



## Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme



*Die realisierten Pilotanlagen bestätigen die technische Machbarkeit solarthermischer Langzeitwärmespeicherung. Die solaren Nutzwärmekosten von Anlagen mit saisonalem Wärmespeicher liegen derzeit jedoch noch weit über den Wärmegestehungskosten aus fossilen Energieträgern. Die Techniken der saisonalen Wärmespeicherung müssen weiterentwickelt und erprobt werden, um die derzeit noch zu hohen Systemkosten zu reduzieren.*

**D**ie zeitliche Verschiebung von Solarstrahlungsangebot und Heizwärmebedarf in Mitteleuropa hat dazu geführt, dass Solarenergie vor allem für die Trinkwassererwärmung von Frühjahr bis Herbst genutzt wird. Große Solaranlagen mit saisonalen Wärmespeichern haben die Auf-

gabe, Solarwärme auch für die Raumheizung im Winter zur Verfügung zu stellen. Saisonale Wärmespeicher sind die zentralen Bausteine der solar unterstützten Nahwärme. Neben Heißwasser-Wärmespeichern aus Beton oder glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) wurden drei weitere Bautypen entwickelt und erprobt: Kies-Wasser-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher. Für jedes dieser vier Speicherkonzepte existiert mittlerweile mindestens eine Pilotanlage.

Seit 1993 fördert das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) getragene Programm "Solarthermie-2000" den Bau von Pilot- und Demonstrationsanlagen. Die Begleitforschung sowie die Auswertung des mehrjährigen Messprogramms werden in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart durchgeführt.

Die Erfahrungen aus Planung und Realisierung der Projekte sollen zur Weiterentwicklung und Kostenreduzierung führen. Ziel ist es, beteiligten Planern und Baufirmen sowie künftigen Investoren technisch ausgereifte und langfristig wirtschaftliche Lösungen zu demonstrieren.

**1** Unterschiedliche Speichertypen in Bau und Erprobung: Der Heißwasser-Wärmespeicher in Friedrichshafen (12.000 m<sup>3</sup> Speichervolumen) dient im Endausbau der Versorgung von bis zu 570 Wohneinheiten des Neubaugebiets Wiggerhausen (oben), der Kies-Wasser-Wärmespeicher in Chemnitz (8.000 m<sup>3</sup>) von Gebäuden des Technologie- und Gewerbeparks „Solaris“ (unten).

# Systemkonzept und Projektentwicklung

Zentrale Wärmeversorgungssysteme sind seit langem eingeführt und haben sich auf dem Markt zur Versorgung größerer Liegenschaften etabliert. Durch die Integration einer solarthermischen Großanlage mit effizienter Energiebereitstellung sowie -ausnutzung lässt sich die zur Versorgung notwendige fossile Energiemenge gegenüber konventionellen Nah- und Fernwärmesystemen deutlich reduzieren.

Bei der Einbindung der Solaranlage unterscheidet man zwischen Systemen mit Kurzzeit-Wärmespeicher, ausgelegt auf 15 bis 20% solaren Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf für Raumheizung und Trinkwassererwärmung, und Solaranlagen mit Langzeit-Wärmespeicher. Diese sind in der Regel auf solare Deckungsanteile zwischen 30 und 60% ausgelegt.

## Anlagen mit Kurzzeit-Wärmespeicher

Solar unterstützte Nahwärmesysteme mit Kurzzeit-Wärmespeicher und Kollektorflächen über 100 m<sup>2</sup> werden vorzugsweise in die Wärmeversorgung großer Mehrfamilienhäuser oder ganzer Wohnsiedlungen eingebunden. Im Fall der solaren Trinkwassererwärmung wird diese auf 80 bis 100% solarer Deckung während der Sommermonate, d. h. auf etwa 40 bis 50% des jährlichen Wärmebedarfs zur Trinkwassererwärmung, ausgelegt. Dies entspricht bei derzeitigem Wärmedämmstandard der Gebäude einem solaren Deckungsanteil von 15 bis 20% am Gesamtwärmebedarf. Der solare Deckungsanteil kann gesteigert werden, wenn die Solaranlage auch die Raumheizung unterstützt.

