

Forschungsarbeit

Saisonale Wärmespeicher – Bauarten, Betriebsweise und Anwendungen

Roman Marx*, Janet Nußbicker-Lux, Dan Bauer, Wolfgang Heidemann und Harald Drück

DOI: 10.1002/cite.201100064

Die saisonale Speicherung von Solarwärme oder Abwärme aus Kraft-Wärmekopplungsanlagen kann maßgeblich dazu beitragen, in zukünftigen Energiewandlungssystemen fossile Brennstoffe zu einem großen Anteil zu ersetzen. Solar unterstützte Nahwärmeversorgungsanlagen in Kombination mit Langzeit-Wärmespeichern ermöglichen solare Deckungsanteile am Gesamtwärmebedarf von 50 % und mehr. Durch den Bau und Betrieb mehrerer Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit saisonaler Wärmespeicherung in Deutschland seit 1996 konnten die hohen erzielbaren solaren Deckungsanteile bestätigt werden. Vier unterschiedliche Bauarten für Langzeit-Wärmespeicher wurden entwickelt, unter realen Betriebsbedingungen getestet und langzeitüberwacht: Heißwasser-, Kies/Wasser-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher.

Schlagwörter: Langzeit-Wärmespeicher, Saisonale Wärmespeicher, Wärmespeicher

Eingegangen: 10. Mai 2011; *revidiert:* 21. Juni 2011; *akzeptiert:* 18. Juli 2011

Seasonal Thermal Energy Stores – Design, Operation and Applications

The seasonal storage of solar heat or waste heat from combined heat and power generation can significantly help to replace large amounts of fossil fuel in future energy systems. Central solar heating plants in combination with seasonal thermal energy storage can reach solar fraction of 50 % or more of total heat demand. The construction and operation of several pilot projects for central solar heating plants with seasonal thermal energy storage confirmed that a high solar fraction is possible in Germany. Four different types of seasonal thermal energy storage have been developed, tested and long-term monitored under real operating conditions: hot water-, gravel/water-, borehole- and aquifer thermal energy storage.

Keywords: Long-term heat stores, Seasonal thermal energy stores, Thermal energy stores

1 Einleitung

Zu einem ressourcenschonenden Umgang mit Energie gehört die rationelle Energienutzung. Ein wesentlicher Bestandteil dabei ist die Energiespeicherung. Im Jahr 2007 wurden etwa 89 % der Endenergie in deutschen Haushalten für Raumheizung und Trinkwarmwasser eingesetzt [1]. Insbesondere der Bereich Raumheizung birgt viel Potenzial, um Primärenergie einzusparen und somit CO₂-

Emissionen zu reduzieren. Die Nutzung der Solarenergie zur Bereitung von Trinkwarmwasser und zur Raumheizung ist eine Technologie, die bereits auf dem Markt etabliert ist. Allerdings gibt es geographische Breiten, bei denen ein Ungleichgewicht zwischen hohem Strahlungsangebot im Sommer und großem Wärmebedarf im Winter besteht. Um das Ungleichgewicht auszugleichen, wurden solar unterstützte Nahwärmeversorgungsanlagen (SUN) mit Langzeit-Wärmespeichern (saisonale Wärmespeicher) entwickelt und umgesetzt, die es ermöglichen, den sommerlichen Wärmeüberschuss im Winter nutzbar zu machen (s. Abb. 1).

Im Rahmen der Förderprogramme *Solarthermie2000* und *Solarthermie200plus* wurden seit 1996 elf Pilotanlagen in Deutschland realisiert. Alle Pilotanlagen wurden während des Baus und Betriebs wissenschaftlich und messtechnisch begleitet. Derzeit werden fünf Pilotanlagen vom ITW der Universität Stuttgart betreut, darunter zwei der neuesten

Roman Marx (marx@itw.uni-stuttgart.de), Dr. Janet Nußbicker-Lux, Dan Bauer, Dr. Wolfgang Heidemann, Dr. Harald Drück, Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart, Germany.

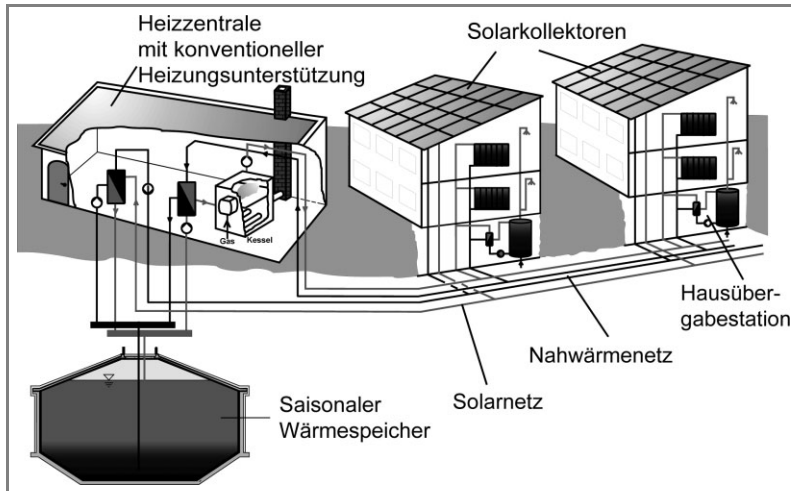


Abbildung 1. Schema einer SUN-Anlage mit saisonalem Wärmespeicher.

