

# Geothermie – Nachhaltige Stromerzeugung mit KWK

## Einführung

Die gegenwärtig hochaktuelle Debatte um Energielieferungen, Gas- oder Ölpreise und Klimawandel zeigt, dass die Entwicklung nachhaltiger und umweltverträglicher Energieversorgungsstrukturen eine der dringendsten Zukunftsaufgaben ist. Daher erarbeitet das GeoForschungsZentrum Potsdam wissenschaftliche und technologische Grundlagen für die wirtschaftliche Nutzung der Erdwärme.

Die in der Regel eher niedrigen Temperaturen in der Erde legen nahe, die Erdwärme für die Bereitstellung von Wärme und Strom, also eine Form der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu nutzen. So soll in der geothermischen Technologieentwicklung mit dem bohrtechnischen Aufschluss des In-situ-Geothermielabors in Groß Schönebeck die Machbarkeit geothermischer Stromerzeugung aus tiefen sedimentären, heißwasserführenden Speichergesteinen demonstriert werden. In einem nächsten Schritt ist der Aufbau eines geothermischen Kraftwerkes mit Unterstützung des Energieversorgungsunternehmens Vattenfall Europe AG vorgesehen.



Ziel ist die Entwicklung und der Test einer innovativen Versuchsanlage. Eine weitere Aufgabe liegt in der Übertragung der Erkenntnisse der Lagerstätten erkundung, -erschließung und -behandlung auf andere Standorte mit ähnlichen geologischen Bedingungen. Die geothermischen Forschungsarbeiten sind in vielfältige internationale Kooperationen zur Erschließung und Nutzung der Erdwärme eingebunden. Die sich daraus ergebenden wechselseitigen Entwicklungsimpulse und Synergien werden die geothermische Technologieentwicklung auch international voranbringen.

## Heizkraftwerk Neustadt-Glewe

Die Anlage in Neustadt-Glewe ist ein wichtiger Meilenstein in der geothermischen Technologieentwicklung. Die geothermische Kraft-Wärme-Kopplungsanlage zeigt, dass Stromerzeugung aus Erdwärme unter hiesigen geologischen Bedingungen realisierbar ist (*Abb. 1*).

Die Pilotanlage ermöglicht theoretische Berechnungen und Modelle mit den tatsächlichen Kraftwerksdaten zu untermauern und zu vergleichen. Diese wissenschaftliche Begleitung führt auf den Weg zu einer wirtschaftlichen geothermischen Stromerzeugung.

Die Anlage in Neustadt-Glewe kann Strom und Wärme gleichzeitig bereitstellen. Sie wird wärmegeführt betrieben. Das bedeutet für die Stromerzeugung, dass sie nur im Teillastbetrieb erfolgt: Strom wird also nur dann erzeugt, wenn die geothermische Wärme genutzt wird. Für diese Art der Stromerzeugung sind weitergehende Untersuchungen notwendig, da der damit verbundene Teillastbetrieb bisher wenig bekannt ist.

<sup>1</sup> Der Organic Rankine Cycle (ORC) ist ein Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsmittel als Wasserdampf.

Dr. Ernst Huenges  
GFZ  
huenges@gfz-potsdam.de

Dr. Silke Köhler  
GFZ  
silke.koehler2@rwe.com

Wolfgang Bogenrieder  
Vattenfall Europe  
Renewables GmbH  
wolfgang.bogenrieder@vattenfall.de

Dr. Egbert Broßmann  
Vattenfall Europe  
Renewables GmbH  
Egbert.brossmann@vattenfall.de

*Abbildung 1a*  
Geothermische Stromerzeugung am Standort Neustadt Glewe mit Umhausung, Förderbohrung, Kühlanlage, Organic Rankine Cycle<sup>1</sup>

*Abbildung 1b*  
Blick ins Innere des Containers

Wesentlicher Bestandteil geothermischer Technologieentwicklung ist die Modellierung thermodynamischer Prozesse zur Wandlung von Wärme in Strom. Die Modelle ermöglichen:

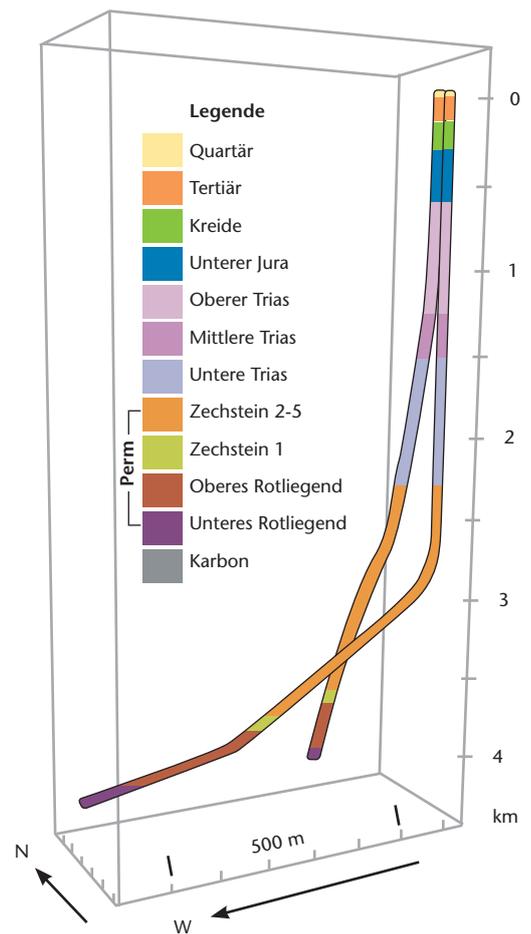
- Erkennen von Haupteinflussparametern in den Kreisläufen
- Verknüpfung der internen Prozessparameter
- Durchführung von Optimierungsrechnungen

Die Kraftwerks- und Kostendaten werden für eine gekoppelte energetische, ökonomische und ökologische Analyse verknüpft. Sie gibt Auskunft über die Wirtschaftlichkeit des Betriebes bei gleichzeitiger Bereitstellung von Strom und Wärme. Durch die Analyse werden die Orte der größten Exergieverluste<sup>2</sup> sowie die Hauptkostenquellen identifiziert. Hier liegen entscheidende Potenziale für die Optimierung des Systems. Kraft-Wärme-Kopplung bedingt demnach einen Teillastbetrieb, der bei Niedrigtemperaturanlagen wie in Neustadt-Glewe noch besondere Modellierinstrumente benötigt.

### Abbildung 2

Räumliche Darstellung des Bohrverlaufes: bestehende Altbohrung (hinten) und zurzeit durchgeführte Bohrung (vorne) mit Markierung der geologischen Horizonte.

(Die Vertikale ist gegenüber dem horizontalen Maßstab verkleinert.)



## Das in situ<sup>3</sup> Geothermielabor Groß Schönebeck

Groß Schönebeck mit seiner 150 °C heißen geothermischen Lagerstätte wurde zunächst im Hinblick auf einen stromgeführten Betrieb konzipiert. Das In-situ-Forschungslabor in der 4,3 km tiefen Geothermiebohrung wurde für hydraulische Experimente und Bohrlochmessungen eingerichtet. In den letzten Jahren wurde dort in Großexperimenten u.a. die Methode des massiven „Wasserfracs“ erstmals in heißen sedimentären Tiefengesteinen im Norddeutschen Becken erfolgreich getestet. Nach der Riss-Stimulation durch die Wasserfracs stieg die Produktivität der Bohrung erstmals in einen Bereich, der die geothermische Stromerzeugung im Norddeutschen Becken nicht nur generell möglich, sondern auch energiewirtschaftlich interessant macht [1, 2].

Die Stimulation selbst ist aber nur ein erster Schritt. Nun muss bewiesen werden, dass das Rissystem auch längere Zeit offen bleibt und den Transport einer ausreichenden Wassermenge garantiert. Der nächste Schritt zu einer geothermischen Energieerzeugung ist die erfolgreiche Zirkulation des Wassers zwischen zwei räumlich getrennten Bohrungen, die im Bereich des Reservoirs etwa einen halben Kilometer auseinander liegen. Dazu wird zurzeit in Groß Schönebeck ein zweites Bohrloch abgeteuft (Abb. 2). In diesen beiden Bohrungen soll dann mit Hilfe eines mehrere Monate dauernden Zirkulationsexperimentes untersucht werden, ob sich das erzeugte Rissystem zum dauerhaften Transport und Wärmeaustausch des im Untergrund vorhandenen Wassers eignet. Nur langfristig gesicherte Produktionsraten erlauben eine nachhaltige Nutzung eines Heißwasserreservoirs, die eine Investition in die Stromerzeugung lohnend macht.