## Anlagen mit Langzeit-Wärmespeicher

Erste Anlagen dieser Art wurden im Rahmen des Programms „Solarthermie-2000“ in den letzten Jahren verwirklicht, weitere sind in Planung. Um den Beitrag der Solarenergie weiter zu erhöhen, müssen Solaranlagen mit einem Langzeit-Wärmespeicher ausgestattet werden. Hierdurch kann die zeitliche Verschiebung zwischen Solarstrahlungsangebot im Sommer und maximalem Wärmebedarf im Winter ausgeglichen werden. Wärme kann entweder direkt im Untergrund oder in künstlich geschaffenen Behältern gespeichert werden. Die Erprobung von Technologien zur mehrmonatigen - d.h. saisonalen - Wärmespeicherung ist noch nicht abgeschlossen. Die technische Machbarkeit der bisher entwickelten Speicherkonzepte ist allerdings durch die Pilotprojekte weitgehend nachgewiesen.

In solar unterstützten Nahwärmesystemen wird die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme meist über das Solarnetz zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf direkt an die Gebäude verteilt ②.

Die Kollektoren sind in der Regel auf den Dächern der Gebäude montiert oder in die Dachkonstruktion integriert. Besonders kostengünstig ist der Einsatz vorgefertigter Elemente, in denen Dach und Kollektor eine Einheit bilden. In jedem Fall sollten die Kollektoren möglichst nahe an der Heizzentrale liegen. Der saisonale Wärmespeicher kann sowohl in den Untergrund eingebaut sein, als auch ebenerdig angeordnet werden. Die über das Wärmeverteilnetz gelieferte Wärme versorgt Heizung und Trinkwassererwärmung der Gebäude. Zur Wärmebereitstellung in der Heizzentrale wird die im Langzeit-Wärmespeicher gespeicherte Solarwärme verwendet. Bei Bedarf wird konventionell, z. B. mit einem Gasbrennwertkessel, nachgeheizt.

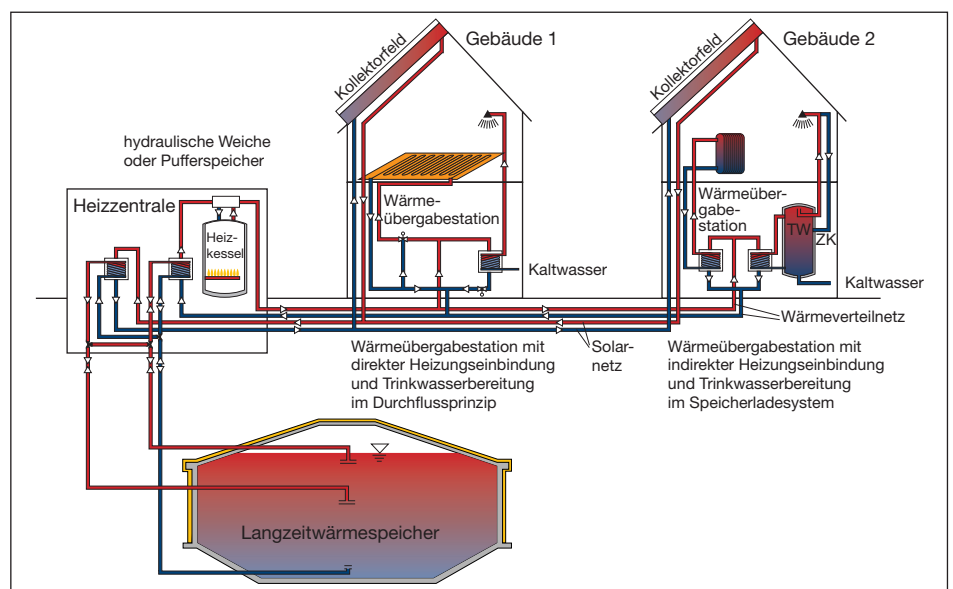
## Kosten und Wirtschaftlichkeit

Der Vergleich zwischen einer solar unterstützten Nahwärmesversorgung mit Kurzzeit-Wärmespeicher mit dem einer Kleinanlage zur Trinkwassererwärmung zeigt, dass das

