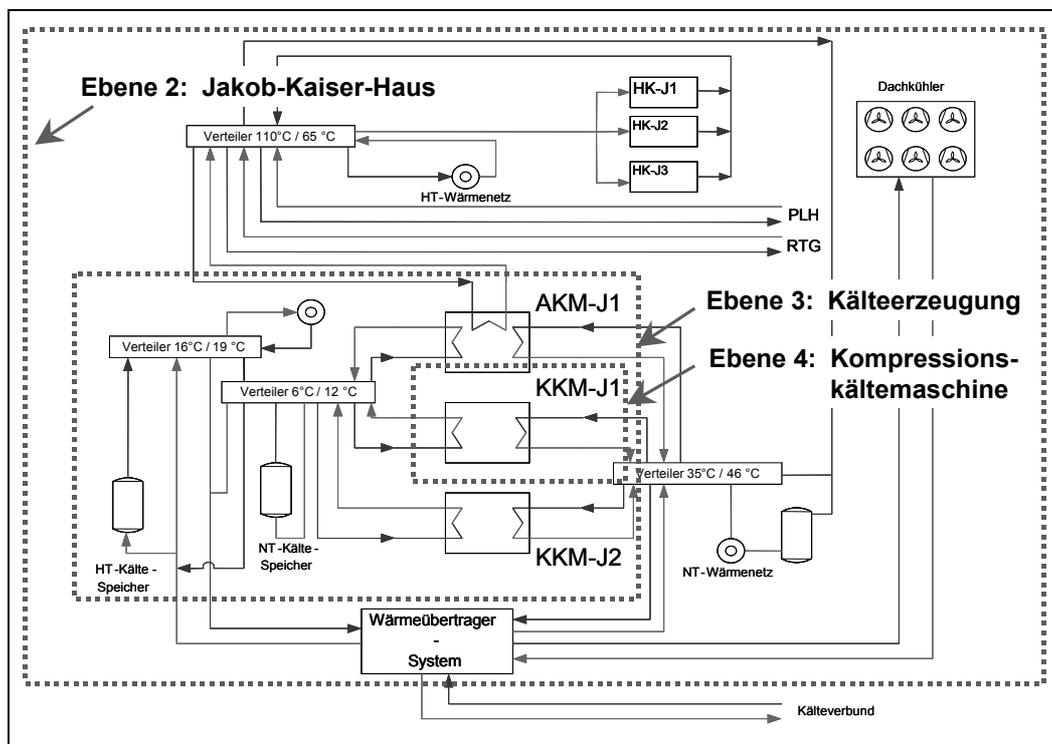


Abbildung 2: Detaillierungsebenen der Modellbildung

N.r.	Technische Anlage / Aggregattyp	Anzahl
1	Kompressionskältemaschine	6
2	Rückkühlwerk	6
3	Absorptionskältemaschine	3
4	Wärmetauscher	35
5	Motoren-Heizkraftwerk	9
6	Dampfkessel	1
7	Heizkessel	4
8	Aquifer-Wärmespeicher	1
9	Aquifer-Kältespeicher	1
10	Pufferspeicher	19
11	Hydraulische Weiche	2
12	Eisspeicher	2