<sup>2</sup> Exergie bezeichnet den nutzbaren Energieteil

<sup>3</sup> Insitu – Die Behandlung vor Ort. Gemeint ist damit der Einsatz eines Verfahrens oder einer Meßmethode, bei der der eigentliche Prozess nicht verlagert wird.

In Groß Schönebeck soll die vorhandene Altbohrung als Injektionsbohrung verwendet werden. Die neu abzuteufende Bohrung zur Förderung ist so angelegt, dass sie nicht senkrecht durch den Speicherbereich stößt, sondern darin abgelenkt wird. Das sorgt für einen längeren Verlauf in dieser für die Produktion entscheidenden Schicht und damit für größere Zuflussflächen.

Vielfältige Visualisierungsmöglichkeiten mit so genannten 3D-Modellen dienen als Entscheidungshilfe für die geologische Bohrfadplanung.

Kann eine ausreichende Produktivität nachgewiesen werden, dann soll in Groß Schönebeck in Kooperation mit Vattenfall Europe eine Strom produzierende Forschungsanlage errichtet werden. Sie soll vor allem verfahrenstechnische Fragen klären; dabei steht die Wirtschaftlichkeit geothermischer Stromerzeugung im Vordergrund.

## Wärme und Kälte für den Reichstag – Aquiferspeicher in der Energieversorgung der Berliner Parlamentsbauten

Wärme und Kälte aus der Umwelt bzw. aus Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung werden in dem Energieversorgungssystem der deutschen Parlamentsbauten in Berlin saisonal gespeichert und bedarfsgerecht bereitgestellt. Dazu wurden Wärme- und Kältespeicher in Wasser führenden Schichten unterhalb des Platzes der Republik vor dem Reichstagsgebäude eingerichtet und in Betrieb genommen.

Der Wärmespeicher führt zu einer Vergrößerung des Anteils der Kraft-Wärme-Kopplung an der Gesamtenergiebereitstellung, und zwar auch bei stromgeführtem Betrieb der Aggregate. Der Kältespeicher ermöglicht die Nutzung der niedrigen Umgebungstemperaturen der kalten Jahreszeit zur Kühlung in den Sommermonaten (Abb. 3).