Kosten-Nutzen-Verhältnis bei Kleinanlagen rund zwei- bis dreimal höher ist als das solar unterstützter Nahwärmesysteme. Der Kostenvorteil solarer Großanlagen im Vergleich zu Kleinanlagen wird vor allem durch deren günstigere, auf die Kollektorfläche bezogenen Systemkosten verursacht. Die Grenzwerte für den Energiebedarf eines Wohngebäudes nach der im März 2001 im Bundeskabinett verabschiedeten Energie-Einspar-Verordnung (EnEV) sind im Vergleich zu den entsprechenden Werten der Wärmeschutzverordnung von 1995 (WSchV95) und der Heizungsanlagenverordnung (HeizAnlV) gesenkt worden. Die durch das gestiegene Anforderungsniveau erhöhten Kosten zum Beispiel für zusätzliche Wärmedämmung oder Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung liegen in einem Bereich, in dem große Solaranlagen eine wirtschaftliche Konkurrenz darstellen.

## Planungsaspekte und -instrumente

Zentrale Systeme zur Wärmeversorgung lassen sich optimal realisieren, wenn eine kompakte Bebauungsstruktur vorliegt und sämtliche Gebäude im Versorgungsgebiet an die Wärmeversorgung angeschlossen werden. Befinden sich die Grundstücke im Eigentum der Gemeinde, lässt sich prinzipiell die Anschlusspflicht in den privatrechtlichen Grundstückskaufverträgen festschreiben. Ein entsprechender Eintrag im Grundbuch sichert dies ab. Ist die Gemeinde jedoch nicht im Besitz aller Grundstücke, so kann theoretisch der Anschluss- und Benutzungszwang (für Fernwärme) durch einen Satzungsbeschluss des Gemeinderates festgelegt werden. Die aktuelle Rechtsprechung erschwert jedoch die Anwendung des Anschluss- und Benutzungszwangs sowie die Gestaltung entsprechender privatrechtlicher Verträge erheblich. Begründet wird dies mit dem Verstoß gegen EU-Wettbewerbsrecht, im Sinne einer widerrechtlichen Ausnutzung örtlicher Versorgungsmonopole z. B. durch Stadtwerke.



② Schema einer solar unterstützten Nahwärmesversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher

In der Regel beinhaltet eine integrale Planung unter Berücksichtigung passiver und aktiver Nutzung der Solarenergie einen energetisch optimierten Bebauungsplan und den verbesserten Wärmeschutz der Gebäude. Eine „Solarisierung“ der Bebauungspläne, zum Beispiel durch eine günstige Ausrichtung der Gebäude ist wichtig, insbesondere wenn auf den Dächern Solarkollektoren installiert werden sollen. Hierbei ist auch die Dachneigung, die möglichst zwischen 35 und 45° betragen sollte, von Bedeutung. Eine Verschattung der Kollektorfelder durch benachbarte Gebäude und hohe Bäume ist zu vermeiden.

Auf Grund der Degression ihrer spezifischen Nutzwärmekosten mit zunehmender Größe ist eine Mindestgröße des Solarsystems sinnvoll. Diese liegt für Anlagen mit Kurzzeit-

Wärmespeicher bei etwa 30 Wohneinheiten, bei Anlagen mit Langzeit-Wärmespeicher bei rund 100 Wohneinheiten (entsprechend etwa 1.000 MWh/a Gesamtwärmebedarf).

### Projektorganisation

Bei der Realisierung einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung ist die frühzeitige Zusammenarbeit von Planern, Anlagenbetreibern, Bauherren und Architekten entscheidend. Bei kleineren Projekten sowie Eigentümergemeinschaften kann die Wärmeversorgung rechtlich Teil der Gebäude sein. Damit sind die Bauherren gleichzeitig die Eigentümer der Solaranlage. Werden ganze Wohngebiete mit Nahwärme versorgt, gibt es in der Regel einen Betreiber, der auch Eigentümer der Solaranlagen ist. In vielen

Projekten treten die örtlichen Energieversorger bzw. Stadtwerke als Betreiber auf. Daneben bieten zunehmend Energiedienstleistungsunternehmen Finanzierungs- und Betreiberlösungen z.B. in Form des Contracting an.

