

■ Wärme und Kälte aus Geothermie

- Erschließung tiefer Geothermiequellen zur Wärmegewinnung
- Energetische Nutzung von Wärmequellen niedriger Temperatur
- Wärmepumpen und oberflächennahe Geothermie

Erschließung tiefer Geothermiequellen zur Wärmegegewinnung

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

Dr. Reinhard Jung
GGA Hannover
r.jung@gga-hannover.de

Dr. Peter Kehrer
BGR Hannover
peter.kehrer@bgr.de

Prof. Dr. Peter Kukla
RWTH Aachen
kukla@geol.rwth-aachen.de

Prof. Dr. Axel Preuß
RWTH Aachen
preuss@ifm.rwth-aachen.de

Prof. Dr. Fritz Rummel
Uni Bochum
fritz.rummel@
lee.ruhr-uni-bochum.de

Prof. Dr.
Hermann Josef Wagner
Uni Bochum
lee@lee.ruhr-uni-bochum.de

Die Energiegewinnung aus Erdwärme in Regionen mit geothermischen Anomalien wie zum Beispiel in Island, Italien und der Türkei hat sich erfolgreich etabliert. Aber auch Gebiete mit normalen geothermischen Bedingungen wie z. B. Deutschland, in denen die Temperatur mit der Tiefe um ca. 30 °C/km zunimmt, verfügen über hohe aussichtsreiche geothermische Potenziale. Die deutsche Forschung nimmt weltweit eine Spitzenposition in der Technologieentwicklung zur standortunabhängigen Gewinnung von Erdwärme ein, insbesondere bei der Stimulation geothermischer Reservoirs, einem Verfahren zur Steigerung der Lagerstättenproduktivität. Die Sedimentgesteine des Norddeutschen Beckens eignen sich besonders für Untersuchungen, da sie in einer Region mit großen Ballungsgebieten liegen und das notwendige Nachfragepotenzial aufweisen. Hier können Technologien zur Erschließung der Erdwärme beispielgebend für viele Regionen weltweit entwickelt werden.

Für geothermische Anwendungen sind sehr viel höhere Volumenströme in den Produktionsbohrungen erforderlich als bei Erdölbohrungen. Um diese Volumenströme zu erreichen, musste die in der Erdölindustrie gängige Technologie der hydraulischen Stimulation modifiziert und an die Bedingungen geothermischer Lagerstätten angepasst werden. In mehreren Projekten, wie z. B. dem europäischen Hot Dry Rock-Projekt (HDR) in Soultz-sous-Forêts, wurden in den letzten Jahren auf diesem Gebiet große Fortschritte erzielt. Die dort entwickelten Techniken gilt es jetzt an anderen Standorten einzusetzen und weiterzuentwickeln.

Die verschiedenen Methoden der Erdwärmegegewinnung aus den Sedimenten des Norddeutschen Beckens (Groß Schönebeck, Horstberg, Bochum und Aachen) unterscheiden sich durch spezielle Anforderungen und Nutzungscharakteristika. Im Folgenden werden diese Projekte beschrieben:

- ein mesozoisches Wasserreservoir in Hannover im Buntsandstein,
- paläozoische Reservoirs in Groß Schönebeck im Rotliegenden,
- in Bochum im Karbon und
- in Aachen im Devon.

Die Erschließungskonzepte variieren wegen unterschiedlicher natürlicher Wasserführung der geothermischen Reservoirs von trockenen Lagerstätten in Aachen und Bochum bis zu Lagerstätten, die zwar wasserführend sind, aber künstliche Nachbesserung durch hydraulische Stimulation bedürfen wie in Hannover und Groß Schönebeck. Es werden weitere Gemeinsamkeiten und Synergien zwischen den Projekten aufgezeigt, die alle das Ziel verfolgen, standortunabhängige Nutzungskonzepte für die Wärme-, Kälte- oder Strombereitstellung zu entwickeln.

Das Groß Schönebeck-Projekt des GFZ Potsdam

Im Rahmen eines umfangreichen Untersuchungsprogramms beschäftigt sich das GFZ Potsdam mit Schlüsselfragen geothermischer Technologien:

- Wie findet und erzeugt man produktive Wasserreservoirs?
- Wie sichert man hohe Energieproduktivitäten?
- Was passiert bei der geothermischen Nutzung im Reservoir?
- Wie wandelt man möglichst effizient die Wärme der Erde in elektrischen Strom um?

Für die Beantwortung dieser Fragen sind Experimente unter natürlichen Bedingungen notwendig. Daher wurde im Jahr 2000/2001 das In situ-Geothermielabor Groß Schönebeck (*Abb. 1*) in einer 4.300 m tiefen Altbohrung eingerichtet [1]. Die Bohrung erschließt die wasserführenden Gesteine des Rotliegenden.



- Verbesserte Bohrtechnologien und -strategien sollen die Anfangsinvestitionskosten für geothermische Tiefbohrungen kostengünstiger und den Bohrprozess sicherer gestalten.
- Erhöhung der Lebensdauer von Bohrungswerkzeugen
- Senkung des Energie- und Materialverbrauches während des Bohrens
- Komplettierungssysteme speziell für die Geothermieanwendung
- speicherschonende Aufschlussverfahren

*Abbildung 1
Fördertest 2001 an
der Bohrung Groß
Schönebeck 3/90*

Beim Abteufen einer für den Herbst 2005 geplanten neuen Forschungsbohrung in Groß Schönebeck soll der Wärmespeicher durch besonders schonendes Bohren mittels spezieller Kühl- und Spülverfahren für die angestrebte Langzeitnutzung optimal vorbereitet werden.

Das Labor dient dazu, theoretische Voruntersuchungen in einer Bohrung im Maßstab 1:1 experimentell zu überprüfen. Wir verfügen damit über die weltweit einzige Einrichtung zur Untersuchung der geothermischen Nutzung sedimentärer Großstrukturen unter natürlichen Bedingungen.

In einer Serie von Experimenten wurde das durch die Bohrung erschlossene Speichergestein mit einem speziellen Verfahren (hydraulic fracturing) für Wasser durchlässig gemacht. Dabei wurden 12.000 m³ Wasser unter hohem Druck durch die Bohrung in den Untergrund gepresst, um das Gestein aufzubrechen und dem Thermalwasser zusätzliche Fließwege durch den Wärmespeicher zu schaffen. Mit dieser Wasser-Rissbildungstechnik kann die Produktivität von Lagerstätten gezielt gesteigert werden. Nach der Anwendung dieses Verfahrens in der Bohrung Groß Schönebeck konnte eine Reservoirproduktivität erreicht werden, die geothermische Stromerzeugung am Standort möglich macht.

Im Mittelpunkt aktueller Forschungsprojekte stehen Verfahren zur Optimierung der Arbeiten im Untertagebereich. Die für eine geothermische Anlage erforderlichen Bohrungen stellen beim gegenwärtigen technischen und technologischen Stand noch die höchsten Kosten dar. Hier liegen große Einsparungspotenziale:

Im August 2005 wurden durch das Bundesumweltministerium und das Wirtschaftsministerium Brandenburg die Mittel für die zweite Forschungsbohrung bereitgestellt: Der Standort wird mit der zweiten Bohrung zu einem Dublettensystem ausgebaut. In einem Thermalwasserkreislauf sollen erstmalig in Deutschland die für die Stromerzeugung erforderlichen Mengen von 150 °C heißem Tiefenwasser gefördert und die Nachhaltigkeit der Förderung überprüft werden. Die zweite Bohrung eröffnet die praktische Chance, neuentwickelte Verfahren einzusetzen, um geothermische Stromerzeugung in der Zukunft planungssicher und wirtschaftlich zu ermöglichen. Damit werden die Voraussetzungen für den Betrieb eines geothermischen Kraftwerkes in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Vattenfall Europe geschaffen, wodurch Forschungsergebnisse schnell in die wirtschaftliche Anwendung kommen.

Das Genesys-Projekt Hannover

In dem vom BMU geförderten Forschungsvorhaben GeneSys werden neue Einbohrloch-Verfahren zur Wärme­gewinnung aus geringdurchlässigen Sedimentgesteinen des tiefen Untergrundes erprobt. [2] Schlüsseltechnologie ist auch hier die Stimulation mittels der Wasser-Rissbildungstechnik, mit der in hydraulisch

dichten Sedimentgesteinen großflächige Gesteinsrisse erzeugt werden. Diese Rissflächen sollen durchströmt und somit als Wärmeaustauschflächen zum Entzug der Gesteinswärme genutzt werden. In der ehemaligen Erdgaskundungsbohrung Horstberg Z1 bei Unterlüß im Norddeutschen Becken wurden in den vergangenen zwei Jahren erfolgreiche Experimente zur Entwicklung dieser Verfahren mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

- Durch zwei massive Wasserfrac-Tests gelang es, in 3.800 m Tiefe eine mehr als 100.000 m² große Rissfläche in der im Norddeutschen Becken weit verbreiteten Buntsandsteinformation zu erzeugen.
- Hydraulische Nachuntersuchungen erbrachten den Beweis, dass der Gesteinsriss trotz des außerordentlich hohen Gebirgsdrucks, der in dieser Tiefe herrscht, durch natürliche Stützmechanismen offen gehalten wird. Somit kann auf das technisch sehr aufwändige und teure Einbringen künstlicher Stützmittel in die Rissflächen verzichtet werden.

Zwei neuartige Einbohrlochkonzepte zum Entzug der Gesteinswärme wurden erfolgreich getestet:

- Beim „Zyklischen Verfahren“ wird kaltes Wasser in die Rissfläche injiziert. Dieses erwärmt sich während einer Aufwärmphase und wird als Heißwasser wieder zutage gefördert. Mit diesem im Tages- und Wochenzyklus getesteten Verfahren wurden thermische Leistungen von mehr als 1 MW erreicht.
- Beim „Tiefenzirkulationsverfahren“ wurde während eines einwöchigen Zirkulationstests Wasser in den annähernd vertikalen Gesteinsriss verpresst, das sich beim Durchlauf durch die Rissfläche erwärmte und über eine ca. 120 m oberhalb des Injektionspunktes gelegene Sandsteinbank wieder in die Bohrung zurückströmte.