Anlagen in Crailsheim und Eggenstein. Jede der vier verschiedenen Bauarten von Langzeit-Wärmespeichern wurde mindestens in einer Pilotanlage umgesetzt. Die Pilotanlagen zeigen, dass SUN-Anlagen technisch realisierbar sind und dass die angestrebten Ziele, z. B. ein solarer Deckungsanteil von 50 %, erreicht werden können.

2 Bauarten saisonale Wärmespeicher

Seit 1996 wurden in Deutschland vier unterschiedliche Bauarten saisonaler Wärmespeicher entwickelt: Heißwasser-, Kies/Wasser-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher (s. Abb. 2). Die Auswahl für eine spezielle Bauart hängt u. a. von der Geologie und Hydrogeologie des Untergrunds sowie von baurechtlichen Bestimmungen ab. Insbesondere für Aquifer- und Erdsonden-Wärmespeicher müssen detaillierte Untersuchungen des Untergrunds durchgeführt werden. Sind unterschiedliche Bauarten realisierbar, erfolgt die Auswahl unter Berücksichtigung energetischer und wirtschaftlicher Randbedingungen.

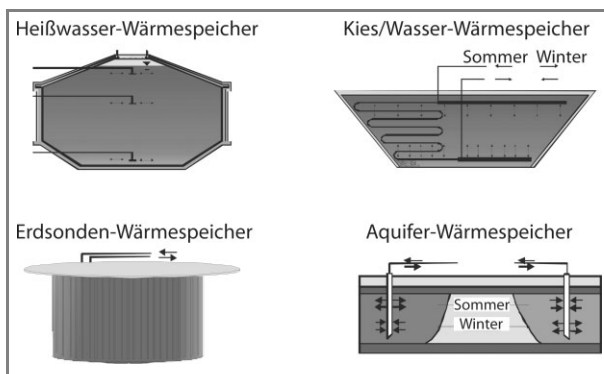


Abbildung 2. Unterschiedliche Bauarten saisonaler Wärmespeicher.

Saisonale Wärmespeicher werden meist, müssen aber nicht, unterirdisch gebaut. Aufgrund der häufigen Nähe zu Wohnsiedlungen sind oft optische Gründe ausschlaggebend. Bei Aquifer- und Erdsonden-Wärmespeichern erfolgt die Wärmespeicherung direkt im Untergrund; die Wärme wird über Brunnen bzw. Erdwärmesonden in das Erdreich eingebracht bzw. aus dem Erdreich entnommen.

Um die Wärme über einen längeren Zeitraum effizient speichern zu können, müssen die Wärmeverluste möglichst gering sein. Dies wird zum einen durch eine gute Wärmedämmung und zum anderen durch ein möglichst geringes Oberflächen/Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis) erreicht. Das bedeutet auch, dass die saisonalen Wärmespeicher möglichst großvolumig gebaut werden

müssen und daher meist in Nahwärmenetze eingebunden sind.

Eine Bewertungsgröße für die Wärmeverluste ist der Speichernutzungsgrad. Er stellt den Quotienten aus eingespeicherter zu ausgespeicherter Wärmemenge über einen Zyklus dar. Je höher dieser Wert ist, desto besser funktioniert die Wärmedämmung und desto effizienter ist der Wärmespeicher. Optimal in ein Nahwärmeversorgungssystem integrierte saisonale Wärmespeicher können Speichernutzungsgrade von über 90 % erreichen [2].

2.1 Heißwasser-Wärmespeicher

Heißwasser-Wärmespeicher werden als Behälterspeicher ausgeführt, wobei der Behälter oft aus Ort beton oder Betonfertigteilen aber auch aus Stahl oder GFK gefertigt wird. Im Inneren wird eine wasserdampfdichte Schicht angebracht, die meistens aus verschweißten Edelstahlbahnen besteht. Als Speichermedium dient Wasser. Um die Wärmeverluste zu minimieren, werden sowohl die Seitenwände als auch der Boden- und der Deckelbereich des Wärmespeichers gedämmt, wobei das Dämmmaterial entsprechend der statischen und thermischen Belastung auszuwählen ist. Behälterspeicher zeichnen sich durch eine hohe volumenspezifische Wärmekapazität und eine gute thermische Schichtung aus. Die Be- und Entladeleistungen sind sehr hoch, weshalb bei dieser Bauart meist auf Pufferspeicher verzichtet werden kann. Da das Speichermedium Wasser ist, können Wartungsarbeiten in beschränktem Umfang durchgeführt werden. Die Nachteile dieser Bauart sind die hohen Baukosten und die limitierte Größe aufgrund der statischen Anforderungen. Heißwasser-Wärmespeicher mit Größen zwischen 2750 m³ und 12 000 m³ wurden in Hamburg, Friedrichshafen, Hannover und München realisiert.