Wenn zwischen Gebäudeeignern und Anlagenbetreibern differenziert werden muss, ist es wichtig, die Schnittstellen hinsichtlich Kosten und Zuständigkeiten klar zu definieren. Dies betrifft vor allem die Wärmeübergabestationen und die Kollektorfelder auf den Dächern.

Für die meisten Betreiber ist eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung Neuland. Um Fehler zu vermeiden, ist eine gute Beratung durch eine erfahrene Institution (Planer, Energieversorger etc.) dringend erforderlich

## Systemkomponenten: Technik und Einsatz

*Die Systemkomponenten solarer Nahwärmesysteme mit Langzeit-Wärmespeichern müssen hinsichtlich Planung, Bau und Betrieb unterschiedlichste Anforderungen erfüllen. Dies betrifft das Wärmeverteils- und Sammelnetz, die einzubindende Niedertemperatur-Gebäudetechnik, die Kollektoranlage sowie die bislang entwickelten vier Speicherkonzepte.*

### Die Nahwärmeversorgung

#### ■ Wärmeverteils- und -sammelnetz

Zur Minimierung der Wärmeverluste des Nahwärmenetzes ist eine möglichst zentrale

Lage der Heizzentrale im Versorgungsgebiet vorteilhaft. Wichtig ist die Nähe zu einem eventuell geplanten Langzeit-Wärmespeicher und die Anbindung an bestehende oder geplante Versorgungsstrassen (Gas-, Wassernetz, Stromversorgung etc.). Es

können vier Arten von Nahwärmenetzen unterschieden werden:

Für größere Nahwärmesysteme, wie z. B. in den Projekten in Hamburg und Friedrichshafen, sollte immer eine dezentrale Trinkwassererwärmung gewählt werden. Diese erfolgt in jedem Gebäude (2), Gebäude 2) bzw. in Ein- oder Zweifamilienhäusern alternativ mit Kompaktübergabestationen, in denen das Trinkwasser im Durchflussverfahren erwärmt wird (2),

Gebäude 1). Zur Wärmeversorgung der Gebäude genügt ein aus zwei Leitern bestehendes Wärmeverteilsnetz (2-Leiternetz). Ist eine Solaranlage mit einem oder mehreren Kollektorfeldern vorhanden, kommen die Leitungen für den Solarvor- und -rücklauf hinzu (2+2-Leiternetz).

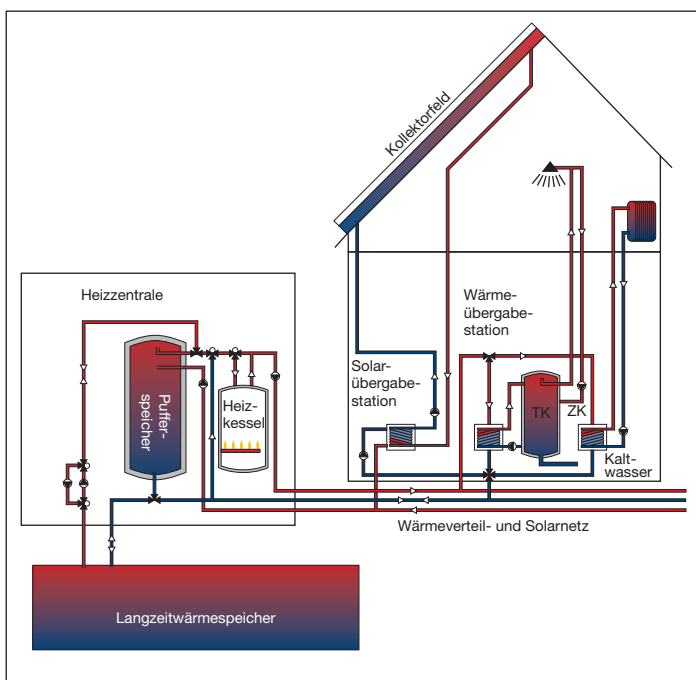
Systeme mit zentraler Trinkwassererwärmung benötigen ein zusätzliches Leiterpaar zur Trinkwasserversorgung der Gebäude (4-Leiter bzw. mit Solarkreis 4+2-Leiternetz). Sie weisen im Vergleich zum 2-Leiternetz höhere Netz-Wärmeverluste auf und sind nur für kleine Anlagen sinnvoll, z. B. für Reihenhäuserzeilen mit 20-30 Wohneinheiten wie im Projekt in Ravensburg.