Die mit diesen beiden Verfahren erzielte thermische Leistung von mehr als 1 MW liegt deutlich über der Leistungsgrenze einer gleich tiefen Erdwärmesonde. Numerische Modellrechnungen zeigen, dass bei Risshalbängen von mehr als 500 m, wie sie vermutlich in der

Bohrung Horstberg Z1 erreicht wurden, die thermische Nutzungsdauer des Systems mehr als 25 Jahre beträgt.

Die Ergebnisse in der Bohrung Horstberg Z1 wurden von einem Expertenteam so positiv beurteilt, dass im Frühjahr 2005 der Startschuss für das Demonstrationsvorhaben GeneSys-Hannover mit folgender Vorgehensweise gegeben wurde:

- Im Jahr 2006 soll auf dem Gelände des Geozentrums Hannover eine ca. 3.800 m tiefe Bohrung abgeteuft werden.
- Mit Hilfe der in der Bohrung Horstberg Z1 erprobten Erschließungskonzepte sollen zukünftig der Gebäudekomplex des Geozentrums, das über rund 35.000 m² Büro- und Laborfläche verfügt, geothermisch beheizt und auf diese Weise jährlich annähernd 1 Mio. Kubikmeter Gas eingespart werden.

Das Prometheus-Projekt Bochum

Zielsetzung des Pilotprojekts Prometheus ist die Übertragung der HDR-Technologie, wie sie im europäischen HDR-Projekt Soultz-sous-Forêts zur Stromerzeugung bei hohen Untergrundtemperaturen, einem granitischen Untergrund und Grabentektonik entwickelt wurde, auf einen Standort mit normalen Bedingungen (30°C/km, tiefe Sedimente des Oberkarbons, [3]). Die geförderte Wärme soll einen Großverbraucher – die Ruhr-Universität, Universitätswohnstadt, Fachhochschule Bochum – ganzjährig mit Wärme versorgen (Abb.2). Das Projekt wird in drei Schritten realisiert:

1. Machbarkeitsstudie

Die Machbarkeitsstudie wurde mit folgenden Ergebnissen erstellt:

- Die Geologie des Untergrunds bis ca. 4 km Tiefe ist durch feinkörnige Tonsteine, Siltsteine, Sandsteine/Grauwacken und Quarzite charakterisiert. Aufgrund zahlreicher Daten aus Tiefbohrungen bis ca. 1.200 m Tiefe kann in 4 km Tiefe eine Temperatur von 120°C prognostiziert werden.

- Die physikalischen Eigenschaften der Untergrundgesteine wurden detailliert durch Laborversuche an Proben aus Oberflächenaufschlüssen des südlichen Ruhrgebiets ermittelt. Sie weisen insbesondere geringe Permeabilitäten und eine gute Stimulierbarkeit auf.
- Der Wärmebedarf für 56.000 Personen beträgt ca. 300.000 MWh/a. Durch die Erdwärme soll lediglich die Grundlast von ca. 8 MW bereitgestellt werden, das jedoch über 8.000 Jahresstunden. Das erfordert eine Produktionsrate von ca. 30 Sekundenlitern aus der Produktionsbohrung. Die Erdwärme wird in das vorhandene Wärmeverteilungsnetz eingebunden.

2. Erkundungsbohrung

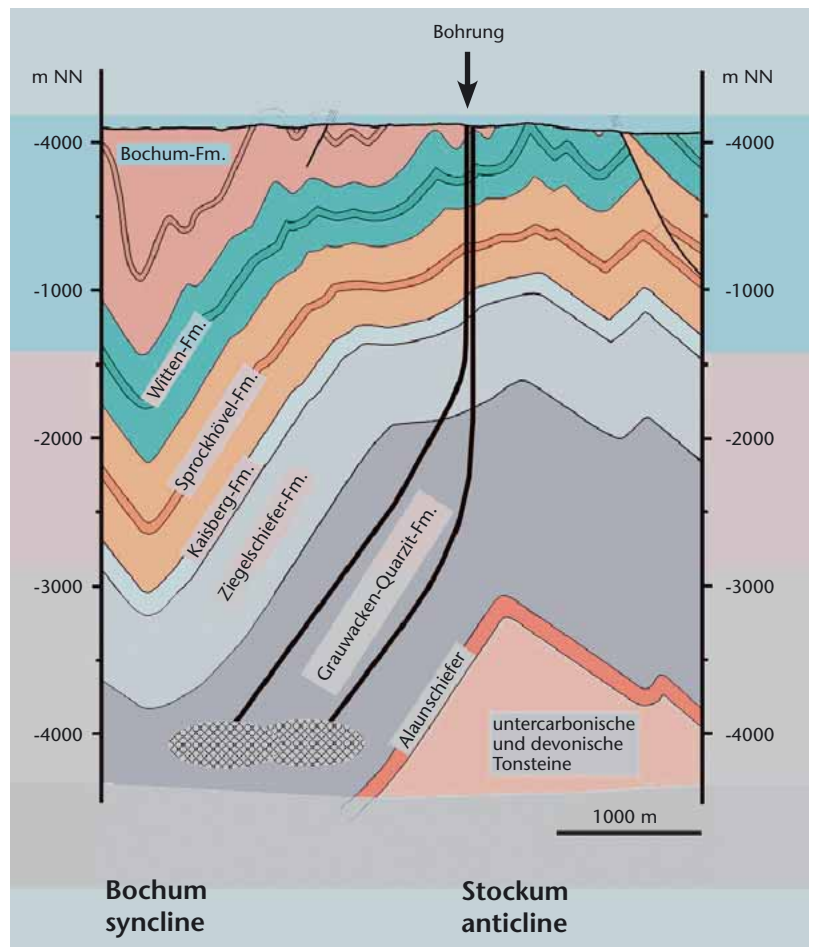
Es wurden durch die Ruhruniversität Bochum (RUB) ein Erlaubnisfeld von 7 x 7 km zur Aufsuchung von Erdwärme erworben und ein geeigneter Bohrplatz in unmittelbarer Nähe der RUB festgelegt. In der Explorationsphase ist vorgesehen:

- Niederbringen der Explorationsbohrung im Frühjahr 2006. Geophysikalische/geologische Bohrlochmessungen, moderate Stimulation mit seismischer Beobachtung mittels einer 600 m tiefen seismischen Beobachtungsbohrung.
- Bildung eines Betreiber-Konsortiums mit der Industrie.

3. Realisierung mit der Schaffung des unterirdischen Wärmetauschers und einer zweiten Tiefbohrung.

Bei Darstellung geeigneter hydraulischer Verhältnisse im Reservoir, ca. 30 Sekundenliter, wird die Bohrlochdublette komplettiert und die Projektrealisierung vorangetrieben.

Das Projekt wird gefördert durch das Land NRW (im REN-Programm) und die Europäische Union (im Ziel II Phase V Programm).



Das SuperC-Projekt Aachen

Zur Sicherung der Wärme- und Kälteversorgung des „SuperC“ (dem neuen Studenten Service Center der RWTH Aachen mit Studentensekretariat, Zentralem Prüfungsamt, Akademischem Auslandsamt, Firmenkontaktbüros und Konferenzräumen) soll Erdwärme als Energiequelle genutzt werden. Die Versorgung des Gebäudes mit geothermischer Energie erfolgt über eine so genannte „tiefe Erdwärmesonde“ [4]. Zu den erklärten Zielen des entsprechenden Geothermieprojektes „SuperC“ gehört der Nachweis über die Realisierbarkeit des Baus einer tiefen Erdwärmesonde im Rahmen der geltenden gesetzlichen Bestimmungen und technischen Regeln unter Verwendung einfacher und ressourcensparender Methoden. Ein erster wichtiger Schritt war das Niederbringen der 2.500 m tiefen Bohrung „RWTH-1“ am zukünftigen „SuperC“-Standort, Ecke Templergraben/Wüllnerstraße, in Aachen im Jahre 2004.

Abbildung 2
Hypothetisches Bohrprofil Prometheus
Fm = geol. Formation



*Abbildung 3
Innerstädtische
Bohrung in
Aachen 2004
Webkameraaufnahme*

Bedingt durch den innerstädtischen Bohrplatz liegen in direkter Nachbarschaft Hochschulgebäude, in denen tagsüber Hochschulbetrieb stattfindet (Abb. 3). Die Anwohner und Mitarbeiter der RWTH Aachen mussten während der Arbeiten, die rund um die Uhr durchgeführt wurden, weitestgehend vor Lärm- und Abgasemissionen geschützt werden. Berücksichtigung fand die zwischen 100 und 140 Metern entfernte nächste Wohnbebauung. Trotz vorgenommener Lärminderungsmaßnahmen konnte für die Nachtstunden eine Richtwertüberschreitung an den Immissionsaufpunkten nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Dennoch kann von einem reibungslosen Ablauf der Bohrung gesprochen werden: Es gab lediglich, vier Anwohnerbeschwerden. Andererseits hat das äußerst rege Interesse am Geschehen auf dem Platz die Richtigkeit dieses Vorgehens in der operativen Phase bestätigt. Die projektierte Temperatur von 80 °C wurde erreicht. Die nächsten Schritte umfassen die geowissenschaftliche Auswertung [5] sowie die detaillierte Konzipierung der Nutzungsanlage unter Berücksichtigung des Bohrergebnisses. Insbesondere muss überprüft werden, welche Wärmemengen mit welcher Temperatur aus der Erdwärmesondenanlage den Nutzungsanlagen zugeführt werden können.

Schlussfolgerungen

Nach der Realisierung der hier vorgestellten Projekte kann die Technologie der Einlochbohrung für den kleineren Wärmebedarf weitgehend betriebssicher durchgeführt werden. Diese Technologie ist allerdings relativ leistungsarm für geschlossene tiefe Erdwärmesonden wie in Aachen und etwas leistungsstärker aber auch betriebsaufwändiger für offene Bohrungen wie in Hannover.

Für größere Wärmeabnehmer wie in Bochum oder Anlagen zur geothermischen Stromerzeugung wie in Groß Schönebeck müssen mindestens zwei Bohrungen niedergebracht werden, die einem Wärmeträger den Durchfluss im Reservoir ermöglichen.

Eine Übersicht ist in Tab. 1 gegeben. (Siehe S. 73 oben)

Die Anfangsinvestitionen für die Bohrungen nehmen den größten Anteil an den geothermischen Wärmebereitstellungskosten ein. Daher ist es trotz der unterschiedlichen lokalen Zielstellungen vorteilhaft, die operativen Arbeiten der Projekte gemeinsam zu betrachten.