2.2 Kies/Wasser-Wärmespeicher

Bei Kies/Wasser-Wärmespeichern dient ein Gemisch aus Kies bzw. Sand und Wasser als Speichermedium, das in ein Erdbecken bzw. eine Grube eingebracht wird. Die Form der Grube wird durch den natürlichen oder einen künstlich erzeugten Böschungswinkel bestimmt. Die Grube wird durch Kunststoffbahnen wasser- und wasserdampfdicht ausgekleidet und mit Kies, Sand oder Erde bzw. einer Kombination aus diesen Materialien sowie Wasser gefüllt. Die Wärmedämmung wird bei der neuesten Generation dieser Wärmespeicher auf der kompletten Oberfläche (auch dem Boden) angebracht. Die Be- und Entladung des Wärmespeichers erfolgt direkt, z. B. mit Brunnenpaaren bzw. perforierten Rohren, oder indirekt, z. B. mit Rohrschlangen im Speicherinneren, die als Wärmeübertrager dienen. Der Speicher zeichnet sich durch mittlere Baukosten aus. Sein Aufbau ist durch die Kiesfüllung selbsttragend und somit ist seine Baugröße nahezu unbegrenzt. Allerdings ergeben sich durch die Kiesfüllung auch Nachteile. Seine volumenspezifische Wärmekapazität ist kleiner als bei reinem Wasser, weshalb er bei gleicher erforderlicher Wärmekapazität größer gebaut werden muss als ein Heißwasser-Wärmespeicher. Bei einer Leckage der Dichtungsbahnen kann der Wärmespeicher nicht bzw. nur unter großem Aufwand repariert werden. Da der Böschungswinkel und die Eingrabetiefe durch die Standfestigkeit des Bodens eingeschränkt werden, weisen diese Wärmespeicher meist eine flachere Bauform und eine größere Oberfläche als Heißwasser-Wärmespeicher auf. Die Be- und Entladeleistungen des Wärmespeichers sind vergleichsweise gering, so dass Pufferspeicher in das System integriert werden müssen. Kies/Wasser-Wärmespeicher mit Größen zwischen 1500 m³ und 8000 m³ wurden in Steinfurt, Chemnitz [3,4] und Eggenstein gebaut.

2.3 Erdsonden-Wärmespeicher

Bei Erdsonden-Wärmespeichern erfolgt die Wärmespeicherung im Erdreich, wobei die Wärme mit Erdwärmesonden in den bzw. aus dem Untergrund ein- bzw. ausgespeichert wird. Der Speicherbereich wird von einer großen Anzahl Erdwärmesonden erschlossen, die seriell und parallel verschaltet werden. Die Anordnung und Durchströmung der Erdwärmesonden erfolgt zur Minimierung der Wärmeverluste so, dass sich der warme Bereich im Speicherzentrum befindet. Die Erdwärmesonden bestehen aus Kunststoffen (z. B. Polybuten oder PE-X), die in ein Bohrloch eingebracht und durch ein Füllmaterial in thermischen Kontakt mit dem Untergrund gebracht werden. Konstruktionsbedingt kann bei diesem Speichertyp nur die Oberseite des Wärmespeichers gedämmt werden. Die Baukosten für Erdsonden-Wärmespeicher sind verhältnismäßig niedrig und er kann als einziger saisonaler Wärmespeicher erweitert und somit an ein wachsendes System angepasst werden. Seine volu-

menspezifische Wärmekapazität ist jedoch niedrig und er kann aufgrund geologischer und hydrogeologischer Einschränkungen nicht überall gebaut werden. Da die Be- und Entladeleistungen niedrig sind, müssen Pufferspeicher in das System integriert werden. Erdsonden-Wärmespeicher zwischen 9350 m³ und 63 360 m³ wurden in Neckarsulm, Attenkirchen und Crailsheim gebaut.

2.4 Aquifer-Wärmespeicher

Beim Aquifer-Wärmespeicher werden grundwasserführende Schichten (Aquifere) genutzt, um Wärme im Untergrund zu speichern. Der Aquifer wird mit mindestens einem Brunnenpaar erschlossen. Nur abgeschlossene Aquifere mit großer Mächtigkeit können für Aquifer-Wärmespeicher verwendet werden. Bei der Beladung des Wärmespeichers wird über einen Brunnen Wasser aus dem Aquifer entnommen, erwärmt und über den anderen Brunnen wieder in den Aquifer eingeleitet. Bei der Entladung wird die Durchströmungsrichtung umgekehrt. Der Aquifer-Wärmespeicher kann nicht wärmegeämmt werden. Seine Baukosten sind geringer als bei den anderen drei Bauarten und seine volumenspezifische Wärmekapazität befindet sich im mittleren Bereich. Er ist allerdings nur an wenigen geeigneten Standorten einsetzbar. Seine Be- und Entladeleistungen sind relativ gering, weshalb Pufferspeicher in das System integriert werden müssen. Die maximalen Beladetemperaturen des Aquifer-Wärmespeichers sind begrenzt, um die Grundwasserqualität und den Grundwasserchemismus nicht negativ zu beeinflussen. Aufgrund der relativ niedrigen Maximaltemperaturen eignet sich dieser Speichertyp nur in Kombination mit einer Wärmepumpe. Ein Aquifer-Wärmespeicher mit 20 000 m³ kommt bei der SUN-Anlage in Rostock zum Einsatz.