Tabelle 1: Übersicht Einzelkomponenten

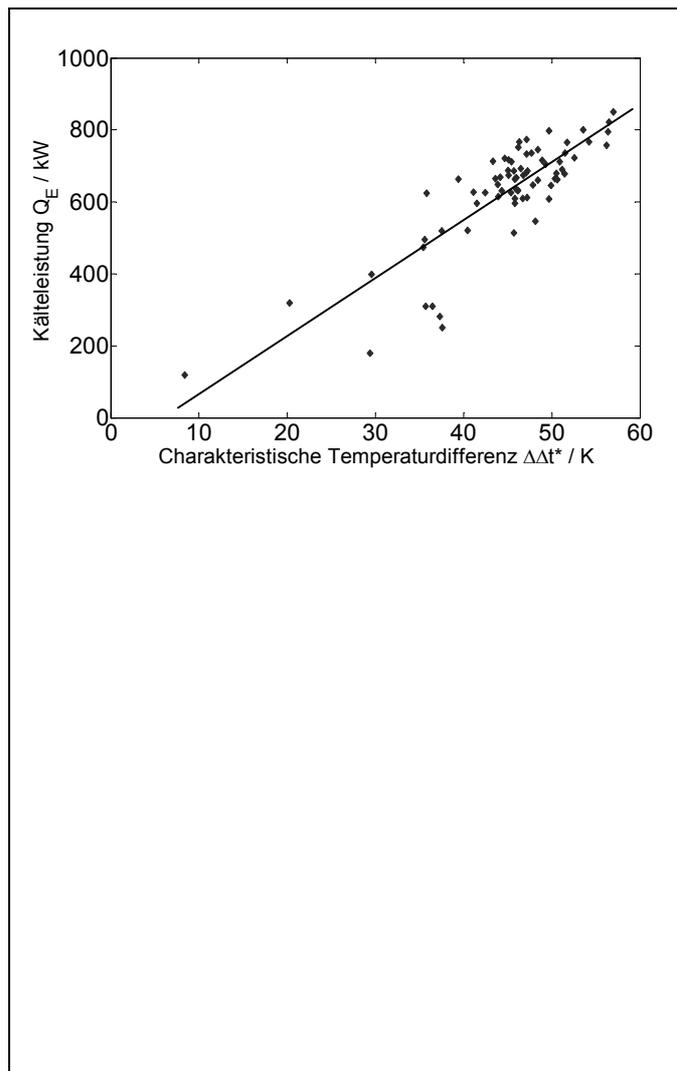


Abbildung 3: Teillastdaten der Absorptionskälteanlage im Jakob-Kaiser-Haus

3.3 Speichermonitoring - Geochemische Überwachung (Analytik, chemische Simulation)

Auf den ersten Blick unabhängig von der energetischen Optimierung, aber für einen energetisch befriedigenden Betrieb und insbesondere die Anlagenlebensdauer ebenso wichtig ist es, die Aquiferspeicher mit einem Monitoring-Programm in ihren chemischen und mikrobiologischen Parametern zu beobachten. Das Messprogramm umfasst die vierteljährliche Probenahme von Wasserproben aus dem Wärme- und Kältespeicher, die Messung der relevanten Parameter im Labor bzw. vor Ort bei der Probenahme sowie die Untersuchung von bereitgestellten Filterstrumpfpfproben per ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss. Durch dieses Monitoring werden ggf. auftretende Veränderungen im Aquifer durch die Wärmespeicherung im Auge behalten und die Umweltfreundlichkeit des Verfahrens in dieser Hinsicht dokumentiert. Darüber hinaus kann durch die begleitende chemische Analytik Wartungsbedarf in der Anlage bereits im Vorfeld erkannt werden.

Die in den Jahren 2000 bis 2006 durchgeführten Messungen des Wassers aus dem Kältespeicheraquifer zeigen nur geringfügige, zeitweilige Veränderungen in der Wasserbeschaffenheit. Dies sind zum einen Schwankungen in der NaCl-Konzentration, die mit den Leitfähigkeitsmesswerten korrelieren, zum anderen Schwankungen im Eisengehalt, die zeitgleich mit Veränderungen der Gesamthärte auftreten. Endgültige Aussagen über die Ursache dieser beobachteten Schwankungen können zurzeit noch nicht getroffen werden: In Betracht kommen neben einem möglichen Eintritt von Niederschlagswasser die Tiefbautätigkeiten, die in den letzten Jahren in der Umgebung stattfanden oder andere Ursachen wie bspw. Fließrichtungsänderungen des Grundwassers. Für eine abschließende Beurteilung sind eine genaue Recherche der Tiefbautätigkeiten sowie Untersuchungen in umliegenden, unter Normalbedingungen von der Nutzung des Aquifers als Kältespeicher unbeeinflussten Grundwasserpegeln erforderlich.