Synergien sind neben der technischen Durchführung beim Austausch der Erfahrungen zur Güte der Vorerkundungen vorstellbar. So hat die einzige zurzeit existierende Neubohrung der vier Beispiele in Aachen keine Übereinstimmung mit zwei konkurrierenden Vorprofilen gebracht. Die Vorprofile in Bochum, Hannover und Groß Schönebeck, die aus Informationen aus Nachbarbohrungen und auf der Basis von geophysikalischen Messungen erstellt wurden, müssen noch durch die Neubohrungen überprüft werden.

Außer in Aachen werden in den hier vorgestellten Projekten offene Systeme angewandt. Zur Gestaltung des unterirdischen Wärmetauschers im HotDryRock-Verfahren wie in Bochum und zur Erweiterung der Fließwege aus den wasserführenden Tiefensedimenten spielt das Verfahren der hydraulischen Stimulation eine Schlüsselrolle. Synergien wurden durch die langjährige Zusammenarbeit zwischen der RUB, BGR/GGA Hannover und GFZ schon nachgewiesen.

Standort	Reservoir-tiefe [m]	Temperatur °C	Thermische Leistung aus der Erde kW _{geplant}	Status Quo 09/2005	Nutzungskonzept	Inbetriebnahme
Groß Schönebeck	4300	150	10.000	Eine existierende Bohrung mit stimuliertem Reservoir	Stromerzeugung durch Wandleranlage (z. B. ORC) gespeist mit Tiefenwasser unter Nutzung einer Dublette (Förder- und Injektionsbohrung) (Hydrothermalverfahren)	2007 bei plangemäßer Erfüllung von gesetzten Meilensteinen
Hannover GeneSys	3800	130 _{geschätzt}	2.000	Bohrbeginn 2006 Vorerkundung in Testbohrung Horstberg	Wärmeversorgung mit Einbohrlochverfahren mit Nutzung von künstlichen Fließwegen im Gebirge	offen
Bochum Prometheus	4000	< 120 _{geschätzt}	8.000	Bohrbeginn 2006	Wärmeversorgung (Dublette) gespeist mit Wasser, die durch künstlichen Wärmetauscher im Gebirge zirkulieren (HotDryRock-Verfahren)	offen
Aachen SuperC	2500	>80	450 _{planung}	Eine existierende Bohrung	Wärmeversorgung mit geschlossener tiefer Erdwärmesonde	offen

So wird die Methode des massiven Wasserfracs, d. h. Stimulation durch das Verpressen großer Wassermengen, für die geothermische Anwendung bevorzugt.

Zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit der künstlich erzeugten Risse in den Sedimenten werden in Groß Schönebeck sogenannte Stützmittel verwendet. Das Wasser wird dabei mit hochviskosen Zusätzen versetzt, die sich in den hydraulisch erzeugten Rissen im Gestein einlagern und sie auch nach der Druckentlastung am Ende der Stimulationsbehandlung offen halten.

Wärme lässt sich nicht kostengünstig transportieren. Daher gehört den Anlagen die Zukunft, die nahe an den Verbrauchern, also nach Möglichkeit innerstädtisch erstellt werden. Deshalb verdienen die innerstädtischen Bohrprojekte in Aachen, Bochum und Hannover besondere Aufmerksamkeit.

Diskussionspunkte

Nach Abschluss der vier Projekte wird man in der Lage sein zu erkennen, welche Konzepte realisierbar sind und wie man sie beispielhaft umsetzen kann. Für die Projekte konnten in der Regel sachbedingt nur unzureichende Abschätzungen für die Wärmegestehungskosten gemacht werden. Zum Beispiel wurden für das Bochumer Projekt Kosten von 6,8 Ct für eine geothermische Kilowattstunde Wärme prognostiziert. Die Groß Schönebecker geothermische Kilowattstunde Strom wird vom Investor Vattenfall Europe angesichts der Einspeisevergütung von 15 Ct als wirtschaftlich eingestuft. Dabei sind jedoch die Vorleistungen durch Nutzung einer Altbohrung und die Übernahme des größten Teils der reinen Bohrkosten der Neubohrung durch das Bundesumweltministerium nicht berücksichtigt worden. Verlässliche Kosteneinschätzungen können daher erst nach den ersten Betriebsjahren vorgenommen werden. Insbesondere kann eine Einschätzung der Höhe der erforderlichen Hilfsenergie erst nach Erreichen des optimalen Betriebspunktes

*Tabelle 1
Übersicht über
Geothermieforschungs-
projekte in Nord-
Deutschland
(Stand 09/2005)*

der Erdwärmegewinnung gemacht werden. Erst realisierte Projekte geben uns auch Daten für das Langzeitverhalten des Reservoirs.

Die Wärmegegewinnung aus tiefen Speichern ist nicht immer erfolgreich. Der Erfolg kann immer erst nach Abschluss der Projekte genauer eingeschätzt werden, d. h. ob z. B. die Vorhersage der Qualität der Lagerstätte und ihrer Fündigkeit treffend genug war, ob die geologisch bedingten technischen Risiken beim Bohren richtig eingeschätzt wurden aber auch Fragen der Nachhaltigkeit des Reservoirs und deren Auswirkung auf die Betriebssicherheit der Anlage müssen beantwortet werden. In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass die Betriebssicherheit von SuperC als sehr hoch einzustufen ist, wenngleich die spezifische Kilowattstunde mit erheblich höherem Aufwand gewonnen wird.

Herausstellen möchten wir hier noch einmal die Bedeutung von Demonstrationsvorhaben, die ermöglichen, neue und unausgereifte Techniken in der Anwendung zu erproben, um die Qualität und den Wirkungsgrad geothermischer Anlagen zu steigern. Positiv ist, dass mittlerweile eine zunehmende Investitionsbereitschaft in der Industrie zu verzeichnen ist.

Die Planungssicherheit und die Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen stehen daher im Fokus der aktuellen geothermischen Technologieentwicklung. Wir müssen die Effizienz der Endprodukte bewerten, um zu einer noch klareren Aussage zu kommen, was wir durch gezielte Forschungsanstrengungen weiter optimieren können. Erst dann können wir die offensichtlichen Vorteile der Geothermie nutzen und unabhängig von Saison und Tageszeit eine nachhaltige umweltfreundliche Energie bereitstellen.

Literatur

- [1] Huenges, E., Holl, H.-G., Legarth, B., Zimmermann, G., Saadat, A., Tischner, T. (2004) Hydraulic stimulation of a sedimentary geothermal reservoir in the North German basin: case study Groß Schönebeck, Zeitschrift für Angewandte Geologie, 50, 2, 24-27.
- [2] Orzol J., Jatho R., Jung R, Kehrler P. & Tischner T. (2004) The GeneSys Project: Development of concepts for the extraction of heat from tight sedimentary rocks, Zeitschrift für Angewandte Geologie, 50, 2.
- [3] Grosse K, Rummel F. & Wagner H. J. (2004) The Prometheus Project for Geothermal Heat Supply of the Ruhr University Bochum, Zeitschrift für Angewandte Geologie, 50, 2.
- [4] Herzog, C., Lundershausen, St., Niemann-Delius, C., Preuße, A., (2005) "The Geothermal Project "SuperC" of RWTH Aachen University / Phase I: The well „RWTH-1" in IGA NEWS (Newsletter of the International Geothermal Association), issue No. 61, July - September 2005.
- [5] Trautwein, U., Kukla, P. (2005): Aachen Geothermal Well "RWTH-1" – The geoscientific research program. Meuse-Rhine Euregio Geologists Meeting, Alden Biesen (Belgian Limbourg), abstract volume p. 18, 20-21 May 2005.

Energetische Nutzung von Wärmequellen niedriger Temperatur

Einleitung

Niedertemperaturwärme ist in unspektakulärer Weise überall vorhanden. Am auffälligsten ist wohl die Solarwärme, weil die Kollektoren überall sichtbar sind. Am besten versteckt ist die Geothermie, die zwar überall vorhanden ist, aber nur an wenigen Stellen deutlich zu Tage tritt. Während die Ausbeutung von Solarenergie und Geothermie teuer ist und ihre Nichtnutzung betriebswirtschaftlich nichts kostet, gilt dies nicht für den dritten Typus von Wärmequelle, den wir betrachten wollen: die Abwärme aus Industrieprozessen. Sie ist deswegen besonders interessant, weil ihre Entsorgung selbst schon Geld kostet wegen Investition und Betrieb der nötigen Kühltürme. Die weitere Nutzung wird dadurch beträchtlich erleichtert.

Eine Abschätzung des theoretischen Potentials zeigt, dass es groß genug ist, um technische Anstrengungen zu rechtfertigen. Dieser Aufsatz soll dazu dienen, Nutzungsmöglichkeiten, Grenzen und insbesondere Entwicklungsbedarf zu zeigen.

Eine grobe Charakterisierung der Niedertemperaturwärmequellen ist in *Tab. 1* gegeben.

Die Temperaturbereiche der Wärmequellen sind durchaus ähnlich, wobei die Spanne bei Industrieabwärme am größten ist. Allen Quellen gemeinsam ist auch, dass die Wärmeenergie meist in Form warmem Wassers zwischengespeichert wird und so genutzt werden kann. Die Temperaturspreizung ΔT zwischen Vor- und Rücklauf in diesem Heißwasser ist eine sehr wichtige Größe, die wir im Folgenden für die Diskussion der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten verwenden werden.

Es fällt auf, dass trotz aller Ähnlichkeit im Angebot die typische Nutzung der drei Wärmequellen unterschiedlich ist. Bei den Überlegungen zur Nutzung ist zuerst der lokale Bedarf zu beachten.

In der Verwendung ist elektrische Energie immer am vielseitigsten, denn sie kann immer in die anderen Energieformen umgewandelt werden und ist leicht zu transportieren. Es sollte aber auch der Wert der verschiedenen Energiedienstleistungen (vermiedener Einkauf) und der hierfür nötige Aufwand betrachtet werden. Für letzteren kann als ein intuitiver, qualitativer Maßstab die Summe derjenigen Wärmemengen verwendet werden, die zur Bereitstellung von einer Megawattstunde (MWh) Nutzenergie umgesetzt, das heißt aufgenommen und abgegeben werden müssen. Die Unterschiede im Aufwand sind deutlich größer als beim Marktwert, wie *Tab. 2* zeigt. Dies spricht dafür, dass die oben skizzierten Nutzungsunterschiede nicht ganz marktgerecht sein können.

