

Untergroundspeicher ohne Defizitgarantie

Energienetze für Areale puffern Wärmeüberschüsse häufig mit einem Erdwärmespeicher ab. Ein reibungsloser Betrieb dieser Systeme ist oft nur mit einem sorgfältigen Monitoring zu erreichen.

Text: Urs-Peter Menti, Matthias Sulzer

Anergienetze verknüpfen Energiequellen, zum Beispiel ein Bürohaus als Abwärmelieferant, und Energiesenken, zum Beispiel ein Wohnhaus als Wärmebezüger, weshalb sie zur Heizung und Kühlung von Gebäuden eingesetzt werden können (vgl. Glossar S. 31). Nach Bedarf dient ein Erdwärmespeicher dazu, die Energiebilanz im thermischen Versorgungsnetz zeitlich auszugleichen.¹ Damit jedoch der Untergroundspeicher mittelfristig selbst weder unterkühlt noch zu sehr erwärmt wird, muss die Bilanz aus Wärmezufuhr und Wärmeentzug im Jahresverlauf ebenfalls ausgeglichen sein. Wird zu wenig Wärme gespeichert, ist der Heizbedarf nicht immer gedeckt. Bei zu viel gespeicherter Wärme ist der Freecooling-Kühlbetrieb im Spätsommer nicht garantiert.

Das Szenario mit unausgeglichener Speicherbilanz konnte bei der Wärmeversorgung im Areal Suurstoffi, Rotkreuz (vgl. TEC21 48/2011) beobachtet werden;

das in Etappen realisierte Anergienetz wird von der Hochschule Luzern wissenschaftlich begleitet und überwacht. Im ersten Ausbauschnitt waren insbesondere die Nutzflächen, die Abwärme zur Weiterverwendung im Areal liefern sollen, noch nicht vollumfänglich erstellt. Zudem konnten von den insgesamt geplanten 9500 m² Solardachflächen zunächst nur 3500 m² auf jenen Gebäuden installiert werden, die in der ersten Bauetappe errichtet wurden. Die damit erzeugte und ins Wärmenetz gelieferte Energiemenge reichte nicht aus, um den Wärmebezug übers Jahr zu kompensieren: Der Energiehaushalt geriet in Schieflage. Der Erdwärmespeicher kühlte ab, und die Temperaturen im Arealnetz fielen in der Folge unter 8 °C (Abb. S. 33). Um dennoch eine sichere Versorgung mit Heizenergie zu garantieren, wurde die fehlende Energie mit einer zusätzlichen Holzheizungsanlage kompensiert.

Flexibles Vernetzungskonzept

Zwar hat die etappierte Arealentwicklung zur temporären Unterdeckung geführt, grundsätzlich aber hat sich das Versorgungskonzept bewährt: Das Anergienetz selbst musste nicht verändert werden, weil sich eine solche Vernetzungsvariante jeweils flexibel mit Verbrauchern und Quellen erweitern lässt. Im Vollausbau soll auf die Notheizung wieder verzichtet werden können, weil dann genügend Abwärme vorhanden sein wird. Dies bestätigen aktualisierte Simulationen und Resultate des bisherigen Energiemonitorings.

Im Vollausbau wird das Suurstoffi-Anergienetz eine rund 165000 m² grosse Energiebezugsfläche versorgen und nach Bedarf Kälte und Wärme zwischen den Gebäuden mit unterschiedlicher Nutzung wie Wohnen, Schule, Gewerbe und Dienstleistung austauschen. Die Wärme aus Raumkühlung und Prozesskühlung gelangt als überschüssige Energie ins Netz und wird bei Bedarf in den Erdwärmespeicher abgeführt. Ebenfalls zugeführt wird Quellenergie aus der hybriden Solaranlage, die als Wärme und Elektrizität zur Verfügung steht. Der Erdwärmespeicher erlaubt insofern eine zeitlich verschobene Wärmerückgewinnung zwischen den