Wie im Falle des Kältespeicheraquifers unterlag auch das Wasser des Wärmespeicheraquifers nur geringen Schwankungen in der Zusammensetzung. So traten neben leichten temporären Veränderungen in der NaCl-Konzentration und der Carbonathärte vor allem Schwankungen im Gehalt an gelöstem Eisen auf. Hier zeigt sich zunächst ein stark abnehmender Verlauf in der ersten Zeit nach der Erschließung. Dies deckt sich mit Beobachtungen in anderen Bohrungen, die ebenfalls nach dem Errichten erhöhte Eisengehalte aufwiesen. Im Laufe des Betriebes nimmt der Eisengehalt ab und pendelt sich schließlich bei dem im Tiefenwasser tatsächlich vorhandenen Gehalt ein. Dieser liegt für den Wärmespeicheraquifer bei 1 mg/l.

Eine theoretisch mögliche weitere Abnahme könnte aus einem trotz technischer Maßnahmen (Schutzgasbeaufschlagung) vorhandenen geringen Eintritt von Sauerstoff in das System resultieren.

Neben der Fortführung des Monitorings mit Hilfe von Einzelprobenahmen soll der zurzeit in der Voruntersuchungsphase befindliche Verockerungssensors der Universität Lüneburg Hinweise auf Zustand und Änderungen des Wasserchemismus geben. Einflüsse und Veränderungen des Wasserchemismus, die auf Temperaturänderungen durch die Nutzung als Energiespeicher zurückzuführen sind, wurden bisher nicht beobachtet.

3.3.1 Untersuchungen zum Langzeitverhalten - Brunnenalterung

Aufgrund eines merklichen Rückgangs der Förderleistung des Kältespeicherbrunnens KS 3 wurde dieser im Frühjahr 2006 regeneriert. Dazu wurde zuerst eine Hochdruckreinigung und anschließend zwei chemische Behandlungen mit dem Mittel Aixtraktor durchgeführt. Jeweils vor, zwischen und nach den Regenerierungsschritten erfolgten hydraulische Förder- und teilweise auch Injektionsteste, Entnahmen und Analysen von Feststoffen und Wässern sowie Kamerabefahrungen zum Nachweis der Regenerierungsleistung.

Im Zuge der Sanierungsarbeiten konnte die Produktivität des Brunnens bezogen auf eine Absenkung im Brunnen von einem Meter von ca. 11 m³/h vor der Sanierung auf

17 m³/h nach der Hochdruckreinigung und 21 m³/h nach der chemischen Regenerierung verbessert und somit der Ausgangswert von 2002 erreicht werden.

Es konnte nachgewiesen werden, dass Versandung aber vor allem Verockerung im Zuge der Brunnenalterung als wesentliche Ursachen der Produktivitätsminderung wirkten. Leistungsabnahmen sind in etwa 90 % aller in Deutschland vorhandenen Trinkwasserbrunnen auf Verockerung zurückzuführen. Dabei sind die Ursachen, welche zu den Ausfällungen von Eisenhydroxiden führen, differenziert zu betrachten. Die Bohrungen werden mit Stickstoff beaufschlagt, somit ist ein Zutritt von Luftsauerstoff über die Bohrungen unwahrscheinlich. Diese Stickstoffbeaufschlagung verhindert einen Großteil der sonst zu erwartenden Eisenausfällungen. Weitere Indizien deuten darauf hin, dass der Sauerstoffeintrag, welcher zur Ausfällung von Eisenhydroxiden führt, in den obertägigen Anlagen stattfinden muss. Zusätzlich konnten durch erste mikrobielle Untersuchungen eisenreduzierende Bakterien im Fluid bzw. dem Filtermaterial nachgewiesen werden. Das Vorkommen dieser Bakterien wurde indirekt auch durch den latenten H₂S-Geruch während der Sanierung beobachtet. Dieser wurde während der chemischen Sanierung stärker. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bakterien Tonpartikel im bohrlochnahen Speicherbereich besiedeln. Über diesen besiedelten Partikeln findet sich eine eisenhaltige Kruste.