Bei der direkten Nutzung als Wärme treten keine besonderen anwendungstechnischen Probleme auf. Interessant – und aufwändiger umzusetzen – ist aber die Möglichkeit, das Temperaturniveau mittels unterschiedlicher Wärmetransformationsprozesse zu verschieben.

Prof. Dr. Felix Ziegler
TU Berlin - Institut für
Energietechnik
Felix.Ziegler@tu-berlin.de

Dr. Wolfgang Eisenmann
ISFH
w.eisenmann@isfh.de

Dr. Hans-Martin Henning
Fraunhofer ISE
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

Dr. Silke Köhler
GFZ Potsdam
skoe@gfz-potsdam.de

Tabelle 1

	Sonnenwärme	Geothermie	Abwärme
Angebot	sehr groß	mittel	groß
Dargebot	ungleichmäßig	gleichmäßig	gleichmäßig
Leistungsdichte	niedrig	hoch	hoch
Typische Nutzung für	Wärme	Wärme, Kraft	Wärme, Kälte

Tabelle 2

	Wert	Aufwand
Wärme	5 Ct/kWh	1 MWh Wärmeumsatz pro MWh Nutzwärme
Kälte	10 Ct/kWh	5 MWh Wärmeumsatz pro MWh Kälte
Kraft	20 Ct/kWh	20 MWh Wärmeumsatz pro MWh elektrische Energie

Abbildung 1
Anlagen zur Nutzung
von Niedertempe-
raturwärme:

Oben:
Absorptions-Dampf-
kraftwerk (Kalina)
mit 2MW_{el} Leistung
in Husavik, Island

Photo Siemens PG



Unten links:
Solar angetriebene
Absorptionskälteanlage
der Firma Phönix
Sonnenwärme AG mit
 10kW Kälteleistung

Photo TUB



Unten rechts:
Zinkdach als „unsicht-
bare Wärmequelle“ für
eine Wärmepumpe

Photo Rheinzink



Die Nutzung zur Kälteversorgung kann mit Standardanlagen nicht immer erreicht werden. Hier sind besser angepasste Kältekreisprozesse denkbar und wünschenswert. Dies gilt umso mehr für die Stromerzeugung, da übliche Kraftwerksprozesse bei großen Temperaturspreizungen in der Wärmequelle unpassend sind. Es muss ein Dreiecksprozeß angestrebt werden. Im Folgenden werden alle drei Sektoren diskutiert. Beispiele dazu sind in *Abb. 1* aufgeführt.

Elektrische Energie aus Niedertemperaturwärme

Wir betrachten in *Abb. 2 (links)* eine Wärmekraftanlage, aber nicht im Detail, sondern nur als Blackbox; sie ist charakterisiert durch die Temperaturen der Wärmesenke (Umgebung) T_1 und der Niedertemperaturwärmequelle mit Vorlauf (ein) und Rücklauf (aus) T_{2e} und T_{2a} .

Die Temperaturspreizung der Wärmequelle Q_2 sei $T \Delta = T_{2e} - T_{2a}$, die der Senke sei vernachlässigbar klein. Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik liefern uns für den thermischen Wirkungsgrad $\eta = W/Q_2$, unter Berücksichtigung der thermodynamischen Güte g (Verhältnis zwischen realem und idealem Wirkungsgrad): (*siehe Gleichung 1*).

Es ist offensichtlich, wie der bekannte Carnot-Wirkungsgrad $(T_{2e} - T_1)/T_{2e}$ durch die Spreizung verringert wird. In *Abb. 2 (rechts)* ist dieses Verhalten dargestellt. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Temperatur der Wärmequelle kann natürlich kein hoher thermischer Wirkungsgrad erwartet werden. Aber selbst mit Rücklauftemperaturen von 60°C können von der Anlage noch 10% erzielt werden, wenn die Vorlauftemperatur hoch genug (hier 120°C) ist.

Dies ist allerdings nur mit speziell ausgelegte Kreisläufen möglich: Prozesse mit organischen Arbeitsmitteln oder Sorptions-Kraftprozesse.

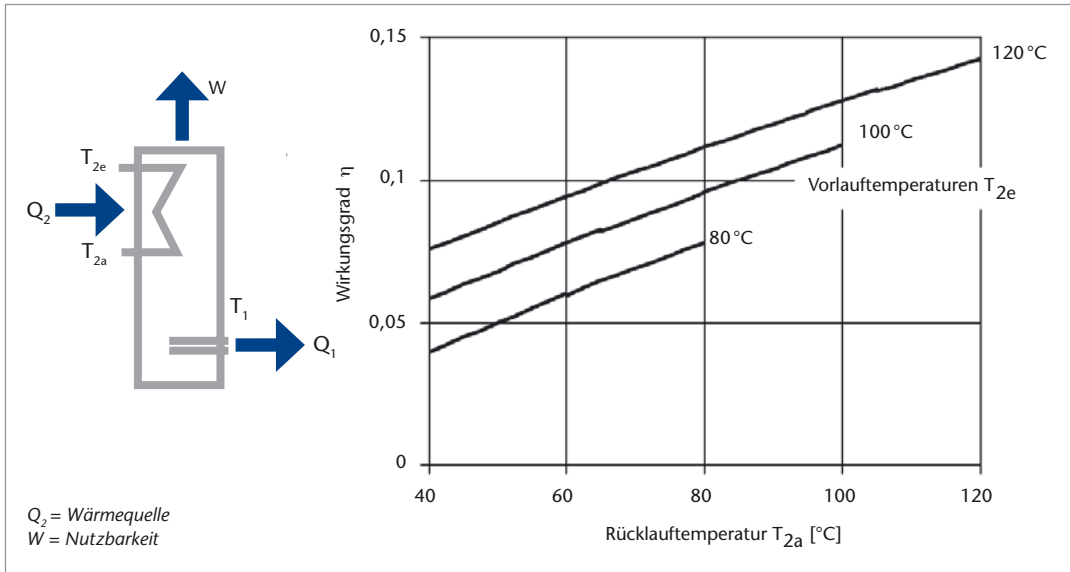


Abbildung 2
Links: Repräsentation eines Kraftwerkes mit gleitender Antriebs-temperatur (Vorlauf \$T_{2e}\$, Rücklauf \$T_{2a}\$) und Kühlwassertemperatur \$T_1\$

Rechts: Wirkungsgrad \$\eta = W/Q_2\$ des Kraftwerkes nach Gleichung (1); Kühlwassertemperatur \$31^\circ\text{C}\$, Grädigkeit¹ \$5\text{K}\$, Güte \$0,7\$

Gleichung 1

$$\eta = \left[1 - \frac{T_1}{T_{2e} - T_{2a}} \ln \left(\frac{T_{2e}}{T_{2a}} \right) \right] g \approx \left[\frac{T_{2e} - T_1}{T_{2e}} - \frac{1}{2} \frac{T_1}{T_{2e}^2} \Delta T \right] g$$

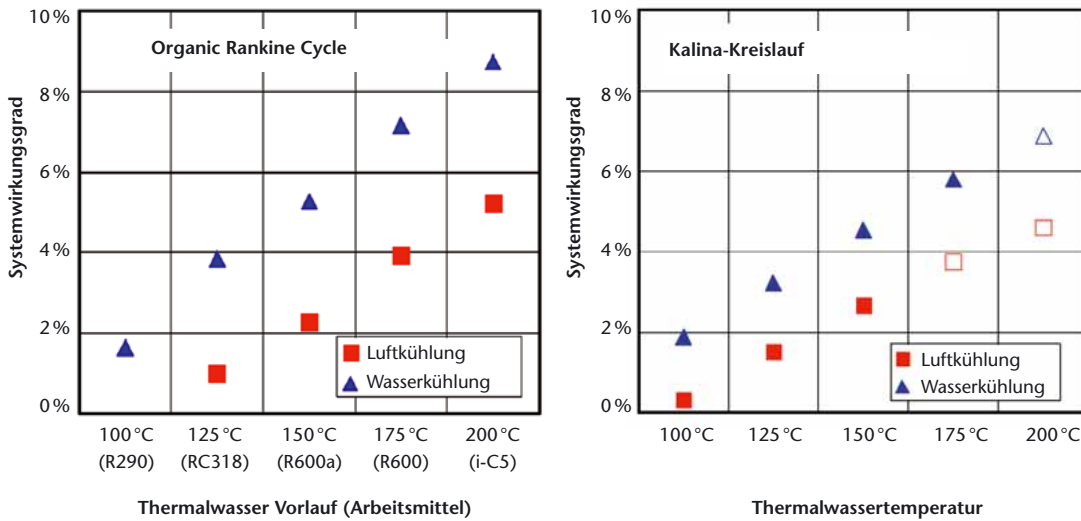


Abbildung 3
Systemwirkungsgrade geothermischer Kraftwerke:

Links: Organic Rankine Cycle; Rechts: Kalina-Kreislauf [1]

Erstere sind auch unter dem Namen ORC, letztere unter dem Namen Kalina-Prozess (Abb. 1) bekannt.

Die hier durchgeführte Abschätzung ist natürlich recht grob, aber durchaus treffend für den eigentlichen Kraftwerksprozess. Im Gesamtsystem kommt meist noch ein nicht zu vernachlässigender Eigenbedarf hinzu, wie beispielsweise für die Tiefenpumpe für das zu fördernde Wasser bei geothermischen Anlagen.