Der Wärme-Strom-Knoten

Smart Grid ist das Stromnetz der Zukunft, um die Versorgung auf eine dezentrale und erneuerbare Stromproduktion auszurichten. Der nächste Schritt sind dezentrale Energiesysteme, die verschiedene Energieformen miteinander verbinden (Multi-Energy Grid) und der Bereitstellung, Umwandlung, Speicherung und Verteilung der unterschiedlichen Energieströme dienen. Das Multi-Energy Grid ist ein technologieoffenes Infrastrukturkonzept für Quartiere und Areale. Wie sich thermische, elektrische und mit Gas gespeiste Netze miteinander verknüpfen lassen, wird im Rahmen der koordinierten Energieforschung des Bundes untersucht. Am Swiss Competence Center for Energy Research, Future Energy Efficient Buildings & Districts baut die Hochschule Luzern ein Labor für die Knotenforschung «NODES» mit massstäblichem, einmaschigem Multi-Energy Grid auf: Experimentell und mithilfe von Simulationsmodellen sollen Erkenntnisse über Aufbau, Technologie und Wirtschaftlichkeit erweiterter thermischer Versorgungsnetze gewonnen werden.

www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/energiewende/lucerne

unterschiedlich genutzten Gebäuden; das Anergienetz erhöht die Energieeffizienz im Gesamtsystem.

Das Anergienetz-Beispiel Suurstoffi zeigt, wie robust und flexibel die thermische Arealvernetzung aufzubauen ist. Die Auslegung auf einen bestimmten Planungsstand genügt nicht (vgl. «Nutzungsgrenzen im Untergrund», S. 28), denn die Energiebilanz kann in solchen Arealen aufgrund von Nutzungsänderungen oder des Einsatzes technisch verbesserter Komponenten stetig ändern. Hybride Solaranlagen und Luftkühler bieten zusätzliche Flexibilität: Sie können die Wärmelieferung ins System erhöhen, ohne dabei die Stromproduktion der hybriden Solarmodule zu unterbinden, oder Wärme aus dem System entziehen, wenn das Stromnetz unterlastet ist. Ebenso erlauben Wärmepumpen, allfällige Stromüberschüsse in thermische Energie umzuwandeln und den Wärmespeichern wie Warmwasserboilern bzw. der thermisch aktiven Baustruktur zur Verfügung zu stellen.

Gezielte Speicherbewirtschaftung

Der Erdwärmespeicher ist auch bei einem weiteren Pilotprojekt unverzichtbarer Teil der Arealvernetzung: Das Anergienetz auf dem Campus Höggerberg der ETH Zürich, das seit sechs Jahren kontinuierlich erweitert wird, besitzt drei Speicherfelder im Untergrund (vgl. Glossar S. 31). Der Aufbau dieses thermischen Netzes ist so gewählt, dass es adaptier- und erweiterungsfähig ist: Verbraucher und Erzeuger sind durch eine Ringleitung miteinander verbunden. Aktuell sind drei dezentrale Unterstationen und drei Erdwärmespeicher zum Ausgleich der Energieströme an dieser Versorgungsmaße angeschossen.² Von jedem Anschlusspunkt kann die Energie in zwei Richtungen fließen; zwei parallel geführte, voneinander unabhängige und bidirektionale Leitungsringe erlauben, den Wärmeträger Wasser mit jeweils unterschiedlicher Temperatur durch das Versorgungsnetz zu führen.

Die Erkenntnisse aus dem Pilotbetrieb sind vielversprechend: Die Wärmerückgewinnung zwischen den unterschiedlich genutzten Forschungsgebäuden erreicht eine hohe Effizienz, weil sich die unterschiedlich war-

men Energieströme im jeweiligen Leitungsring nicht miteinander vermischen. Zudem können die drei Erdwärmespeicher flexibel bewirtschaftet werden: Unabhängig von ihrer Position lassen sie sich dank der zerteilten Netzmasche laden oder entladen und können unterschiedliche Speichertemperaturniveaus aufweisen.