3 Systemintegration und Erfahrungen

Eine optimale Anpassung der einzelnen Komponenten in einer SUN-Anlage mit saisonalem Wärmespeicher ist Grundvoraussetzung für einen effizienten Betrieb.

3.1 Heißwasser-Wärmespeicher

In Friedrichshafen wurde im Jahr 1996 eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit einem 12 000 m³ Heißwasser-Wärmespeicher in Betrieb genommen, deren jährlicher Wärmebedarf zu etwa 50 % solar gedeckt werden soll. Die Wärmeversorgung des Nahwärmegebietes erfolgt mit Solarwärme (4050 m² Kollektoren) und durch zwei Gaskessel (s. Abb. 3). Im Sommer überschüssige Solarwärme wird in den Heißwasser-Wärmespeicher eingespeichert und bei Bedarf wieder entnommen.

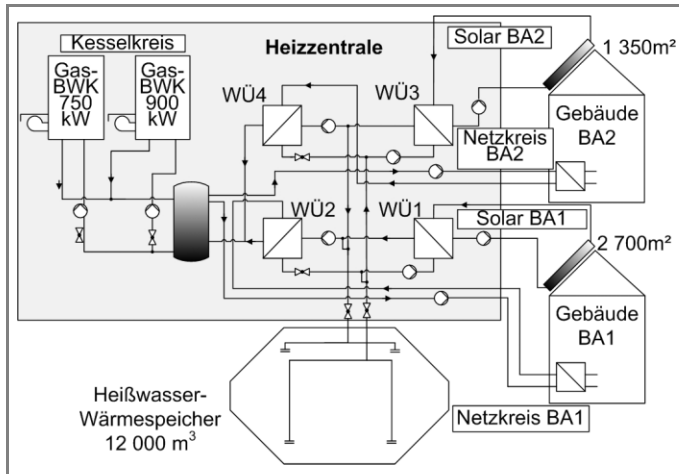


Abbildung 3. Anlagenschema der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Friedrichshafen.

Während des Betriebs der Pilotanlagen in Friedrichshafen als auch in Hamburg hat sich gezeigt, dass der geplante solare Deckungsanteil von ~50% aus verschiedenen Gründen nicht erreicht werden kann. Zum einen war die Netzurücklauftemperatur aus dem Nahwärmenetz deutlich höher als geplant und zum anderen waren die Wärmeverluste der Wärmespeicher höher als in der Planung angenommen. Beim Bau des Wärmespeichers in Friedrichshafen wurde außerdem davon ausgegangen, dass das Wohngebiet und die Kollektorflächen weiter ausgebaut werden. Aufgrund der gegenüber der Planung geänderten Bebauungsstruktur und der geringeren Anzahl an Wohneinheiten ist der Wärmespeicher auch für den derzeitigen Ausbau zu groß und kann daher nicht effizient betrieben werden.

Der Wärmespeicher in Hamburg wurde im Jahr 2010 als Multifunktionsspeicher umgebaut, um ihn auch während bislang ungenutzter Zeiträume nutzen zu können und den Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung im Fernwärmenetz zu erhöhen. Dazu wurde der bestehende Wärmespeicher geöffnet und nach oben mit Fertigbauteilen um 4 m verlängert. Der Wärmespeicher wurde innen wärmegeämmt und mit Edelstahlblech ausgekleidet, um die Wasserdampfdichtheit herzustellen. Der Wärmespeicher wurde mit einer Be- und Entladeeinrichtung ausgestattet, die an die hohen Durchflüsse und zu übertragenden Wärmeleistungen angepasst ist. Das Projekt wird wissenschaftlich vom IGS, Braunschweig betreut [8–10].

Der 2007 in Betrieb genommene Heißwasser-Wärmespeicher in München besteht aus einem zylindrischen Mittelteil und zwei Kegelstümpfen, die den Boden und das Dach bilden. Der untere Kegelstumpf besteht aus Ortbeton, während der Zylinder und der obere Kegelstumpf aus Fertigteilen bestehen. Der Wärmespeicher wurde innen mit Edelstahlblech ausgekleidet, die Wände und der Deckel wurden mit Blähglasgranulat gedämmt, während der Boden mit Schaumglasschotter gedämmt ist. In die Nahwärmeversorgung wurde eine LiBr-Absorptions-Wärmepumpe integriert,

um die Speichertemperatur unter die Nahwärmenetz-Rücklauftemperatur absenken zu können und die Exergie des Fernwärmenetzes nutzen zu können. Um Netzurücklauftemperaturen von 30 °C zu erreichen, werden die Heizungen (meist Fußbodenheizungen) der Gebäude direkt, d. h. ohne hydraulische Entkopplung von Nahwärmenetz durchströmt und die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt mit Frischwasserstationen. Das Projekt wird wissenschaftlich vom ZAE Bayern, Garching betreut, detaillierte Informationen sowie Messwerte sind [11] zu entnehmen.