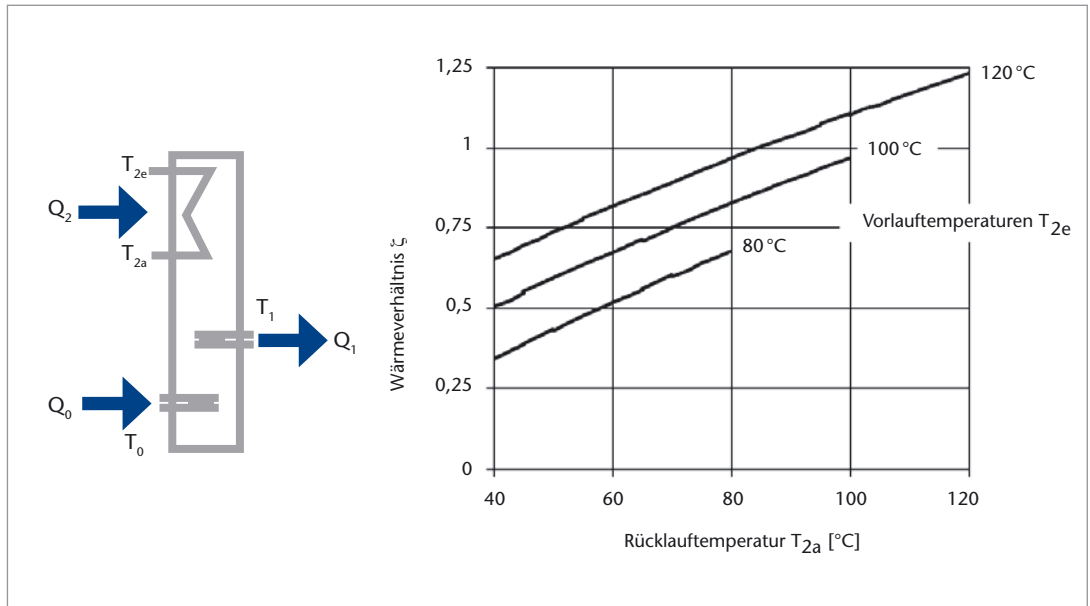
Eine genauere Simulation führt auf die Systemwirkungsgrade in Abb. 3 [1]. Aus den Unterschieden zwischen Abb. 2 und 3 kann abgeleitet werden, dass eine gute Abstimmung der Systemtechnik von immenser Bedeutung für die Nutzung von Niedertemperaturwärme ist.

¹ Die den Wärmeübergang treibende Temperaturdifferenz

Abbildung 4

Links: Repräsentation einer Absorptionskälteanlage mit gleitender Antriebstemperatur (Vorlauf T_{2e} , Rücklauf T_{2a}), Kühlwassertemperatur T_1 und Kälteproduktion bei T_0

Rechts: Wärmeverhältnis $\zeta = Q_0/Q_2$ der Kälteanlage nach Gleichung (2); Kühlwassertemperatur 31 °C, Kälteproduktion bei 9 °C, Grädigkeit 5K, Güte 0,7



Gleichung 2

$$\zeta = \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} \left[1 - \frac{T_1}{T_{2e} - T_{2a}} \ln \left(\frac{T_{2e}}{T_{2a}} \right) \right] g \approx \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} \left[\frac{T_{2e} - T_1}{T_{2e}} - \frac{1}{2} \frac{T_1 \Delta T}{T_{2e}^2} \right] g$$

Kälte aus Niedertemperaturwärme

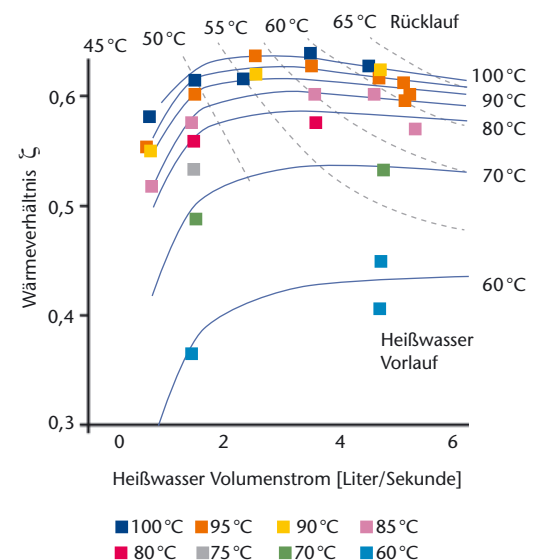
Wir betrachten nun das Schema einer Sorptionskälteanlage (Abb. 4 links). Sie ist zusätzlich charakterisiert durch die Temperatur der erzeugten Kälte T_0 . Der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik liefern uns das sogenannte Wärmeverhältnis $\zeta = Q_0/Q_2$, welches die Menge Kälte angibt, die aus einer bestimmten Wärmemenge erzeugt werden kann: (siehe Gleichung 2)

Gleichung 1 muss lediglich mit der Leistungszahl $T_0/(T_1 - T_0)$ einer reversiblen Kälteanlage multipliziert werden; es ergibt sich Abb. 4 (rechts). Der thermische Wirkungsgrad für Kälte ist etwa eine Größenordnung größer als der thermische Wirkungsgrad für Kraftwerke. Es kann etwa zehnmal soviel Kälte wie Strom erzeugt werden. Selbst mit Rücklauf-temperaturen von 60 °C kann noch die gesamte in den Prozess hineingesteckte Niedertemperaturwärme in Nutzkälte verwandelt werden, wenn die Vorlauf-temperatur 120 °C beträgt.

Abbildung 5

Wärmeverhältnis $\zeta = Q_0/Q_2$ einer Single-effect/Double-lift Absorptionskälteanlage als Funktion des Volumenstroms der Niedertemperaturwärmequelle (Heißwasser) [2]

Dafür sind allerdings wiederum speziell ausgelegte Kreisläufe nötig; die standardmäßig eingesetzten Kaltwassersätze sind für diesen Einsatzfall ungeeignet. Das nötige Wissen ist aber grundsätzlich vorhanden. Abb. 5 zeigt als Beispiel gemessene Leistungsdaten einer von der Firma Entropie GmbH nach einem Konzept des ZAE Bayern gebaute Anlage [2].



Aufwertung von Niedertemperaturwärme

Die thermische Aufwertung von Wärme geschieht mit Wärmepumpen. Meist verwenden Wärmepumpen als Wärmequelle die Umgebung in Form von Luft, Erdreich oder Grundwasser. Deren Temperatur ist typischerweise kälter als bei den bisher diskutierten Beispielen. Es ist aber bekannt, dass eine Wärmepumpe umso effizienter arbeitet, je höher die Temperatur der Wärmequelle ist. Dies bedeutet, dass Wärme im von uns bisher betrachteten Temperaturbereich hervorragend als Wärmequelle für alle Arten und Anwendungen von Wärmepumpen geeignet ist. Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung sind gut bekannt, weshalb hier nur auf die weiter in die Zukunft weisenden Arbeiten des ISFH und des Fraunhofer ISE in diesem Bereich hingewiesen werden soll:

Am ISFH werden Wärmeversorgungssysteme untersucht, die speziell ausgelegte, dachintegrierte Solarkollektoren (siehe Abb.1) und das Erdreich als Wärmequelle für eine Wärmepumpe verwenden und geringe Kosten sowie hohe Effizienz und gutes Lastverhalten versprechen.

Am Fraunhofer ISE wird insbesondere die Wärmespeicherung im Zusammenhang mit Wärmepumpen untersucht.

Zum Schluss wollen wir noch auf einen anderen, weniger bekannten Wärmepumpen-Prozess eingehen: den Absorptionswärmemetransformator (Abb. 6 links), der im thermodynamischen Sinne gegenläufig arbeitende Prozess zur Absorptionskältemaschine. Er ist in der Lage, ohne zusätzlichen Antrieb einen Teil der zur Verfügung stehenden Niedertemperaturwärme Q_2 aufzuwerten, sodass er als Q_3 bei T_3 genutzt werden kann. Diesen Anteil bezeichnen wir als $\zeta' = Q_3/Q_2$ (Abb. 6 rechts)/Gleichung 3)

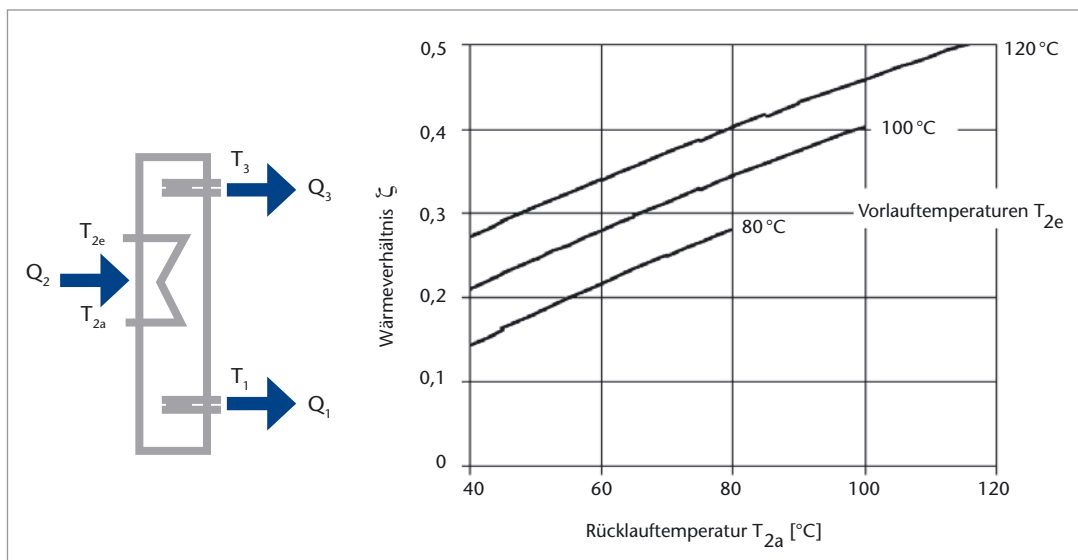
Der thermische Wirkungsgrad zur Aufwertung von Wärme liegt zwischen elektrischem Wirkungsgrad und Kälteverhältnis. Mit Rücklauf-temperaturen von 60 °C kann noch über ein Drittel der in den Prozess hineingesteckten Niedertemperaturwärme in Nutzwärme bei 150 °C verwandelt werden, wenn die Vorlauf-temperatur 120 °C ist. Während von diesen Anlagen in den 80er Jahren etwa ein Dutzend betrieben wurden, sind sie heute wieder in Vergessenheit geraten.