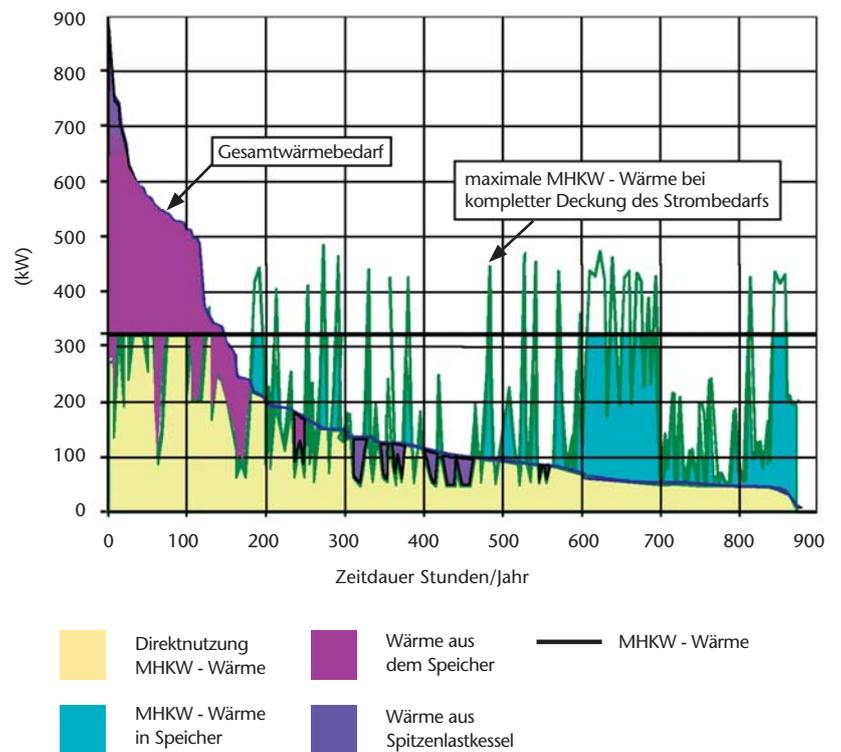


Abb. 3 zeigt beispielhaft die geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs und die Wärmebereitstellung durch die stromgeführten Motorheizkraftwerke (MHKW) und Spitzenlastkessel im Energieverbund Spreebogen in Berlin. Bedarf an elektrischer Energie und Bedarf an Wärme bestehen nicht immer gleichzeitig, sodass auch zu Zeiten niedrigen Wärmebedarfs der Spitzenlastkessel anspringt. Zu anderen Zeiten kann bei identischem Wärmebedarf ein Wärmeüberschuss bereit stehen, und zwar dann, wenn gerade eine hohe Anforderung an elektrischer Energie besteht. Dieser Wärmeüberschuss wird dann in einen saisonalen Speicher (Abb. 4) eingebracht. Speicherung von thermischer Energie ist damit letztendlich eine Voraussetzung für einen energetisch sinnvollen stromgeführten Betrieb von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen.

Abbildung 3 Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs und Wärmeangebot eines Motorheizkraftwerkes (MHKW) bei stromgeführtem Betrieb. Beispiel Energieverbund Spreebogen.

Quelle: GTN

Abbildung 4  
Aquiferspeicher für  
Wärme und Kälte  
im Untergrund des  
Reichstagsgebäudes