3.2 Kies/Wasser-Wärmespeicher

In Eggenstein wurde erstmalig in Deutschland eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit saisonaler Wärmespeicherung in ein bestehendes Nahwärmenetz integriert. Das Nahwärmenetz versorgt eine Schule, zwei Sporthallen, ein Schwimmbad und ein Feuerwehrgebäude und soll einen solaren Deckungsanteil von 35–40% erreichen. Die Sanierungsmaßnahmen begannen im Jahr 2002. Es sind insgesamt 1600 m² Kollektorfläche in das System integriert (Abb. 4). Zur saisonalen Wärmespeicherung dient ein 4500 m³ großer Kies/Wasser-Wärmespeicher (KWWS), der zwischen 10 °C und 80 °C betrieben wird. Die Inbetriebnahmephase der Anlage mit saisonalem Wärmespeicher begann im Jahr 2009. Der KWWS kann bei hohen Speichertemperaturen direkt entladen werden und wird bei niedrigen Speichertemperaturen über eine elektrisch betriebene Wärmepumpe (60 kW_{th}) entladen. Es wurde eine Wärmepumpe mit einer verhältnismäßig geringen Leistung gewählt, damit diese den KWWS mit langen Laufzeiten (ohne zu Takten) entladen kann. Die Wärme soll möglichst kontinuierlich in den Pufferspeicher (30 m³) eingespeist werden. Die Wärmepumpe inkl. ihrer Regelung soll im Jahr 2011 in Betrieb genommen werden. Zur Wärmebereitstellung der restlichen Wärme sind zwei Gaskessel in das System integriert. Eine detaillierte Beschreibung ist in [7] gegeben.

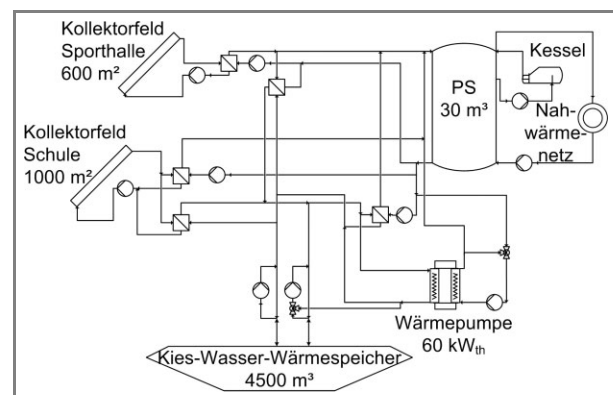


Abbildung 4. Anlagenschema der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Eggenstein.

3.1 Erdsonden-Wärmespeicher

In Attenkirchen wurde 2002 eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmespeicher und einem als Erdbecken errichteten unterirdischen Pufferspeicher in Betrieb genommen. Das zu versorgende Gebiet ist mit 30 Wohneinheiten sowie einer Tennishalle vergleichsweise klein; die Solarkollektoren (764 m²) wurden auf dem Dach einer Sommerstockbahn installiert. Der 10 500 m³ große Erdsonden-Wärmespeicher umgibt den zentralen, ungedämmten 500 m³ Pufferspeicher und nimmt dessen Wärmeverluste auf. Zur zusätzlichen Wärmeversorgung werden Wärmepumpen verwendet, die den Erdsonden-Wärmespeicher als Wärmequelle nutzen. Das Projekt wird wissenschaftlich vom ZAE Bayern, Garching betreut [12].

In Crailsheim entsteht seit 2002 auf einem ehemaligen Kasernengelände das Neubaugebiet Hirtenwiesen II als solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmespeicher. Der geplante solare Deckungsanteil beträgt 50%. Das System ist als zweigeteilte Anlage errichtet (Abb. 5): An den ersten Anlagenteil sind das Nahwärme-netz, die Fernwärme (als Nachheizung), Kollektoren (2492 m²) und ein 100 m³ Pufferspeicher angeschlossen. Der zweite, überwiegend saisonal betriebene Anlagenteil besteht aus Kollektoren (3221 m², Ende 2010), einem zweiten Pufferspeicher (480 m³) und einem Erdsonden-Wärmespeicher (39 000 m³, Bau 2007). In den zweiten Anlagenteil soll im Jahr 2011 eine Wärmepumpe integriert werden. Die Installation einer weiteren WP ist ebenso geplant wie eine Erweiterung des ESWS und der bestehenden Kollektorflächen. Die beiden Anlagenteile sind durch eine 300 m lange Leitung verbunden. Die Wärmepumpe soll elektrisch angetrieben und zwischen den beiden Pufferspeichern eingebunden werden. Damit kann die Wärmepumpe sowohl verdampfer- als auch kondensatorseitig mit großen hydraulischen Volumina arbeiten, wodurch lange Laufzeiten in effizienten Betriebspunkten ermöglicht werden. Eine detaillierte Beschreibung ist in [7] gegeben.

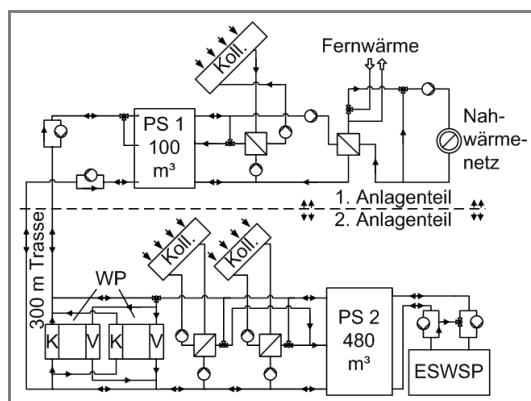


Abbildung 5. Anlagenschema der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Crailsheim.