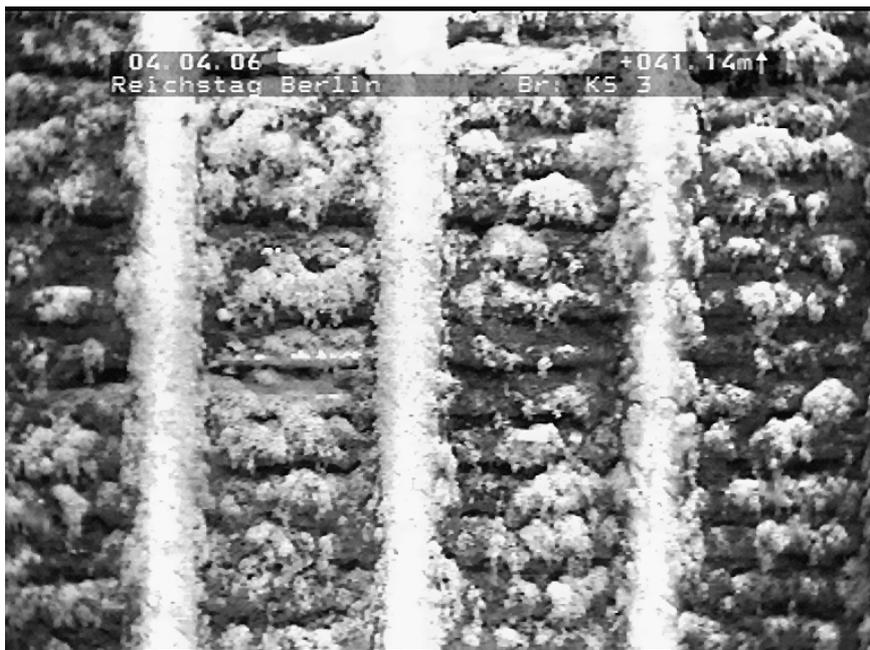


Abbildung 4: Beladung des Schlitzfilters der Bohrung KS-3 durch Eisenausfällungen

Es muss davon ausgegangen werden, dass es, sollte es nicht zu Identifizierung und dem Beseitigen der O₂-Quelle in den obertägigen Anlagen kommen, eine Brunnenaltertion und Verockerung wieder sehr schnell erfolgen wird. Unabhängig davon sollten alle Kältespeicherbrunnen regelmäßig saniert werden, da sich die ausgefällten Eisenspezies in Abhängigkeit von der Zeit in Minerale wie z.B. Geothit umwandeln, die immer schwerer zu beseitigen sind. Aus diesem Grund sollte die Sanierung der weiteren Kältespeicherbohrungen spätestens 2008 erfolgen.

3.3.2 Speicherabbildung

1999 gingen die beiden Aquiferspeicher am Berliner Spreebogen erstmals in Betrieb. Der Aquiferwärmespeicher wurde bis zum Herbst 2002 ausschließlich beladen und erfuhr im Winter 2002/2003 die erste Ausspeicherung. Der Kältespeicher wurde bis 2002 ausschließlich im Kühlbetrieb gefahren und erfuhr im Winter 2002/2003 die erste Regeneration. Bisher (2006) liegen damit für beide Speicher je drei vollständige Speicherzyklen (Be-, Entladen) vor. Die aus dieser Zeit vorliegenden Daten wurden analysiert, in Kennzahlen zusammengefasst und mit einer numerischen Simulation verglichen.