Ein weiteres Konzept ist das 3-Leiternetz, bei dem der Wärme- und der Solarvorlauf mit einer gemeinsamen Rücklaufleitung gekoppelt sind. Verwirklicht ist dies z. B. im Projekt Neckarsulm (3). In den Gebäuden wird der Rücklauf zur Nahwärmeversorgung den Kollektorfeldern zugeführt. Die Trinkwassererwärmung erfolgt dezentral. Durch dieses System kann eine Rohrleitung eingespart werden. Zudem müssen keine Frostschutzmittel führenden Leitungen im Boden verlegt werden.

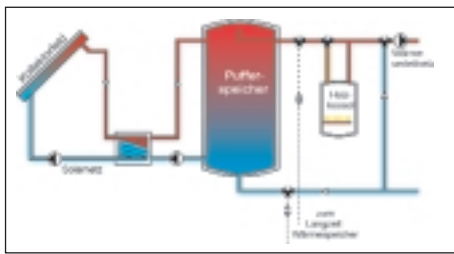
Sind sowohl Anlagen auf hohem Temperaturniveau (z. B. 60 °C zur Trinkwassererwärmung) als auch Anlagen auf tieferem Temperaturniveau (z. B. 45 °C zur Raumheizung) zu versorgen, kann es sinnvoll sein, die Wärmeverteilung aufzuteilen. Dies führt zu einem 3-Leiternetz mit zwei Wärmevorläufen und einem gemeinsamen Wärmerücklauf. Mit den Rohrleitungen für die Solaranlage wird dieses System zum 3+2-Leiternetz. Auch dieser Aufbau ist aufgrund der höheren Netz-Wärmeverluste nur in kleinen Anlagen sinnvoll.

#### ■ Anlagentechnik in der Heizzentrale

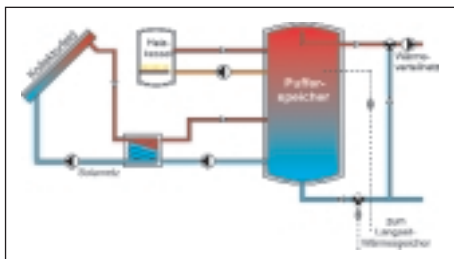
4 zeigt die Einbindung eines 2+2-Leiternetzes, wie es häufig bei Anlagen mit einem saisonalen Wärmespeicher verwendet wird. Der Langzeit-Wärmespeicher wird - unabhängig vom Typ - parallel zum Pufferspeicher geschaltet (vgl. Strichlinierung). Träge



3 Schema einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit 3-Leiternetz



4 Anlagenschema mit serieller Einbindung des Heizkessels nach dem Pufferspeicher



5 Anlagenschema mit paralleler Einbindung des Heizkessels in den Pufferspeicher

reagierende Speicher wie z. B. Erdsonden-Wärmespeicher benötigen Puffervolumina bis zu mehreren 100 m<sup>3</sup>, um die Leistungsspitzen der Solaranlage abzufangen. Wird dagegen ein Wasserspeicher verwendet, kann statt des Pufferspeichers auch eine hydraulische Weiche mit einem Volumen von nur 2-5 m<sup>3</sup> verwendet werden.

Sind im Nahwärmenetz wenige Wärmeübergabestationen mit jedoch großen Wärmelasten vorhanden, kann es zu hohen Leistungsschwankungen im Nahwärmenetz kommen. Diese können über die hydraulische Weiche und die Regelung des Heizkessels nur unzureichend ausgeglichen werden, was eine stark schwankende Netzvorlauftemperatur zur Folge hat. In diesem Fall ist eine parallele Einbindung des Heizkessels empfehlenswert (5).