3.2 Aquifer-Wärmespeicher

In Rostock wurde im Jahr 2000 eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit einem 20 000 m³ Aquifer-Wärmespeicher (ATES) in Betrieb genommen, deren jährlicher Wärmebedarf zu 62% solar gedeckt werden soll. Die Wärmeversorgung erfolgt mit Solarwärme (980 m² Kollektorfläche), durch einen Gaskessel und mit einer Wärmepumpe, die als Wärmequelle den ATES nutzt. Die Solarwärme kann entweder direkt ins Wärmeverteilnetz eingespeist werden (Sommer) oder aus dem ATES ausgespeichert werden (Winter). Im Sommer überschüssige Solarwärme wird im ATES saisonal gespeichert. Die elektrisch betriebene Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 110 kW kann Nutzwärme auf zwei Temperaturniveaus bereitstellen. Vor der Wärmeentnahme bei der Kondensation (bei ca. 50 °C) erfolgt eine Auskopplung von Wärme im überhitzten Bereich des Kältemittels bei ca. 65 °C (Heißgasauskopplung, Abb. 6) [5].

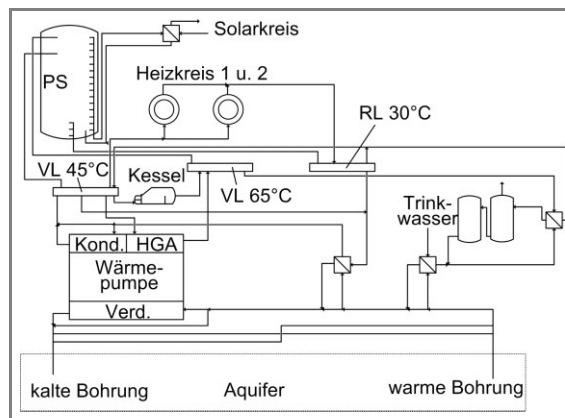


Abbildung 6. Anlagenschema der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Rostock.

3.3 Betriebserfahrungen

Durch die langjährige messtechnische Begleitung der saisonalen Wärmespeicher lassen sich Betriebserfahrungen ableiten, die sich teilweise deutlich von den Erwartungen der Planung unterscheiden. Die internen und externen Speicherverluste sind oft höher als durch Simulationen für die Planung erwartet.

Interne Speicherverluste bzw. Exergieverluste werden dadurch verursacht, dass die thermische Schichtung sich nicht wie geplant einstellt, sondern durchmischter verteilt ist als theoretisch erwartet. Dies betrifft nur Heißwasser-Wärmespeicher und Kies/Wasser-Wärmespeicher. Verantwortlich hierfür sind die Be- und Entladeeinheiten im Speicher. Bei Heißwasser-Wärmespeicher werden häufig Schichtbeladeeinheiten verwendet [13]. Diese sollen bei der Beladung des Speichers das warme Wasser in der Höhe einspeichern, die sich auf demselben Temperaturniveau befinden.

det wie das zu beladene Wasser. Dadurch wird eine Vermischung der Wasserschichten mit unterschiedlicher Temperatur verhindert. Dieses Verfahren funktioniert für kleine Speicher recht gut. Diese Beladeeinheiten können offensichtlich nicht beliebig hochskaliert werden, was dazu führt, dass die Schichtung bei den Pilotspeichern oft nicht so ausgeprägt ist, wie erwartet. Ähnlich verhält es sich bei den Kies/Wasser-Wärmespeichern, bei denen die Schichtung durch Wärmeleitung des Füllmaterials (Kies bzw. Sand) oder durch ungünstige Strömungsbildung zwischen Beladung und Entladeeinheit reduziert wird.

Als externe Speicherverluste werden die Wärmeverluste an die Umgebung bezeichnet. Maßgeblich für diese Verluste ist die Wärmedämmung. In vielen Fällen von erdvergrabenen Wärmespeichern ist die Dämmwirkung der Wärmedämmung schlechter als theoretisch erwartet. Das liegt häufig an einem Eindringen von Feuchtigkeit in das Dämmmaterial, was zur Erhöhung dessen Wärmeleitfähigkeit führt [16]. Durch den Einbauort im Untergrund ist es oft nur mit hohem technischem Aufwand möglich, diese Wärmedämmung über die Betriebszeit von vielen Jahrzehnten trocken zu halten. Nicht nur das Eindringen von flüssigem Wasser stellt dabei ein Problem dar, sondern auch das Hineindiffundieren von Wasserdampf. Im Bereich der Wärmedämmung für erdvergrabene Wärmespeicher besteht noch Optimierungspotenzial, was Bestandteil weiterer Forschungsarbeiten ist.

Die Erdsonden-Wärmespeicher, die nur nach oben wärmedämmen werden, und die Aquifer-Wärmespeicher sind nicht von internen Speicherverlusten betroffen, da sich bei ihnen bauartbedingt keine Schichtung einstellt. Die Speicherverluste durch fehlende Wärmedämmung werden bei ihnen dadurch vermindert, dass sie wesentlich größer gebaut werden. Somit verbessert sich das Oberflächen/Volumen-Verhältnis und die Speicherverluste werden reduziert. Zudem werden diese Speicherbauarten auf niedrigeren Temperaturniveaus betrieben als Heißwasser- und Kies/Wasser-Wärmespeicher, was ebenfalls die Wärmeverluste reduziert.