Für eine weitergehende Prognose wurde mit dem Werkzeug FeFlow ein hydraulisch-thermisches 3D-Modell der Aquiferspeicher erstellt und mit den vorliegenden Messwerten kalibriert (Bartels, 2004). Auf Grundlage der Kenntnis der Entwicklung der untertägigen Wärme- und Kälteverteilung und ihres Einflusses auf das Fließverhalten des Grundwassers ist es möglich, technisch oder durch äußere Einflüsse auf das Grundwasser bedingte Veränderungen der Injektivität und Produktivität der Brunnen von den viskositätsbedingten Veränderungen zu separieren und Trends nachzuweisen.

Die aus der Modellierung und dem Monitoring der Aquiferspeicher gewonnenen Daten wurden außerdem in ein geeignetes TRNSYS Modell (University of Wisconsin) überführt, das bei der Simulation des Gesamtsystems zum Einsatz kommt. Diese Parallelsimulation ist notwendig, da erstens keine geeignete Schnittstelle zwischen den Programmen FeFlow und TRNSYS existiert und zweitens – und dies ist wichtiger – die Simulation des Gesamtsystems aus Gründen der Rechenzeit auf vereinfachte Modellbildungen zurückgreifen muss. Für diesen Schritt konnte auf einen in Lund und Stuttgart erstellten Speicher-Type (Hellström et al., 1986) zurückgegriffen werden. Die mit diesem vereinfachten Modell durchgeführten Rechnungen zeigen eine ausreichende Übereinstimmung mit den gemessenen und den mit FeFlow simulierten Werten (*Abbildung 5*).