Der Massenstrom in der Ringleitung selbst wird einzig durch die dezentralen, bei den einzelnen Verbrauchern und/oder Lieferanten installierten Förderpumpen angetrieben. Die Fließrichtung stellt sich aufgrund des schwankenden, dezentralen Bedarfs ein; das Netz wird als «ungerichtet», ohne vorgegebene Fließrichtung, bezeichnet. Der hydraulische Betrieb solcher Netze wird daher komplexer. Aufgabe der Forschung ist es, diese Mechanismen und weitere Fragen zur Hydraulik und Fließrichtung der Energieströme in einem thermisch vernetzten Ring sowie in einem Versorgungsnetz mit einer oder mehreren Maschen zu untersuchen. Ziel dabei ist nicht nur die Weiterentwicklung robuster und flexibel funktionierender Wärmenetze, sondern auch das Finden von Synergien zwischen thermischen und elektrischen Netzvarianten (vgl. «Der Wärme-Strom-Knoten», S. 32). Vermaschte Wärmenetze bieten dafür eine einfache Anknüpfungsvariante und integrieren heute schon Technologien zur flexiblen und hybriden Energieerzeugung von Wärme respektive Strom. Unter anderem bietet sich dadurch die Option, überschüssigen Strom in Wärme umzuwandeln und so das elektrische Netz zu entlasten. •

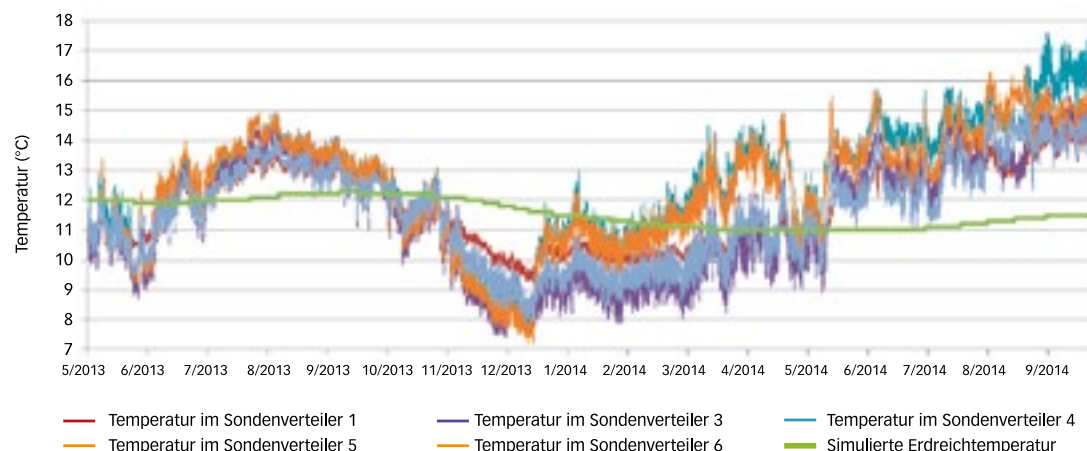
Urs-Peter Menti, Dipl. Ing. ETH, SIA, Leiter Zentrum für Integrale Gebäudetechnik an der Hochschule Luzern HSLU; urs-peter.menti@hslu.ch

Matthias Sulzer, Dipl. Ing. FH/SIA, MBA, Dozent Energie- und Gebäudetechnik an der Hochschule Luzern HSLU; matthias.sulzer@hslu.ch

Anmerkungen

¹ M. Sulzer, D. Hangartner, Kalte Fernwärme (Anergienetze), Grundlagen-/Thesenpapier, Hochschule Luzern – Technik & Architektur 2014.

² M. Sulzer, T. Gautschi, ETH Zürich, Höggerberg Masterplan Energie, Schweizerisches Status-Seminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen 2008.



Werte aus dem Monitoring (2013/2014) und den **Simulationen zum Anergienetz Suurstoffi**: Die Temperaturen im Erdwärmespeicher (grüne Kurve) haben sich aufgrund des zu geringen Wärmeintrags in das Anergienetz um 1 °C gesenkt (zwischen 5/2013 und 5/2014).