Der Betrieb aller Wärmespeicher ist durch ihren meist einfachen hydraulischen Aufbau und Anschluss störungsunanfällig. Lediglich können in Einzelfällen Fouling auf der Speicherseite der Wärmeübertrager auftreten.

4 Aspekte der Modellierung

Zur Dimensionierung von Erdsonden-Wärmespeichern und aller weiteren Komponenten eines SUN-Systems wurden bisher umfangreiche Simulationen im Vorfeld getätigt. Die dabei verwendeten Simulationstools – üblicherweise TRNSYS [17] – können die Auswirkung von fließendem Grundwasser auf die Effizienz von Erdsonden-Wärmespeichern und damit auf das gesamte SUN-System nicht oder nur ungenügend erfassen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der örtlichen hydrogeologischen Untersuchun-

gen basierte die Entscheidung für oder gegen einen Erdsonden-Wärmespeicher somit auf der Einschätzung eines Expertenkreises. Die Auslegung aller Anlagenkomponenten musste bislang unter Vernachlässigung von auf Grundwasserfluss beruhenden Effekten geschehen. Potenzielle Standorte für Erdsonden-Wärmespeicher beschränkten sich aufgrund der fehlenden Möglichkeit der Quantifizierung des Einflusses von fließendem Grundwasser auf Gebiete ohne oder mit nur sehr geringem Grundwasserfluss.

Weiterhin konnten bisher durch das Fehlen von geeigneten Simulationsprogrammen Berechnungen nur unzureichend durchgeführt werden, wie sie im Zuge von wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren für Erdsonden-Wärmespeicherprojekte, bei denen eine Grundwasserbeeinflussung befürchtet wird, erforderlich sind. Für diese Genehmigungsverfahren werden Voraussagen des dreidimensionalen Temperaturfeldes in und um den Erdsonden-Wärmespeicher unter Berücksichtigung von fließendem Grundwasser zu beliebigen Zeitpunkten des späteren Anlagenbetriebs benötigt, um Auswirkungen auf die Grundwasserqualität abschätzen zu können. Abb. 7 zeigt eine schematische Isothermendarstellung des Untergrunds um eine Erdwärmesonde.

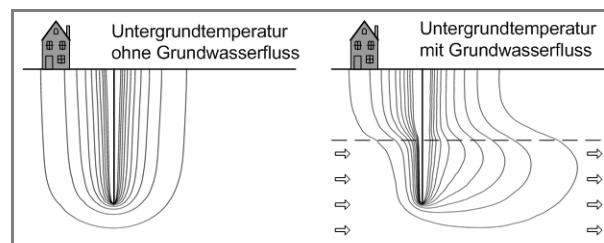


Abbildung 7. Schematische Isothermendarstellung des Untergrunds um eine Erdwärmesonde. Links: ohne Grundwasserfluss; rechts: mit Grundwasserfluss unterhalb der Sondenmitte.

Um fundierte Aussagen über die Beeinflussung von fließendem Grundwasser auf Erdsonden-Wärmespeicher treffen zu können, wurden im Rahmen eines vom BMU geförderten Projektes [18] die thermodynamischen Vorgänge von Erdwärmesonden in das Finite-Elemente-Programm FEFLOW [19] implementiert. Dabei geschieht die Abbildung der Erdwärmesonden im Finite-Elemente-Netz des Untergrunds durch eine Reihe übereinanderliegender Knoten. Eine Erdwärmesonde wird somit als eindimensionales, stabförmiges Element an der gewünschten Stelle im dreidimensionalen Umfeld modelliert. Da das Umfeld um die Sonden wesentlich gröber diskretisiert werden kann, als es die Geometrie im Bohrlochinneren zulässt, umfasst das Modell dann sehr viel weniger Elemente. Weiterhin steigt mit zunehmender Anzahl von Sonden die Anzahl der Elemente des FE-Netzes kaum an, wodurch die Ausdehnung des Rechengebiets gleich bleibt. Die Berechnung der Wärmetransportvorgänge im Bohrlochinneren wird durch Widerstands-Kapazitäts-Modelle [20] realisiert. Innerhalb

der eindimensionalen Linienelemente werden diese Widerstands-Kapazitäts-Modelle entweder auf einem numerischen oder einem analytischen Ansatz basierend gelöst. Erdsonden-Wärmespeicher können mit dieser Methode effizient und variabel modelliert und simuliert werden. Abb. 8 veranschaulicht die Einbindung einer eindimensionalen Sonde in eine dreidimensionale FE-Matrix.

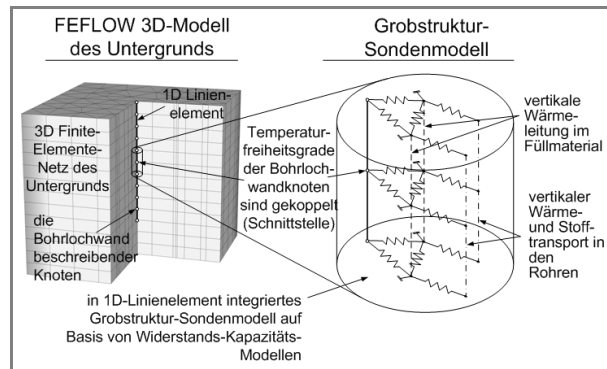


Abbildung 8. Erdwärmesonde als 1-D-Linienelement in einer 3-D-FE-Matrix.