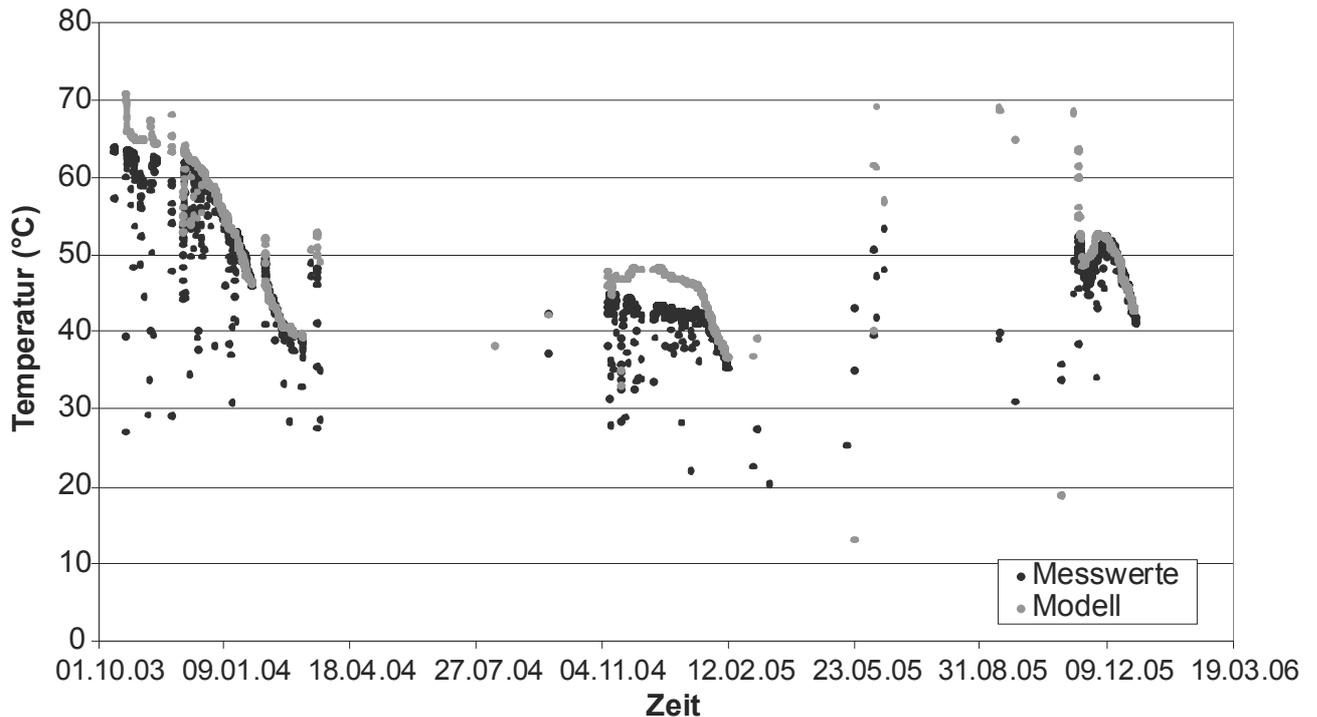


Abbildung 5: Gemessene und simulierte Temperatur der warmen Bohrung des Wärmespeichers während des Ausspeicherns.

3.4 Gesamtsystem

Die in den einzelnen Bausteinen des Projektes erstellten Teilmodelle werden zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. Diese Synthese des Gesamtsystems basiert auf der Analyse des Ist-Standes der Energieversorgung der Parlamentsgebäude. Soweit die Plausibilität der Betriebsdaten gegeben ist, erfolgt ein Abgleich mit dem Modell. Besondere Berücksichtigung findet die Integration der Aquiferspeicher.

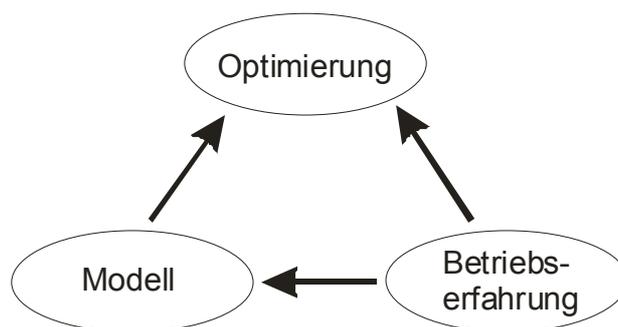


Abbildung 6

Es wird ebenfalls mit der Simulationsumgebung TRNSYS aufgebaut. Dieses Werkzeug soll für die Optimierung der Betriebsweise des Gesamtsystems im Hinblick auf den Einsatz der Aquiferspeicher mit maximalem Effekt und Anpassung der realen Regelstrategie dienen.

Die Herangehensweise für eine mögliche Verbesserung mit ihren Möglichkeiten und Randbedingungen sei an zwei Beispielen kurz skizziert:

1. Die Jahresbilanz eines einfachen Speichers im stationären Betrieb muss ausgeglichen sein. Dies heißt im Falle eines Aquifers, dass das Erdreich oder Grundwasser im Jahresmittel weder als Wärmequelle noch als Wärmesenke verwendet wird. Allerdings ist dies gar nicht zwingend notwendig. Es kann durchaus sinnvoll sein, im Mittel den Aquifer auch als Wärmequelle für die Wärmepumpe oder als Wärmesenke im Kühlbetrieb zu nutzen. Dies muss gegen die alternativen Möglichkeiten zum Beispiel durch Nutzen eines Kühlturms abgewogen werden.
2. Im Gegensatz zu anderen, einfacheren Systemen stehen im Energieverbund der Parlamentsbauten oftmals mehr als zwei Aggregate bereit, um eine Wärme- oder Kälteanforderung zu erfüllen. So kann Kälte für die Raumkühlung mit den DEC-Anlagen, den AKM (beide werden mit HT Wärme angetrieben), den KKM oder dem Kältespeicher bereitgestellt werden. Wann jetzt welches Aggregat am effizientesten und kostengünstigsten eingesetzt werden soll, kann nicht anhand der Auslegungsparameter entschieden werden. Vielmehr muss in die Ansteuerung der Anlagen Kenntnis des Teillastverhaltens, des aktuellen Ladestandes der Speicher und eine eventuellen Wärmeüberschuss aus dem BHKW-Betrieb eingehen.