Quelle: Bundesbaugesellschaft, GTN

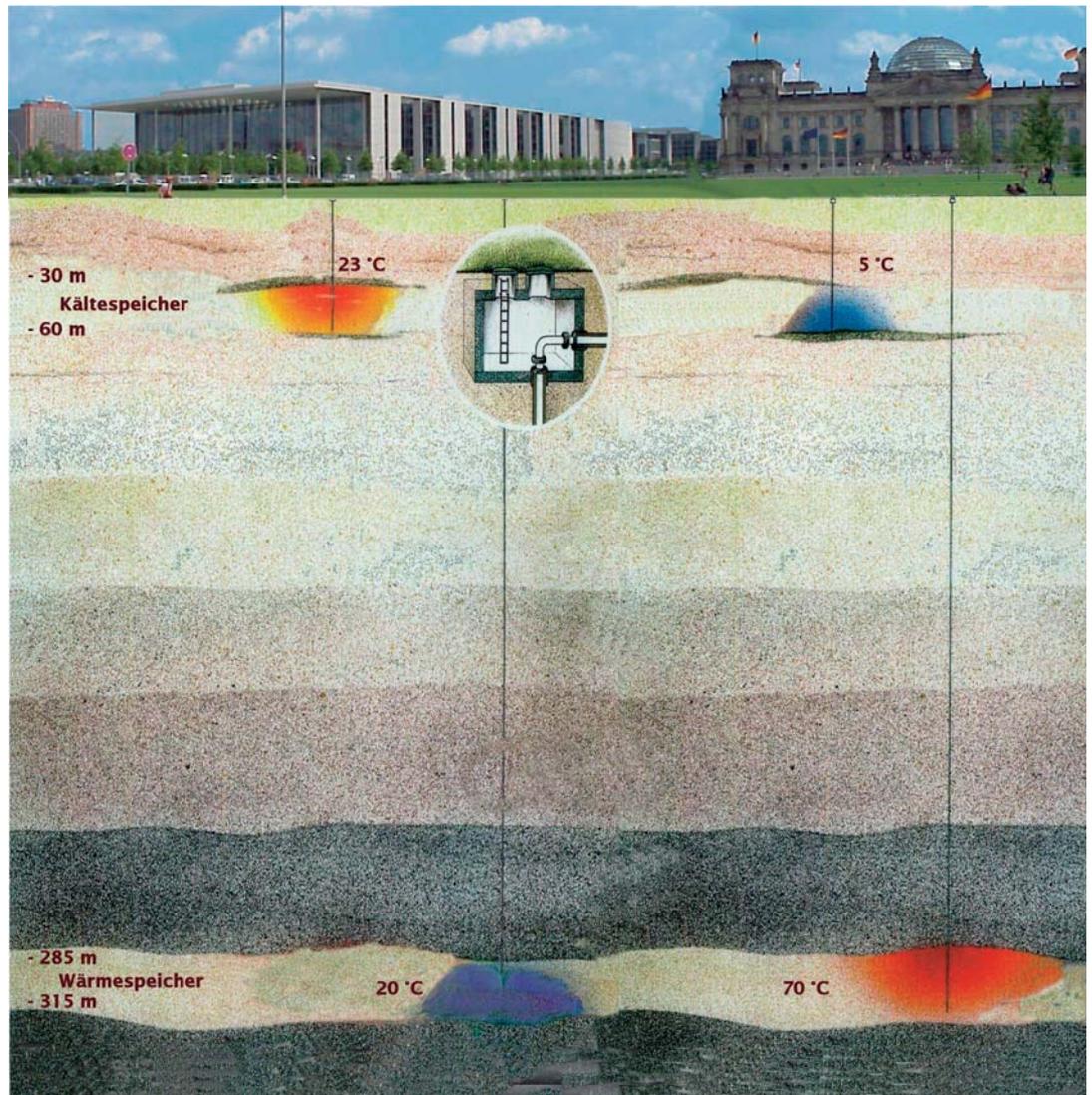
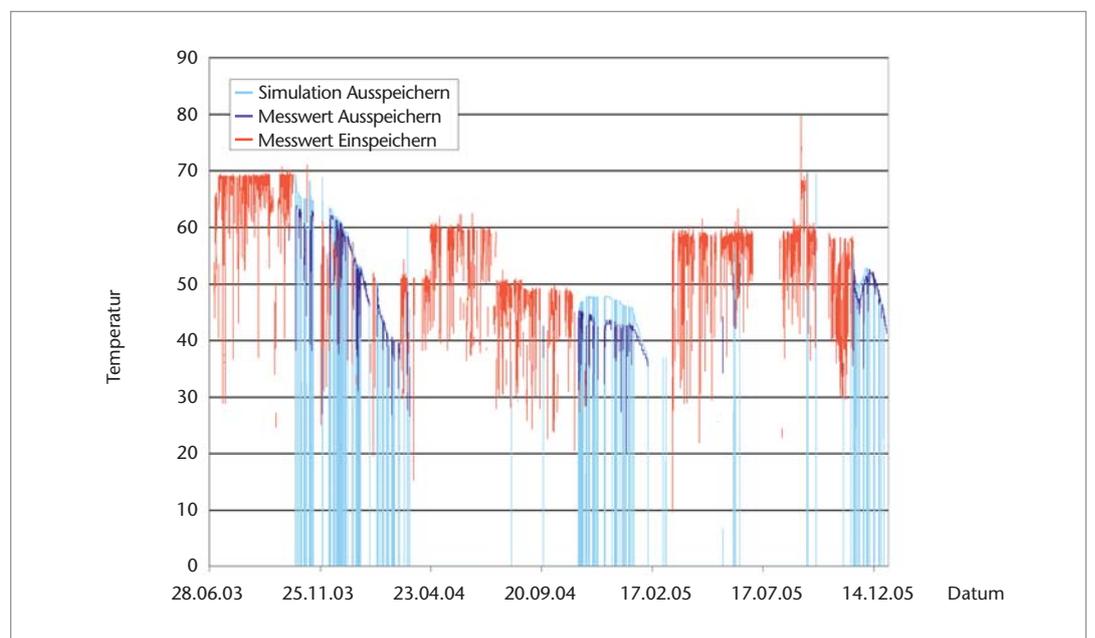


Abbildung 5  
Ein- und Ausspeicher-  
temperatur des  
Wärmespeichers im  
Laufe von drei Jahren.  
Rote und dunkelblaue  
Linien: Messungen,  
hellblau Linien:  
Modellierungen  
(Bartels, GTN) .