In FEFLOW wurde ein anwenderfreundliches Makro erarbeitet, um durch einfache Parametereingabe einzelne Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder zu charakterisieren. Weiterhin wurde eine Kopplung der beiden Expertenprogramme TRNSYS und FEFLOW erstellt, da letztendlich nur durch eine volldynamische Kopplung die ausgeprägte Wechselwirkung zwischen Erdsonden-Wärmespeicher und restlicher Anlagentechnik erfasst werden kann.

Das entstandene Simulationsprogramm lässt auch fundierte Aussagen über die thermische Funktionalität von einzelnen Erdwärmesonden unter Berücksichtigung realer hydrogeologischer Verhältnisse zu. Als Wärmequelle für erdgekoppelte Wärmepumpen mit Unterstützung der Temperaturregeneration des umliegenden Untergrunds im Sommer durch Einspeisung von Solarwärme oder von durch Klimatisierung anfallender Wärme finden diese Systeme zunehmend Einsatz in Privat- und Industriebauten.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen von nationalen Förderprogrammen wurden seit 1996 elf Pilotanlagen für solar unterstützte Nahwärmeversorgungssysteme in Deutschland realisiert. Jede der vier verschiedenen Bauarten von Langzeit-Wärmespeichern (Heißwasser-, Kies/Wasser-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher) wurde mindestens in einer Pilotanlage umgesetzt. Die Pilotspeicher zeigen auf, dass die Speicherung der Wärme mit allen Bauarten über einen langen Zeitraum vom Sommer bis in den Winter technisch machbar und umsetzbar ist.

Die Speichertechnologie wurde in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und die Innovationen in den neuen Anlagen umgesetzt. Keine der vier Bauarten kann als die allgemein beste betrachtet werden. Je nach geologischen Gegebenheiten, baurechtlichen Bestimmungen und anderen Randbedingungen wie z. B. uneingeschränkte Befahrbarkeit muss die beste Bauart für diese Anforderungen und das System ausgewählt werden.

Über die Integrationsmöglichkeit in SUN-Anlagen hinaus, können die saisonalen Wärmespeicher in Systeme integriert werden, bei denen einem Wärmeangebot einem saisonal versetzten Wärmebedarf gegenüber steht. Dies könnten beispielsweise KWK-Anlagen sein.

Die saisonale Wärmespeicherung bietet jetzt schon die Möglichkeit, ressourcenschonend mit Energie umzugehen. Es besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf, um diese Technologie weiter zu optimieren.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] *Energieverbrauch in Deutschland 2007*, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin 2008.
- [2] R. Marx, J. Nußbicker-Lux, D. Bauer, W. Heidemann, 21. OTTI-Symposium thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Mai 2011.
- [3] T. Urbaneck, U. Schirmer, *Forschungsbericht – Solarthermie 2000 Teilprogramm 3 – Solar unterstützte Nahwärmeversorgung Pilotanlage Solaris Chemnitz*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2006.
- [4] T. Urbaneck, *Dissertation*, Technische Universität Chemnitz 2004.
- [5] M. Benner et al., *Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin 2003.
- [6] M. Bodmann et al., *Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2005.
- [7] D. Bauer et al., *Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2009.
- [8] www.saisonalspeicher.de/Projekte/AktuelleProjekte/Hamburg/tabid/92/language/de-DE/Default.aspx
- [9] M. Schlosser, M. Heuer, L. Kühl, M. N. Fisch, *Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespeicher – wissenschaftlich technische Begleitung der Pilotanlagen Hamburg-Bramfeld, Hannover-Kronsberg und Steinfurt-Borghorst*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2010.

- [10] T. Schmidt, D. Mangold, 5. *Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien IRES 2010*, Berlin, November 2010.
- [11] W. Dallmayer et al., *Begleitforschung Solare Nahwärme Am Ackermannbogen in München – SNAB*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2010.
- [12] M. Reuss, W. Schälkpopf, W. Beuth, M. Schmidt, *Tagungsband OTTI – 17. Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein, Mai 2007, 216.
- [13] S. Göppert et al., *Solarthermie 2000plus - Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher*, Forschungsbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2009.
- [14] T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen, *Sol. Energy* 2004, 76 (1–3), 165.
- [15] D. Mangold, 17. *Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein, Mai 2007.
- [16] F. Ochs, *Dissertation*, Universität Stuttgart 2010.
- [17] *A Transient System Simulation Program*, University of Wisconsin, Madison 2000.
- [18] D. Bauer et al., *Untersuchung des Einflusses von Grundwasserströmung auf Erdsonden-Wärmespeicher*, Abschlussbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2010.
- [19] *Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System*, WASY GmbH, Berlin 2007.
- [20] D. Bauer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, H.-J. G. Diersch, *Int. J. Energy Res.* 2011, 35 (4), 312. DOI: 10.1002/er.1689