### ■ Niedertemperatur-Gebäudetechnik

Die Auslegung des Heizsystems und die Art der Trinkwassererwärmung bestimmen die Rücklauftemperatur des Nahwärmenetzes. Da diese Temperatur der Solaranlage als Rücklauf zur Verfügung steht, bestimmt sie wesentlich den solaren Nutzwärmeertrag. Somit ist der Einsatz eines Wärmeverteilsystems auf niedrigem Temperaturniveau Voraussetzung für die effiziente Nutzung von Sonnenenergie. Eine Auslegung des Heizsystems auf 60 °C Vorlauftemperatur und 30 °C Rücklauftemperatur (60/30 °C) ist anzustreben. Für den Solarertrag noch günstiger sind Auslegungen mit 50/30 °C oder der Einsatz von Fußbodenheizungen, bei denen das Temperaturniveau weiter abgesenkt werden kann. Der Einsatz eines Niedertemperatur-Heizsystems führt zu Mehrkosten im konventionellen Heizsystem. Dass jedoch selbst im Mietwohnungsbau ein Niedertemperatur-Heizsystem verwirklicht werden kann, zeigt das Projekt „Helios“ in Rostock-Brinckmannshöhe. Hier wurden Radiatoren mit einer Auslegung von 50/30 °C installiert.

Die Heizkostenabrechnung erfolgt mit Hilfe elektronischer Heizkostenverteiler.

Die Schnittstelle zwischen Nahwärmenetz und hausseitigen Installationen ist die Wärmeübergabestation. Die Heizungsanbindung kann entweder direkt oder indirekt über einen Wärmeübertrager erfolgen. Eine direkte Anbindung ist anzustreben, weil dadurch die Vor- und Rücklauftemperaturen im Netz niedriger liegen und dies der Effizienz der Solaranlage zugute kommt (2, Gebäude 1).

Die Trinkwassererwärmung kann, sofern kein 4+2-Leiternetz verwendet wird, über Speicherladesysteme oder im Durchflussverfahren erfolgen. Eine Trinkwassererwärmung mit an das Nahwärmenetz angeschlossenen Durchlauferhitzern (Durchflussverfahren) führt zu tieferen Netzrücklauftemperaturen als mit Speicherladesystemen. Es ist jedoch i.d.R. nur für Einzel- oder Reihenhäuser mit geringerem Wärmeleistungsbedarf geeignet. Bei Wärmeübergabestationen mit Trinkwassererwärmung im Durchflussverfahren muss die Netzvorlauftemperatur ganzjährig auf hohem Temperaturniveau (65 bis 70 °C) gehalten oder eine dezentrale Nachheizung installiert werden. Bei Speicherladesystemen ist dagegen auch ein intermittierender Betrieb möglich, bei dem die Trinkwasserspeicher in den Gebäuden im Sommer nur einmal pro Tag erwärmt werden und nur zu dieser Zeit das Wärmeverteilnetz durchströmt wird. Durch die notwendige Erwärmung des Rücklaufs der Trinkwasserzirkulation können bei Speicherladesystemen hohe Netzrücklauftemperaturen von im Durchschnitt 50 bis 55 °C auftreten.

Bei allen Wärmeübergabestationen ist auf die Einhaltung der DVGW-Richtlinien W551 und W552 zu achten. Darin wird u.a. zur Vermeidung der Legionellenbildung das Einhalten bestimmter Mindesttemperaturen im Trinkwasserkreis gefordert.

Bei der Planung der Wärmeübergabestationen und der hausinternen Hydraulik ist eine sorgfältige Auslegung wesentlich, um niedrige Rücklauftemperaturen im Nahwärmenetz zu gewährleisten. Selbstverständlich erfordert dies auch eine sorgfältige Bauausführung, insbesondere die korrekte Einregulierung der hausseitigen Installationen. Durch die jede Pilotanlage begleitenden Messungen wurde festgestellt, dass die konventionelle Haustechnik meist nicht mängelfrei ausgeführt war. Die häufigsten Mängel sind

hydraulisch nicht abgegliche Raumheizungssysteme, Plattenwärmeübertrager mit zu kleinen Übertragungsleistungen und Regelungsprobleme im außentemperaturgeführten Heizsystem.

Der Betreiber einer Nahwärmeversorgung hat auf die Qualität der installierten Haustechnik nur sehr eingeschränkten Einfluss. Niedrige Netzrücklauftemperaturen zur Gewährleistung möglichst hoher Solarerträge können nur durch eine stetige Projektbegleitung erreicht werden, die alle Beteiligten einschließlich der Bau- und Handwerksfirmen einbezieht und motiviert. Hilfreich zur späteren Betriebsüberwachung sind Erfassungssysteme, welche die Daten einzelner Wärmeübergabestationen an eine zentrale Leitstelle melden.