Den Wärmespeicher bildet ein Sandsteinhorizont in 285 bis 315 m Tiefe, der salzhaltiges Wasser (Sole) enthält. Eine Dublette erschließt dieses Aquifer. Die Beladung erfolgt in der Regel mit maximal 70 °C heißem Wasser, die Entladung mit 65 - 30 °C. Im Betrieb kann ein Volumenstrom von bis zu 100 m<sup>3</sup>/h gefördert bzw. injiziert werden. Damit beträgt die maximale Einspeicherungsleistung ca. 3,2 MW. Die Wärme aus der Entladung versorgt den Niedertemperaturbereich der verschiedenen Gebäudeheizungssysteme im direkten Wärmetausch. Eine weitere Abkühlung (bis auf minimal 20 °C) kann bei Bedarf durch Absorptionswärmepumpen vorgenommen werden, die im Umfang von ca. 2 MW Kälteleistung installiert sind.

Die Funktionsweise des Untergrundspeichers kann anhand der Temperaturentwicklung gezeigt werden [3; 4]. *Abb. 5* zeigt beispielhaft die Temperatur am Bohrungskopf der warmen Bohrung im Zeitraum Juni 2003 bis Winter Dezember 2005. Dieser Zeitraum umfasst ca. drei Be- und Entladezyklen. Die im Verlauf der Entladungsperiode absinkende Fördertemperatur ist charakteristisch für die Aquiferspeicherung.

In einer deutlich geringeren Tiefe (ca. 50 m) wurde unter dem Spreebogen ein weiterer Aquiferspeicher erschlossen. Er dient primär der Gebäudekühlung. Süßes Grundwasser (max. 300 m<sup>3</sup>/h aus fünf Bohrungen) wird dazu im Winter auf 5 °C abgekühlt. Im Wesentlichen geschieht dies bei Außentemperaturen unterhalb 0 °C in Kühltürmen mittels Umgebungskälte [5]. Im Sommer versorgt dieser ausgekühlte Speicher die Kühlsysteme im direkten Wärmetausch.

Die Energieversorgungsanlagen sind nun seit ca. 7 Jahren im Betrieb und funktionieren ohne größere Probleme. Jedoch sind Abnehmerbedarf, Systemkomponenten der Energieerzeugung und -verteilung und insbesondere die Aquiferspeicher durch unterschiedliches zeitliches Verhalten charakterisiert, sodass in der Gesamtanlage oftmals Konflikte zwischen deren optimaler Fahrweise sowie den in der Regel trägen Aquiferspeichern auftreten können. Daher ist es Ziel eines größeren Forschungsprojektes unter der Federführung des Geo-

Forschungszentrums Potsdam, Methoden zur Optimierung des Einsatzes der Einzelkomponenten und der Betriebsweise der Gesamtanlage zu erarbeiten. Aus diesen Ergebnissen sollen Konzepte für zukünftige Energieversorgungsanlagen mit Aquiferspeichern entwickelt werden.

## Strategie zukünftiger Energieversorgung aus Sicht von Vattenfall Europe AG

Die derzeitigen Investitionen von Energieversorgungsunternehmen wie Vattenfall Europe AG haben einen Zeithorizont von mehreren Jahrzehnten für Laufzeiten von Kraftwerken, bei Leitungsnetzen noch länger. Sie haben daher strategischen Charakter. Die Investitionsentscheidungen werden zwar von wirtschaftlichen Kriterien bestimmt, es spielen aber auch eine Vielzahl weiterer Faktoren direkt oder indirekt eine Rolle. Die Treibhausproblematik schlägt sich beispielsweise direkt über den Emissionshandel in der Wirtschaftlichkeit nieder, genauso wie die Sicherheit beim Brennstoffeinkauf und der marktbestimmte Absatz des Stroms und der Wärme. Hinzu kommen Aspekte der Zukunftsfähigkeit der gewählten Technologien, der Sozialpolitik und der Umwelt.

Darauf aufbauend möchte Vattenfall Europe ein Investitionsprogramm in Deutschland mit bis zu 6 Milliarden Euro bis 2012 verwirklichen. Geplant sind hocheffiziente Kohlekraftwerke mit Wärmeauskopplung mit der Entwicklungsperspektive so genannter CO<sub>2</sub>-freier Kohlekraftwerke. Gleichzeitig wird der Stellenwert von grundsätzlich emissionsfreien Kraftwerken wie erneuerbare Energiequellen im Gesamtkonzept wachsen. Kernkraftwerke werden einer dem technischen Fortschritt angepassten Prüfung unterzogen. Dazu kommen die Erweiterung der Fernwärmenetze sowie der Ausbau der Übertragungs- und Verteilungsnetze.