— Temperatur im Sondenverteiler 1 — Temperatur im Sondenverteiler 3 — Temperatur im Sondenverteiler 4
 — Temperatur im Sondenverteiler 5 — Temperatur im Sondenverteiler 6 — Simulierte Erdreichtemperatur

SCHNITTSTELLE ZUM GEBÄUDE

Damit die Linke weiss, was die Rechte tut

Die getrennte Betrachtung des Gesamtsystems aus Gebäude, Geologie und Grundwasser vernachlässigt deren Wechselwirkungen. Ein interdisziplinäres Team der Gruner-Gruppe widmete sich dieser Problematik und entwickelte ein Plugin, um die einzelnen Simulationen zu koppeln.

Text: Dirk Arndt, Philip Klingler, Manuel Frey, Karl-Heinz Schädle

Bei der Auslegung von Erdwärmesonden ist es gängige Praxis, zunächst den Energiebedarf des Gebäudes so gut wie möglich zu prognostizieren (vgl. «Nutzungsgrenzen im Untergrund», S. 28). Dabei sind Faktoren wie Ausbaustandard, Dämmung, Standort, Anlagentechnik und geplanter Nutzungstyp zu berücksichtigen. Eine verlässliche Methode zur Prognose ist die Gebäudesimulation. Darauf folgend werden entweder über die Rechenansätze der SIA-Norm oder über numerische Berechnungstools die Funktion des untertägigen Erdwärmespeichers überprüft und die Umweltauswirkung quantifiziert.

Die Herausforderung bei der Planung von Anlagen für grosse Gebäude ist es, die Anzahl der Erdsonden so weit wie möglich zu reduzieren, ohne dabei die Gebrauchstauglichkeit des Gebäudes zu gefährden. Hierbei vernachlässigen viele Berechnungstools die wichtige, von den lokalen geologischen Bedingungen abhängige Grundwasserströmung. Zudem gehen durch die getrennte Betrachtung des Gesamtsystems Rückkopplungen von Gebäude, Anlagentechnik, Geologie und Grundwasser verloren und bleiben unberücksichtigt.

Als Generalplaner sind verschiedene Abteilungen in der Gruner-Gruppe mit derartigen Fragestellungen konfrontiert, insbesondere bei komplexen Systemen, z. B. mit Einbindung von Kühltürmen, Grundwasser und anderen Wärmequellen, oder bei Systemoptimierungen mit mehreren Erdwärmesondenfeldern. Um diese Fragen in Zukunft sicher beurteilen zu können, entwickelte ein interdisziplinäres Team im Rahmen eines eigenen Forschungsprojekts eine Software zur Kopplung von Gebäude-, Anlagen-, Erdwärmespeicher- und Grundwasserströmungssimulationen.

Das aus diesem (noch laufenden) Forschungsprojekt hervorgegangene Plugin «FeEP» baut auf dem Softwarepaket für Grundwasserströmungsmodelle «Feflow» (DHI-Wasy) auf. Gekoppelt wird «Feflow» mit der Gebäudesimulationssoftware «EnergyPlus»