Gleichung 3

$$\zeta' = \frac{T_3}{(T_3 - T_1)} \left[1 - \frac{T_1}{T_{2e} - T_{2a}} \ln \left(\frac{T_{2e}}{T_{2a}} \right) \right] g \approx \frac{T_3}{(T_3 - T_1)} \left[\frac{T_{2e} - T_1}{T_{2e}} - \frac{1}{2} \frac{T_1 \Delta T}{T_{2e}^2} \right] g$$

Abbildung 6

Links: Repräsentation eines Absorptionswärmemetransformators mit gleitender Antriebs-temperatur (Vorlauf T_{2e} , Rücklauf T_{2a}), Kühlwassertemperatur T_1 und Wärme-produktion bei T
 Rechts: Wärmeverhältnis $\zeta' = Q_3/Q_2$ des Transformators nach Gleichung (3); Kühlwassertemperatur 31 °C, Wärmeproduktion bei 150 °C, Grädigkeit 5K, Güte 0,7



Zusammenfassung und Ausblick

Als Niedertemperaturwärmequellen werden thermische Solarenergie, Erdwärme und Industrieabwärme gemeinsam betrachtet. Die Wärme kann als Wärme genutzt, in der Temperatur aufgewertet oder in Kälte oder elektrische Energie umgewandelt werden. Eigenschaften und Randbedingungen sowie Nutzung sind bei den jeweiligen Wärmequellentypen unterschiedlich. Es wurden die thermodynamischen Grenzen und angepasste Kreisläufe zur Bereitstellung der drei Energiedienstleistungen diskutiert. Dabei zeigt sich, dass eine große Vielfalt von Möglichkeiten existiert, aus Niedertemperaturquellen Nutzwärme, Kälte oder elektrische Energie bereitzustellen.

Ein grober Vergleich der Produktion von Nutzwärme, Kälte oder elektrische Energie aus Niedertemperaturquellen in wirtschaftlicher Hinsicht zeigt, dass nicht immer das hochpreisige Produkt Strom am wirtschaftlichsten erzeugt wird. Insbesondere die Kältedienstleistung verdient mehr Aufmerksamkeit. Das Produkt aus Marktwert und erzeugbarer Nutzenergie ist hier am größten. Der Aufwand ist zwar viel größer als bei der direkten Wärmenutzung, aber geringer als bei der Stromerzeugung oder der Wärmetransformation.

In diesem Aufsatz werden die thermodynamischen Grenzen zur Nutzung von Niedertemperatur gezeigt, die technischen Realisierungen aber nur angedeutet. Es ist offensichtlich, dass eine große Vielfalt von bisher nur wenig genutzten Möglichkeiten existiert, aus Niedertemperaturwärmequellen Nutzwärme, Kälte oder elektrische Energie bereitzustellen. Über das hier gezeigte hinaus befinden sich offene Systeme zur Klimatisierung wie auch zur Wärmerückgewinnung in Entwicklung oder werden bereits eingesetzt. Entwicklungsbedarf besteht im Detail, aber das grundlegende Know-how ist vorhanden.

Literatur

- [1] Köhler, S. (2005): Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse. Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke. Dissertation an der TU Berlin.
- [2] Schweigler, C. (1999): Kälte aus Fernwärme. Konzept, Auslegung und Betrieb der Single-Effect/Double-Lift-Absorptionskälteanlage. Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 19, Nr.121, Düsseldorf.

Wärmepumpen und oberflächennahe Geothermie

Einführung

Die aktuellen Zuwachsraten der Wärmepumpenbranche sind beachtlich: mit fast 30 % im Jahr 2004 baute sie den Anteil am deutschen Wärmeversorgungsmarkt stetig aus (Abb. 1). Zurückzuführen ist die Entwicklung auf eine vergleichsweise einfache, ausgereifte Technik, die vermehrte Öffentlichkeitsarbeit der Branche und drastisch ansteigende Kosten für konkurrierende fossile Energieträger. Von den über 16.000 gebauten Anlagen des Jahres 2004 waren gut die Hälfte (ca. 58 %) geothermiebasiert zum Wärmeentzug aus dem Boden oder hydrothermal basiert zum Wärmeentzug aus dem Grundwasser. Insbesondere die Geothermie trägt mit Steigerungsraten von einigen hundert installierten Systemen p.a. Mitte der 90er Jahre auf ca. 10.000 Anlagen im Jahr 2004 überproportional zu dieser Entwicklung bei.

In Abhängigkeit vom baulichen Standard des zu versorgenden Objektes, der lokalen geologi-

schen Situation und der Auslegung der Geothermieanlage beziehen Wärmepumpen zwischen 65 und 80 % ihrer abgegebenen Heizenergie kostenfrei aus der Erde. Der zum eigentlichen Betrieb der Wärmepumpe benötigte Rest kommt – je nach Antriebsart der Wärmepumpe – aus dem Strom- oder Gasnetz. Die weitaus größte Verbreitung besitzen mit Erdwärmesonden gekoppelte Wärmepumpen sowie Anlagen mit hydrothermaler Grundwasserzirkulation. Erdwärmesonden sind Wärmetauscher in denen innerhalb eines geschlossenen Rohrsystems ein Wärmeträgermedium zirkuliert. Je nach Bemessung der Anlage wird hierfür reines Wasser oder – in der Mehrzahl der Fälle – ein mit Frostschutzmittel auf Glykolbasis versetztes Wasser verwendet. Grundwasserzirkulationsanlagen fördern natürlich warmes Wasser aus einem oder mehreren Brunnen und reinfiltrieren das Wasser nach erfolgtem Wärmeentzug wieder über (einen) weitere(n) Brunnen oder – bei Einbohrlochsystemen – im Ringraum des Entnahmebrunnens.

Prof. Dr. Rolf Bracke
FH Bochum –
GeothermieZentrum
Bochum
geothermie@fh-bochum.de

Dr. Andreas Bühring
Fraunhofer ISE
buehring@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Peter Müller
FH Dortmund
pressestelle@
fh-dortmund.de

Michael Wigbels
Fraunhofer UMSICHT
(Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und
Energietechnik)
michael.wigbels@umsicht.
fraunhofer.de

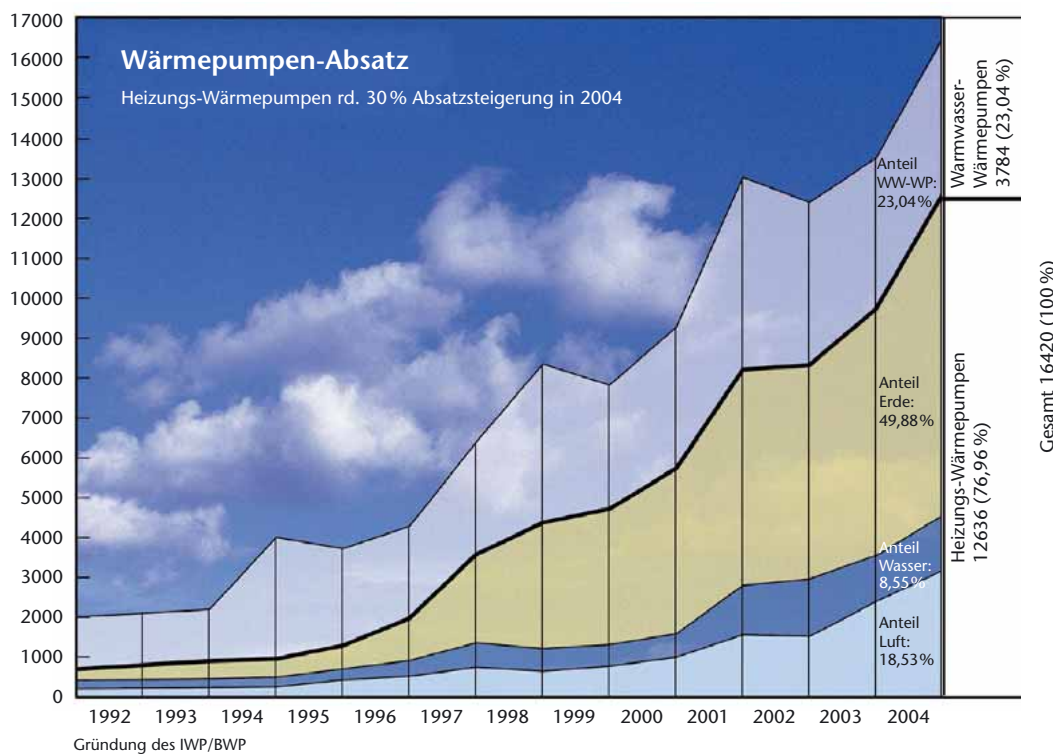


Abbildung 1
Entwicklung des Wärmepumpenmarktes und Darstellung der geothermischen Anteile aus Erde und Wasser

Quelle: Bundesverband WärmePumpe BWP e.V.

Die Nutzungstiefe der oberflächennahen Geothermie reicht per Definition nach VDI 4640 („Thermische Nutzung des Untergrundes“) bis 400 m unter Gelände. Der Übergang in mitteltiefe Anlagen bis z. B. 1000 m ist in der Praxis jedoch fließend.

Mit ihrer günstigen Leistungszahl, d. h. dem Verhältnis von aufgenommener zu abgegebener Energie, besitzen geothermiebasierte Wärmepumpenanlagen – neben der zunehmenden Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Öl- oder Gasheizungen – einen erheblichen Klimaschutzzvorteil. Berücksichtigt man die Tatsache, dass nahezu 80 % des Energieverbrauchs in Deutschland im Bereich Bauen und Wohnen für das Heizen (ca. 78 %) und die Warmwasserbereitung (10,5 %) benötigt wird (Elektrogeräte 6,6 %, Kochen 3,7 %, Beleuchtung 1,4 %), ersparen die über 90.000 in Deutschland installierten Heizungswärmepumpen aufgrund ihres geringeren Primärenergieverbrauchs der Umwelt im Vergleich zu einem modernen Niedertemperatur-Heizölkessel jährlich etwa 170.000 Tonnen Kohlendioxid.

Wärmepumpensysteme, die mit geothermischer Energie arbeiten, besitzen in einigen Ländern ohne fossile Energievorkommen (wie z. B. der Schweiz) eine Marktverbreitung von 36 % im Neubaubereich. Diese Anlagen machen den überwiegenden Teil der Geothermienutzung aus und werden in konventionellen und Niedrigenergiebauten eingesetzt. Darüber hinaus finden sich solche Anlagen vermehrt im Objektbau zur kombinierten Heizung und Kühlung. Insbesondere Versorgungssysteme für Verwaltungsgebäude mit einer großen Kühllast machen sich den Vorteil zunutze, dass Wärmepumpen in den Sommermonaten im Umkehrbetrieb laufen können. Dabei wird die Wärme über aktivierte Bauteile (z. B. Betondecken) oder Flächenheizungen aus dem Gebäude abgezogen und im Erdreich zwischengespeichert.