Weitere mögliche Aspekte sind die Auswirkung von höheren oder geringeren Einspeichertemperaturen im Wärmespeicher und die Untersuchung eines von den Planungsannahmen abweichenden Energiebedarfs. Die aus dem Betrieb der Aquiferspeicher resultierenden Randbedingungen finden dabei besondere Beachtung. Diese Randbedingungen sind im Wesentlichen in drei Bereichen angesiedelt: rechtliche, technische und geologische Randbedingungen. Beispiel: Die insgesamt in beide Richtungen umgewälzte Wassermenge ist nach oben und unten begrenzt: Das Maximum resultiert aus rechtlichen/finanziellen (Wasserentnahmeentgelt) oder geologischen Einschränkungen (Produktivitätsindex), das Minimum aus der Pumpenkennlinie, die eine gewisse minimale Fördermenge erfordert.

Da die Produktivität der Brunnen die förderbare Wassermenge bestimmt, beeinflusst sie auch die Qualität der Gesamtanlage. Sie wird durch geochemische Prozesse wie z.B. Brunnenalteration beeinflusst. Die geochemischen Untersuchungen zielen also ebenfalls auf eine Verbesserung der Gesamtanlage. Auf Basis des Monitorings werden so u.a. die optimalen Zeitpunkte für Brunnenregenerierung festgelegt. Zudem werden auftretende Änderungen frühzeitig erkannt, so dass Maßnahmen zur Bekämpfung der Ursachen eingeleitet werden können. Auf diese Weise kann dann die Anzahl störungsbedingter Ausfälle verringert werden. Die Brunnenalteration im Bereich des Kältespeichers am Reichstages ist zudem Ausdruck des Sauerstoffritts zu den Wässern im Kreislauf. Die Identifizierung und Beseitigung einer Sauerstoffquelle (obertägige Anlage) könnte die Brunnenalteration deutlich minimieren und somit die Leistung verbessern.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Energieeffiziente Energieversorgungssysteme können nur auf Basis der Jahreslastgänge, d.h. der bereitzustellenden Energiemengen, ausgelegt werden. Dieser Übergang von der klassischen, rein leistungsbezogenen Auslegung zu einer auf Energiemengen bezogenen Auslegung hat im Planungsprozess des Energieverbundes Parlamentsbauten bereits gewirkt. Der nächste Schritt muss folgerichtig sein, dass auch der Betrieb von der reinen Leistungsbereitstellung zu einer vorausschauenden Bereitstellung (und Speicherung) von Energiemengen wechselt. Bei diesem Wechsel ist eine umfangreiche Kenntnis des Teillastverhaltens und – insbesondere bei Komponenten mit großen Zeitkonstanten – des transienten Verhaltens der Komponenten und Subsysteme unabdingbar. Mit der Synthese des Gesamtsystems steht für den Energieverbund der Parlamentsbauten in Berlin ein Werkzeug zur Verfügung, das auf entsprechenden Kenntnissen und Erfahrungen aufbaut.

Danksagung

Dieses Projekt wird finanziell gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen BMWi 0329809C. Wir danken für diese Unterstützung.

5 Literatur

Bartels, J., (2004), Simulation von saisonaler Wärme- und Kältespeicherung im Grundwasser: Validierung und Prognoserechnungen mit Betriebsdaten der Aquiferspeicher der Berliner Parlamentsbauten. 6. Fachtagung "Grafikgestützte Grundwassermodellierung": Köln.

Hellström, G., Bennet, J., and Claesson, J., (1986), Heat Storage in the Ground - AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE - Single well model. Lund, Department of Mathematical Physics, University of Lund, p. 105.

Saadat, A., und Korb, G., (1998), Benutzerhandbuch zu GOMBIS 7.0: Berlin.

University of Wisconsin, M., USA, TRNSYS - TRaNsient SYstems Simulationprogram.

Ziegler, F., Hellmann, H.-M., und Schweigler, C., (1998), A simple method for modeling the operating characteristics of absorption chillers. Proc. of Eurotherm Seminar No.59: Nancy-Ville, France, p. 219-226.