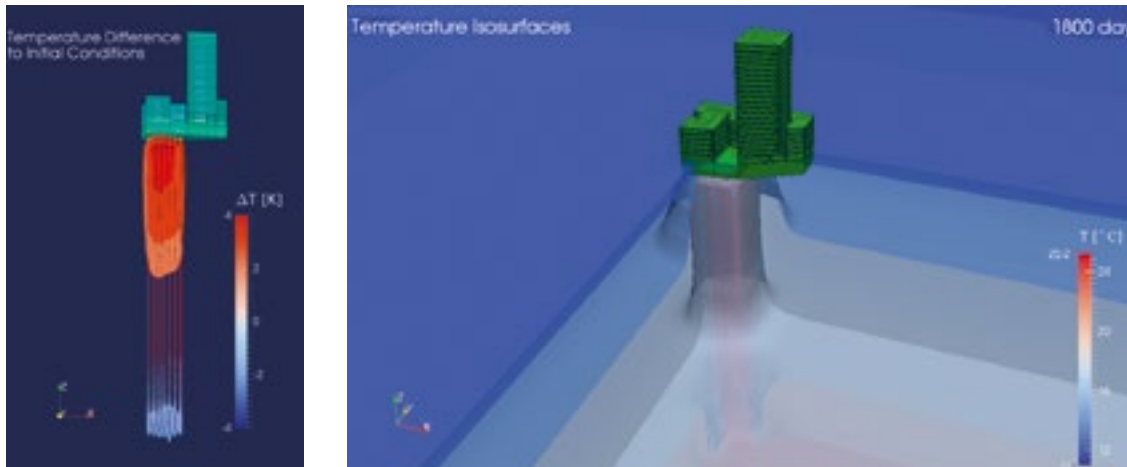
(US-Energieministerium). Beide Programme sind jeweils auf ihrem Gebiet weit verbreitet und international anerkannt.

Aufgrund des konvektiven Wärmetransports ist Grundwasser ein entscheidender Faktor bei der Betrachtung der Effizienz und der Umweltauswirkung von geothermischen Systemen zum Heizen und Kühlen. So transportiert fliessendes Grundwasser gespeicherte Energie aus dem Erdwärmespeicher heraus bzw. führt Wasser mit «ungestörten» Bodentemperaturen nach. Abhängig von der Gebäudeauslegung ist dies positiv oder negativ. Bei der gekoppelten Modellierung findet während der Berechnungen ein ständiger Austausch von Ergebnissen zu Volumenstrom und Temperatur in den Erdsonden zwischen den Modellen statt, also zwischen Gebäude, Anlagen und Erdwärmespeicher.

Mit der Sommersonne im Winter heizen

Im Rahmen einer ausführlichen Simulationsstudie untersuchte das Plugin-Entwicklerteam verschiedene Szenarien für ein Erdwärmesondenfeld eines aktuellen Bauprojekts. Dabei wurde der derzeit in Bauausführung befindliche Grosspeter-Tower in Basel betrachtet, dessen Bruttogeschossfläche von 22000 m² geothermisch geheizt und gekühlt werden wird. Durch diese Betriebsvariante setzen die Errichter den Untergrund im Bereich der Sonden als Energiespeicher ein. So steht die im Sommer in das Feld gepumpte Wärme im Winter zum Heizen zur Verfügung und umgekehrt.

Ziel der Untersuchungen war es, ein möglichst optimales Felddesign zu ermitteln und die Funktionalität des Gesamtsystems sicherzustellen. Dafür betrachtete das Team zum einen unterschiedlich gross dimensionierte Erdsondenfelder, zum anderen untersuchte es verschiedene Betriebsvarianten des Gebäudes. Neben den gekoppelten Fünf-Jahres-Simulationen wurden auch ungekoppelte Langzeitvarianten (20 Jahre) berechnet, um das langfristige Verhalten des Wärmespeichers zu kontrollieren. Da das Gebäude bereits früh



Links: Durch den Vergleich der aktuellen Temperaturen mit den Ausgangsbedingungen im Wärmespeicher kann der Speichernutzungsgrad visualisiert werden (hier nach 1800 Tagen Betriebszeit).

Rechts: Im Blick auf den Erdwärmespeicher und das Gebäude zeigen Isothermenflächen den Temperatureinfluss des Wärmespeichers auf die Umgebung.

hinsichtlich eines ausgeglichenen Heiz- und Kühlbedarfs optimiert wurde, zeigten sich hier keine langfristigen Veränderungen der Durchschnittstemperatur im Sondenfeld. Auch die Tiefe der Erdsonden konnte vorgängig durch (ungekoppelte) Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Sondenlängen auf 250 m optimiert werden.