Weitergehende Entwicklungen im Passivhausbereich (d. h. hochisolierte Häuser mit einem Maximalwärmebedarf von $< 10 \text{ W/m}^2$ und aufwändiger Gebäudetechnik) basieren auf Systemen mit einer Kombination von Wärmepumpe und kontrollierter Wärmerückgewinnung aus der Wohnungslüftung. In diesen Gebäude-

typen haben Lüftungswärmepumpen zu Heizzwecken gegenwärtig noch eine höhere Effektivität als erdgekoppelte Wärmepumpen [1].

Betriebsbeispiele für geothermische Nahwärmenetze mit Wärmepumpenkopplung

Langzeituntersuchungen zum Betriebsverhalten von Geothermieanlagen in Kopplung mit Wärmepumpen zeigen, dass die Technologie seit vielen Jahren gut entwickelt ist. Vorgestellt werden nachstehend die Besonderheiten und Betriebscharakteristika für unterschiedliche Konzepte von geothermischen Nahwärmeversorgungen. Die Nutzungstiefe der untersuchten Anlagen reicht von 45 m bis 500 m.

Variante 1: Mehrbrunnenprinzip

In Wulfen wurden für 71 Wohngebäude mit 117 Wohnungen und 12.240 m² Wohnnutzfläche sowie ein kommunales Gemeinschaftshaus (4036 m² NFI) mit Hallenbad 1975 insgesamt 73 Wärmepumpenanlagen errichtet [2]. Der Gesamtwärmebedarf des Versorgungsgebietes liegt bei 1,1 MW. Zur Wärmeversorgung wird Grundwasser über zwei Förderbrunnen à 91 m und drei Schluckbrunnen à 71 m zirkuliert (Abb. 2). Die Verteilung erfolgt über ein 1.200 m langes, nicht wärmegeprägtes Ringleitungsnetz. In jeder Anlage wird das Grundwasser von 10 °C um 5 °C mengengeregelt gleichmäßig abgekühlt. Die Rückführung zu den Schluckbrunnen erfolgt über eine zweite Ringleitung.

Die Langzeitstudie ergab folgendes Resultat: Nach 20 Betriebsjahren waren von 71 Wärmepumpen noch 68 in Betrieb; drei Wärmepumpen wurden erneuert – die zwei Wärmepumpen in kommunalen Gebäuden wurden aus nicht-technischen Gründen außer Betrieb genommen. Nach 30 Betriebsjahren sind immer noch > 50 % der alten Anlagen in Betrieb. Über den gesamten Betrachtungszeitraum hatten 13 % keine Reparaturen, 7 % hatten mehr als 10 Reparaturen in zehn Jahren und über 70 % hatten 1-5 Reparaturen. Der Großteil der Reparaturen betrafen Regelung (64 %), Kältekreislauf (51 %), Verdichter (9 %), Kondensator und Verdampfer (je 5 %) – jeweils bezogen auf 59 näher be-

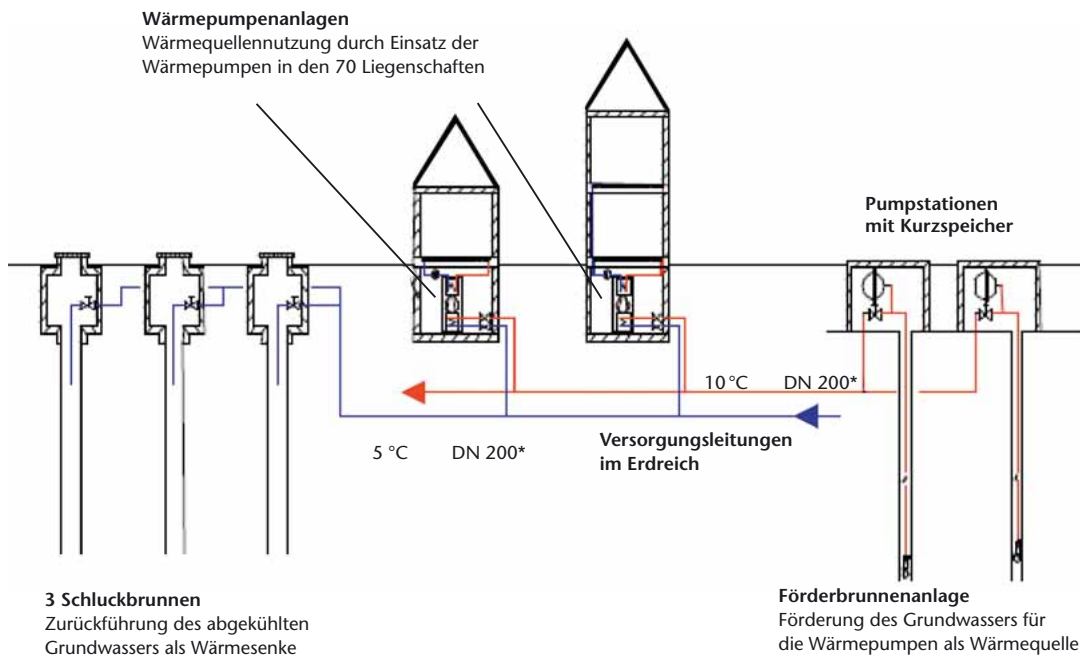


Abbildung 2
Prinzip der Geothermieanlage Wulfen [2],
*DN 200 = Rohrdurchmesser

trachtete Anlagen. Die spezifischen Wartungskosten lagen im Durchschnitt bei 0,08 – 0,15 EUR / m² / a und die spezifischen Reparaturkosten bei 0,25 – 0,48 EUR / m² / a.

Die durchschnittliche Grundwasserförderung betrug zwischen 1979 bis 1996 je qm Wohnfläche bei einer mittleren Gradtagszahl¹ von 3,8 Kd etwa 37 m³/m²/a. Der Gesamtenergieverbrauch, zusammengesetzt aus der Grundwasserförderung und dem Elektrowärmepumpen-Betrieb, liegt witterungsbereinigt aktuell bei 72 kWh/m²/a. Der elektrische Energieverbrauch und die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen (3,2) ergeben im Langjahresmittel einen Wärmeverbrauch von 230 kWh / m²/a.

Von dieser Wärmemenge wurden 69% dem Erdreich entzogen (d. h. Umweltwärmemenge: 1.950 MWh/a). Die Primärenergieeinsparung nach dem „Globalen Emissionsmodell Integrierter Systeme“ (GEMIS) liegt damit im Vergleich zu herkömmlichen Heiztechniken auf Öl- und Gasbasis bei über 35%.

Variante 2: Einbrunnenprinzip

In verschiedenen Ortschaften des schweizerischen Kantons Zug werden größere Einzelobjekte oder Ortsteile seit ca. 20 Jahren geothermisch nach dem sogenannten Einbrunnenprinzip versorgt. Bei diesen gebirgsöffenen, d. h. unverrohrten Geothermieanlagen erfolgt die Wasserentnahme über ein wärmeisoliertes Steigrohr und die Reinfiltration des abgekühlten Wassers im kiesverfüllten Ringraum der gleichen Bohrung. Das Geothermie-Zentrum Bochum führt eine Messkampagne zur Überprüfung des Langzeitverhaltens und Leistungsvermögens von 25 solcher Geothermieanlagen durch. Unterschieden wurde dabei nach Anlagen in

- hydraulisch gut leitenden und
- gering leitenden geologischen Formationen.

Im Fall a) werden die natürlichen Formationswässer in größerem Umfang mit in den Wärmeaustausch einbezogen. Im Fall b) wird zum weitaus überwiegenden Teil Wasser innerhalb des Brunnens beziehungsweise Bohrlochs zirkuliert und es kommt nur zu geringen Vermischungen mit dem umgebenden Grundwasser. Zum Zeitpunkt der Messung waren alle Wärmepumpen aus den Erstinstallationen noch im Betrieb.

¹ Die Gradtagszahl [Kd/a] ist nach VDI 2067 das Produkt aus der Zahl der Heizztage und dem Unterschied zwischen der mittleren Raumtemperatur und der mittleren Außentemperatur. Die Gradtagszahl (Gtz) stellt eine Beziehung zwischen Außentemperatur und Energieverbrauch dar und gibt so Aufschluss über die Heizkosten. Sie zeigt den Unterschied zwischen der durchschnittlichen Außentemperatur eines Tages und der üblichen Raumtemperatur von 20 °C. Gemessen wird nur, wenn es draußen kälter als 15 °C ist.

Für die geringen Temperaturunterschiede der Vorlauf- / Rücklauftemperaturen kann die spezifische Wärmekapazität c_p und die Dichte als ρ konstant angenommen werden. Dadurch ergibt sich für die Quellenleistung bzw. den Wärmestrom in einem definierten Zeitintervall $\Delta \tau$

aus dem Integral (mit $\frac{m}{\tau} = \frac{V}{\tau} \cdot \rho$)

folgende Formel: $\dot{Q} = c_p \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta T$

Die Entzugsleistung der Quelle ist abhängig vom Temperaturunterschied und dem Volumenstrom des zirkulierenden Wassers in der Bohrung. Für die Ermittlung der Quellenleistung der einzelnen Anlagen wurden folgende Parameter erhoben (Tab.1):

Für die beiden Fälle a) und b) wird in (Tab. 2) je ein exemplarisches Objekt vorgestellt.