Die 30-MW-Pilotanlage für ein CO<sub>2</sub>-freies Kraftwerk nach der Vattenfall Technologie mit reinem Sauerstoff befindet sich am Standort Schwarze Pumpe im Bau und wird voraus-

sichtlich 2008 in Betrieb gehen. Es soll damit der Betrieb eines CO<sub>2</sub>-freien Kohlekraftwerkes getestet werden. Zudem finden Versuche zur Endlagerung des CO<sub>2</sub> in Ketzin westlich von Berlin zusammen mit dem GFZ Potsdam statt.

Vattenfall Europe betreibt in Deutschland fast 3.000 MW Pumpspeicher- und Laufwasserkraftwerksleistung, einige Onshore-Windkraftanlagen, besitzt einen 24,5 %-igen Anteil an der Offshore-Projektentwicklungsgesellschaft für Borkum Riffgrund und beteiligt sich an der Errichtung und dem Betrieb des ersten deutschen Offshore-Windparks in der Nordsee DOTI (Deutsche Offshore-Testfeld- und Infrastruktur-Gesellschaft).

Das erste und bisher einzige Erdwärmekraftwerk Deutschlands in Neustadt-Glewe wurde von Vattenfall Europe im Jahr 2003 errichtet und seitdem betrieben. Als nächstes Projekt ist das Erdwärmekraftwerk Groß-Schönebeck nördlich von Berlin geplant, wo derzeit die zweite Bohrung vom GFZ Potsdam niedergebracht wird und danach dort ein Erdwärmekraftwerk errichtet werden soll.

Ein Biomassekraftwerk wurde 2006 in Sellessen in der Lausitz gestartet und ein weiteres großes soll in Hamburg folgen. Weiterhin gibt es eine Beteiligung an der Einsatzforschung von Brennstoffzellen im stationären und mobilen Bereich.

Geothermie und Biomasse entsprechen mit ihrer wetterunabhängigen, stetigen Verfügbarkeit sehr gut den Anforderungen eines Grundlastbetriebes in der Stromversorgung und ermöglichen dadurch eine hohe Anzahl von Nutzungsstunden. Als Beispiel für die bereits erreichte Schwelle zur Wirtschaftlichkeit ist der boomende Erdwärmepumpenmarkt zu nennen.

Leider gelangen Vattenfall Europe mit der Mitverbrennung von Biomasse in hochmodernen Braunkohlekraftwerken bisher nur punktuelle Erfolge, da das Erneuerbare-Energien-Gesetz hinsichtlich der Vergütung die Biomasseverbrennung auf die kleineren, weniger effektiven Biomassekraftwerke begrenzt.

Aufgrund der begrenzten Biomasse-Ressourcen einer nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und auch der Konkurrenzsituation

mit den Bio-Kraftstoffen wird die Biomasse in der Strategie von Vattenfall wahrscheinlich nur eine Ergänzungsfunktion einnehmen können. Das große Potenzial der tiefen Geothermie dagegen soll mit einem eigenen Beitrag das derzeitige Erschließungstempo steigern.

## Ausblick

Geothermisch getriebene KWK ist eine Option zukünftiger Energieversorgung, in der saisonale Speicher eine wichtige Rolle spielen können. Alle drei vorgestellten Projekte, die zusammen diese Option beleuchten, implizieren einen Bedarf an weiterer Technologieentwicklung.

Aus den Erfahrungen der ersten Betriebsjahre des Heizkraftwerkes Neustadt-Glewe lernen wir, dass noch weitere Instrumente der Modellierung sowie der Mess- und Regeltechnik benötigt werden, um optimale Betriebspunkte für den durch die Wärmeleitung bedingten Teillastbetrieb zu finden und einzustellen. Es ist bemerkenswert, dass unter den derzeitigen Bedingungen der Erlös aus dem Verkauf einer Kilowattstunde Wärme frei Erdwärmeheizkraftwerk eindeutig höher ist als beim Stromverkauf. Dieser Vorteil kann allerdings nicht auf Standorte ohne Wärmenetze übertragen werden. Die ebenfalls nicht billigen Stromnetze können dagegen auf der Grundlage des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes kostenlos genutzt werden.