Um den Strombedarf des Gebäudes so weit wie möglich zu reduzieren, sollte die Anlage möglichst lange im Freecooling-Modus betrieben, also direkt mit dem Erdsondenfeld gekühlt werden können. Das reduziert die stromintensiven Stunden der Kältemaschine. Der Zeitraum, in dem Freecooling möglich ist, wächst mit zunehmender Sondenanzahl. Daher ermittelte das Planungsteam in der gekoppelten Simulation durch eine systematische Reduktion der Erdsonden, wie sich die Sondenanzahl auf die Gebäudeanlagen und den Strombedarf des Gebäudes auswirkt und wo die Gebrauchstauglichkeitsgrenze des Systems liegt. Bei unter 30 Sonden belegte die Simulation zu geringen Temperaturen im Erdsondenkreislauf und eine zunehmende Temperaturspreizung im Rücklauf des Erdwärmespeichers. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass theoretisch bereits ab etwa 30 Sonden ein Betrieb möglich wäre. Mit jeder zusätzlichen Sonde sank der jährliche Strombedarf der Kältemaschine weiter, allerdings stiegen dabei die Investitionskosten. Letztlich wählten die Planer ein Sondenfeld mit mehr als 50 Sonden. Auf zusätzliche Rückkühlungen, z. B. mit Kühltürmen, konnte so komplett verzichtet werden. Auch Backup-Systeme liessen sich aufgrund der Simulationen gänzlich einsparen.

Näher am realen Betriebsverhalten

Vor allem in den Herbstmonaten zeigt sich bei Einsatz der Kopplung ein anderes Betriebsverhalten als bei ungekoppelter Betrachtung. Daraus resultiert ein insgesamt erhöhtes Temperaturniveau im Erdwärmespeicher. Dies ist deutlich in den verschiedenen Vor- und Rück-

lauftemperaturen des Sondenfelds ersichtlich (vgl. Film auf www.espazium.ch). Als Folge ergeben sich wiederum höhere Speichertemperaturen im Gebäude, was einen leicht erhöhten Strombedarf der Kältemaschine bedingt. Gekoppelte Simulationen eignen sich daher besonders für Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Erdsondenfelds und für die Planung verschiedener Betriebsszenarien, die Einfluss auf die vorgesehenen Regelalgorithmen nehmen.

Der Mehrwert der gekoppelten Simulation liegt zum einen im zusätzlichen Informationsgewinn beiderseits der Schnittstelle. Zum anderen kann das optimale Design des Sondenfelds (Sondenabstand, -länge) in Abhängigkeit von einem speziellen Anlagensystem und vom Untergrund verlässlich ermittelt werden. Der Nutzungsgrad saisonaler Wärme- und Kältespeicher lässt sich unter Berücksichtigung von Grundwasserströmen und deren Umweltauswirkungen quantifizieren. Das Anlagenmodell berücksichtigt dabei, wie sich Erdwärmesondenfelder (saisonal und langfristig) gegenseitig beeinflussen. Das bessere Verständnis des Gesamtsystems aus Gebäude, Geologie und Grundwasser hilft somit, mit den gegebenen Energiere Ressourcen möglichst effizient und sparsam umzugehen. •

Dirk Arndt, Dr. rer. nat. Angewandte Geowissenschaften, Senior-Projektleiter Geologie, Gruner Böhlinger AG, dirk.arndt@gruner.ch

Philip Klingler, MSc. Hydrogeologie und Geothermie, Projektleiter Energieanlagen, Gruner Gruneko AG, philip.klingler@gruner.ch

Manuel Frey, B. Eng. Gebäudeklimatik, Projektleiter Bauklimatik, Gruner Roschi AG, manuel.frey@gruner.ch

Karl-Heinz Schädle, Dipl.-Ing. (FH), Abteilungsleiter Energieanlagen, Gruner Gruneko AG, karl-heinz.schaedle@gruner.ch



Videos der Simulationen mit weiterführenden Erklärungen stehen zur Verfügung unter www.espazium.ch