Unter Zugrundelegung der o. a. Randbedingungen wurden für die betrachteten Anlagen die mittlere Gesamt-Quellenleistung (Q_{mittel}) und die mittlere spezifische Wärmeentzugsleistung (P_{Entz}) pro Meter Geothermieanlage ermittelt. (Tab. 3)

Vergleichsrechnungen mit einem Simulationsprogramm (EWS) haben gezeigt, dass die spezifischen Entzugsleistungen dieser gebirgsoffenen Einbrunnenanlagen damit deutlich über denen konventioneller geschlossener (Koaxial-) Erdwärmesonden liegt. Setzt man für einen anderen untersuchten Fall die Ausbautiefe (280 m),

Tabelle 1

spezifische Wärmekapazität (H₂O):	$c_p = 4,187 \text{ kJ/kgK}$
Dichte (H ₂ O):	$\rho = 0,998 \text{ kg/dm}^3$
Volumenstrom:	$V = \text{gemessen}$
Quellentemperaturdifferenz:	$T = t_{\text{VL}} - t_{\text{RL}} \text{ (gemessen)}$

Tabelle 2

Fall / Ort	Anlage / Objekt	Betrieb	Heizleistung	Bohrung	Wärmepumpen	Geologie
Fall a) Steinen	Wohnsiedlung 20 EFH und 6 MFH Objekt Hausmatt	seit 1988	215 kW	445 m	4	<ul style="list-style-type: none"> • 0-20 m Kies, schluffig • 20-45 m Grobkies (schluffig-sandig) • Grundwasser: 8 m unter Geländekante
Fall b) Rüti	MFH mit 60 WE	seit 1997	270 kW	5500 m	4	<ul style="list-style-type: none"> • 0-20 m Quartär • 20-420 m (P = 5%) Mergel, sandig; • 420-500 m Obere Meeresmolasse; (P = 12%) • Grundwasser: 30 m unter Geländekante

Ortschaft / Objekt	Geothermische Anlage (Tiefe)	t_{VL} [°C]	t_{RL} [°C]	V [m ³ /h]	Q [kW]	Q _{mittel} [kW]	P _{Entz} [W/m]
Steinen / Hausmatt	1 (45 m)	11,5-12,1	7,6-8,5	1,7-1,8	6,9-8,6	7,7	172
	2 (45 m)	9,3-9,9	5,7-6,1	2,4-2,4	9,8-10,6	10,3	228
	3 (45 m)	11,9-12,5	7,5-9,6	1,8-3,2	8,2-10,8	9,8	217
	4 (45 m)	11,5-12,1	7,6-8,5	1,7-1,8	6,9-8,6	7,7	172
Rüti	1 (500 m)	7,6-8,8	4,0-5,6	8,3-8,5	29,7-35,7	33,8	68
	2/3 (500m)	8,1-8,6	4,2-4,9	10,0-10,2	81,4-99,6	88	88
	4 (500 m)	11,8-13,1	6,2-7,4	6,8-7,0	44,3-46,4	45,3	90
	5 (500 m)	9,9-10,6	5,3-6,5	7,2-7,2	34,3-38,5	37,1	74

Tabelle 3
Ermittlung der mittleren Gesamt-Quellenleistung (Q_{mittel}) und der mittleren spezifischen Wärmeentzugsleistung (P_{Entz}) pro Meter Geothermieanlage

Laufzeit (8 Jahre), Volumenstrom (4,3 m³/h) und die Gesamt-Quellenleistung (18 kW) beider Systeme rechnerisch gleich, so sinken die Vorlauftemperaturen des Arbeitsmediums von Erdwärmesonden im direkten Vergleich deutlich ab (ca. 9,6 K). Aufgrund der Energiedifferenz ist dabei die Verdampferleistung in offenen Systemen höher; d. h. es wird ca. 26 % weniger technische Arbeit für die Wärmepumpe erforderlich.

Variante 3: Erdwärmesonden

Das Versorgungsprinzip auf der Basis von Erdwärmesonden besitzt in Deutschland die mit Abstand weiteste Verbreitung. Hier haben sich am Markt Duplex-Sonden mit jeweils zwei Vorlauf- und zwei Rücklaufrohren aus HD-Polyethylen (Durchmesser DN 25 bis DN 40) durchgesetzt. In Kombination mit Niedrigenergiehäusern sind Wärmepumpen-Leistungszahlen > 4 inzwischen Standard. Bereits in mäßig geeigneten geologischen Milieus laufen die Anlagen wirtschaftlich. Am Geothermie-Zentrum Bochum werden Langzeitstudien an verschiedenen Anlagen in NRW durchgeführt. Exemplarisch werden die Betriebskosten für eine

Entwicklung von Verbrauch / Betriebskosten der Wärmepumpe + Geothermieanlage				
2001	2002	2003	2004	Einheit
4720	5906	5619	5831	kwh
23,6	29,5	28,1	29,1	kwh / m ² Jahr
464	535	596	673	Euro netto
2,32	2,67	2,98	3,36	Euro netto; m ² Jahr;
39,-	44,-	49,-	56,-	Euro netto / Monat
0,20	0,22	0,25	0,28	Euro netto / m ² Monat

Geothermieanlage in Aachen vorgestellt zur Versorgung eines Einfamilienhauses mit ca. 200 m² beheizter Nutzfläche. Die Anlage läuft seit 1998 störungsfrei mit folgenden Verbrauchs- und Kostenkenngrößen:

Wärmepumpe 11 KW Heizleistung bei 0/35; drei Erdwärmeduplexsonden à 60 m; Geologie: Feinsand, schluffig; Grundwasser: ca. 30 m unter Geländeoberkante. (Tab 4)

Tabelle 4

Tiefe der geothermischen Erschließung Feld Nordlicht	Kälteleistung Sondenanlage	Vorlauf- / Rücklauf-Sondenanlage **	Heizleistung Wärmepumpe	Leistungs-aufnahme WP	Leistungszahl WP (COP)	Anzahl der anschließbaren Wohneinheiten (WE)
250 m	14 kW (12,8kW)*	7°C / 4,5°C	16 kW	ca. 3,2 kW	5,3	3 - 5 (4)*
400 m	28 kW (29 kW)*	8°C / 5°C	35,5 kW	ca. 6,5 kW	5,9	8 - 11 (10)*
1000 m	70 kW (66 kW)*	23°C / 13°C	78 kW	ca. 12 kW	7,3	18 - 25 (22)*
2300 m	200 kW	33°C / 24°C	WW-WP	ca. 12 kW	> 7,5	46 - 66 (56)*

* Rechenwert; ** Simulation mit den Programmen SHERAT und EWS

*Tabelle 5
Ergebnis geothermischer und gebäudetechnischer Simulationen*

Städtebauliche Großprojekte in NRW

Gegenwärtig befinden sich mehrere städtebauliche Vorhaben in NRW mit geothermischer Nahwärmeversorgung auf Wärmepumpenbasis in der Vorbereitung (Bottrop-Nordlicht 750 WE; Dortmund-Phoenixsee 1500 WE; Hattingen-Südstadt 1200 WE). Exemplarisch wird an dieser Stelle das Bottroper Vorhaben vorgestellt:

Bottrop-Nordlicht

In Bottrop-Kirchhellen soll ab dem Jahr 2006 auf 25 ha ein Neubaugebiet mit ca. 750 Wohneinheiten sowie ein Einkaufszentrum und eine Kulturstätte entstehen. Der Stadtteil wird geothermisch versorgt. Dazu wurden geothermische Entzugsleistungen simuliert für je zwei oberflächennahe Erdwärmesysteme (250 m und 400 m) und je zwei mitteltiefe bis tiefe Geothermieanlagen (1000 m und 2300 m) durchgeführt. Um das Energieversorgungskonzept hinsichtlich der bauzeitlichen Stadtentwicklung möglichst praktikabel zu gestalten, wurde ein „mitwachsendes“ Wärmenetz für Baugruppen von je fünf Wohneinheiten gewählt. Diese können hinsichtlich der Gebäudeenergieversorgung mit unterschiedlichen Heizungs- / Lüftungssystemen sowie mit aktivierten Bauteilen (im Sinne von Heiz- / Kühldecken) ausgestattet werden. Die Baugruppen lassen sich in beliebiger Größe miteinander verknüpfen. Je heterogener die Gebäudetechnik innerhalb der Baugruppen ist, desto besser können

Lastspitzen ausgeglichen werden. Jede geothermische Einzelanlage kann teufenabhängig unterschiedlich viele Wohneinheiten versorgen. Durch die Kombination von Einzelsonden zu ganzen Sondenfeldern lassen sich bedarfsabhängige Kleinwärmenetze unterschiedlicher Größenordnung aufbauen. Die geothermischen und gebäudetechnischen Simulationen ergaben folgende Zusammenhänge: (Tab. 5)

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigen, dass Geothermieanlagen zur Wärmeversorgung im oberflächennahen und mitteltiefen Bereich bereits unter konservativer Zugrundelegung der Energiepreise von 2004 für Gas, Öl und Strom problemlos wettbewerbsfähig zu fossilen Versorgungsträgern sind. 250 m und 400 m Geothermieanlagen sind bereits signifikant wirtschaftlicher. Hier liegen die jährlichen Energiekosten etwa bei 50% von gas- und ölbetriebenen Anlagen (einschließlich Wärme- oder Gasnetze); gleiches gilt für die CO₂-Emissionen. Auch die jährlichen Gesamtkosten liegen einschließlich Kapitaldienst ca. 10-20% unter Öl und Gas. Der Preisvorteil nimmt bohrkostenbedingt mit der Teufe bis in Bereiche von 600 - 800 m weiter zu und ab 1000 m wieder deutlich ab.

Fazit

Wärmepumpengekoppelte Geothermieanlagen sind europaweit verbreitet und bewegen sich auch in Deutschland aus dem Nischendasein heraus. Langzeituntersuchungen belegen, dass die Verfahrenstechnik störungsarm ist. Die Wirtschaftlichkeit ist für oberflächennahe und mitteltiefe Geothermieanlagen bis ca. 1000 m im Vergleich zu Gas und Öl in nahezu allen betrachteten Fällen gegeben. Bis 400 m gilt das auch für Strom. Dabei ist – u. a. durch eine Vereinfachung des bergrechtlichen Genehmigungsverfahrens – bei größeren Bauvorhaben ein Trend hin zu mitteltiefen Anlagen zu beobachten.

Literatur

- [1] Development and measurements of Compact Heating and Ventilation Devices with integrated exhaust air heat pump for High Performance Houses - Contributions IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, 2005; (www.ise.fraunhofer.de).
- [2] 30 Jahre Betriebserfahrung mit 73 Wärmepumpen und der „Kalten“ Nahwärmeversorgung Wulfen.- Bericht des Europäischen Testzentrum für Wohnungslüftungsgeräte (TZWL), Dortmund (2005)
- [3] Bracke, R.; Höfker, G; Bußmann, G.; Winkler, K.; Sysk, U.; Exner, S.; Zwingel, T.; Clauser, C; Pechnig, R. (2004): Machbarkeitsstudie zur Erschließung des geothermischen Feldes „Nordlicht“ - Jahrestagung der Geothermischen Vereinigung; Landau.