Die Arbeiten in Groß Schönebeck führen auf den Weg zu mehr Planungssicherheit in der Erschließung tiefer wasserführender Schichten. Diese Planungssicherheit begründet sich auf neue Erkenntnisse in der Anwendung von Hydraulikfracturing-Verfahren in der Geothermie sowie aus den operativen Erfahrungen zur aktuellen Abteufung der neuen Forschungsbohrung. Die nächsten Schritte sind der Nachweis der prinzipiellen Fündigkeit heißer Tiefenwässer am Standort sowie mit zusätzlichen finanziellen Mitteln des Landes Brandenburg und Vattenfall Europe der Nachweis der Nachhaltigkeit eines Thermalwasserkreislaufes. Dieses zusammen bildet die Voraussetzung zum Aufbau eines geothermischen Kraftwerkes am Standort durch Vattenfall Europe.

Im Energieversorgungssystem der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen wird ein besonderes Augenmerk auf den Betrieb der terrestrischen Wärme- und Kältespeicher gelegt. Die ersten Betriebsjahre zeigen, dass Be- und Entladung erfolgreich durchgeführt werden konnten. Die Energieversorgung soll in Zukunft noch effizienter gestaltet werden, nachdem das Zeitverhalten dieser Speicher weiter untersucht und mit den Ergebnissen ihre Einbindung in das Energiesystem optimal gestaltet wird.

Die aufgezeigten drei Beispiele der geothermischen Technologieentwicklung zeigen, dass hier wichtige Beiträge für den weltweiten Ausbau regenerativer Energien entstehen können, denn der geologische Untergrund hier ist typisch für weite Teile Mitteleuropas und damit repräsentativ für viele Gebiete. Funktioniert diese geothermische Technologie also in Deutschland erfolgreich, dann kann sie weltweit auf Gebiete ähnlicher geologischer Struktur übertragen werden.

Diese Entwicklung soll in Zukunft gemeinsam mit Unternehmen der Energiewirtschaft zu einem effizienten Technologietransfer aus der Forschung in die Anwendung führen. Die Vorteile liegen in der Verbesserung der Projektabwicklung zur Abdeckung des geologischen, technischen und finanziellen Managements. Operative Projekte führen zu Komponenten der Energieversorgung, die mit Hilfe weiterer Unternehmen optimal in entsprechende Netzstrukturen eingebunden werden können. Durch den gemeinsamen Aufbau von Pilot- und Demonstrationsanlagen durch Forschungseinrichtungen und Unternehmen der Energiewirtschaft schafft man die Möglichkeit, die Erschließung der gewaltigen geothermischen Potenziale zu beschleunigen.

## Literatur

- [1] Huenges E., Jung R., Kehrner P., Wagner H.J., Rummel F., Preuße A. und Kukla P., Erschließung tiefer Geothermiequellen zur Wärme- und Kältegewinnung, Wärme und Kälte-Energie aus Sonne und Erde, Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie Tagungsband, p.68-74, 2005
- [2] Huenges, E., Holl, H.-G., Legarth, B., Zimmermann, G., Saadat, A., Tischner, T. Hydraulic stimulation of a sedimentary geothermal reservoir in the North German basin: case study Groß Schönebeck, Zeitschrift für Angewandte Geologie, 50, 2, 24-27, 2004.
- [3] Bartels J., Simulation von saisonaler Wärme- und Kältespeicherung im Grundwasser: Validierung und Prognoserechnungen mit Betriebsdaten der Aquiferspeicher der Berliner Parlamentsbauten. 6. Fachtagung „Grafikgestützte Grundwassermodellierung“, Köln, 2004.
- [4] Köhler S., Kabus F. und Huenges E. Saisonale Speicherung thermischer Energie im Untergrund, Physik in unserer Zeit, im Druck. (2006)
- [5] BINE: Aquiferspeicher für das Reichstagsgebäude. Fachinformationszentrum Karlsruhe, 13/03, 2003