## Die Kollektoranlage

### ■ Kollektorfelder für Großanlagen

Die Kollektorfelder der im weiteren vorgestellten Pilotanlagen sind ausschließlich auf Neubauten montiert. Während die ersten großen Felder teilweise noch auf konventionellen Dächern aufgeständert wurden, wird nun meist dachintegriert installiert. Hierzu werden große industriell vorgefertigte Kollektormodule als wetterfeste Dachhaut auf ein konventionelles Unterdach montiert (6). Um einen möglichst hohen Solarertrag zu erzielen, müssen die Kollektorflächen - je nach der Art des Gesamtsystems - ca. 35 bis 45° gegen die Horizontale geneigt sein. Die architektonische Integration stark geneigter Kollektorflächen ist aber insbesondere bei Mehrfamiliengebäuden schwierig. Aus diesem Grund weisen etliche installierte Kollektorflächen nur 15 bis 25 ° Neigung gegen die Horizontale auf. Der Minderertrag im Vergleich zu steiler geneigten Kollektordächern muss mit einer Erhöhung der Kollektorfläche ausgeglichen werden. Bei einer Neigung von nur 15° gegen die Horizontale muss das Kollektorfeld bei einer wie in (2) angenommenen Konfiguration ca. 13 bis 15 % vergrößert werden.

Bei den neuesten Pilotanlagen sind die Gebäude mit Solardächern eingedeckt. Dabei kommen komplette Fertigdachelemente zum Einsatz, bestehend aus Kollektoren samt Dachunterkonstruktion. Ein Solardach mit eingebauten Dachfenstern und Blindelementen ist in Rostock-Brinckmannshöhe montiert (7).



6 Montage der Kollektorflächen in Hamburg-Bramfeld



7 Solardach in Rostock-Brinckmannshöhe

In Schwäbisch-Gmünd **8** und in Chemnitz sind Vakuumröhren installiert: Das Kollektorfeld ist jeweils nahezu horizontal montiert. Durch Drehung der Absorber zur Sonne (ca. 20 ° gegen die Horizontale) ist eine effiziente Solarenergienutzung möglich.

Gegenüber der Variante „Solardach“ ist ein Kollektorfeld aus dachintegrierten Flachkollektoren meist die nächst kostengünstige Lösung. Im Vergleich zu Kleinanlagen mit Kollektorfeldkosten von durchschnittlich 805 DM/m<sup>2</sup> sind große Kollektorfelder mit mittleren Kosten von 380 bis 560 DM/m<sup>2</sup> deutlich günstiger. Wird das Kollektorfeld aufgeständert, ist die Unterkonstruktion mit durchschnittlichen Kosten von rund 150 DM/m<sup>2</sup> bei einer Preisspanne von 70 bis über 300 DM/m<sup>2</sup> teuer. Nur bei sehr großen Kollektorfeldern wie in Friedrichshafen oder in Neckarsulm ist die Unterkonstruktion zur Aufständigung des Kollektorfeldes relativ günstig ausführbar.

### ■ Hydraulische Anforderungen

Meist sind die Kollektoren im Feld nicht gemäß dem System nach Tichelmann, welches ihre gleichmäßige Durchströmung garantiert, verrohrt. In diesem Fall ist die gleichmäßige Durchströmung durch eine dem Druckverlust entsprechende Dimensionierung einzelner Rohrleitungsabschnitte sichergestellt. Die Überprüfung einer gleichmäßigen Kollektorfelddurchströmung ist durch eine Temperaturmessung in den Rohrleitungen oder - bei Flachkollektoren - durch eine Thermografie des Feldes möglich. Anhaltswerte können auch durch eine Begehung des Kollektorfeldes bei Sonnenschein mit Kontrolle der Kollektorscheibentemperatur erzielt werden. Zum hydraulischen Abgleich mehrerer Kollektorfelder werden Strangregulierventile eingesetzt. In manchen Anlagen mussten diese nach ein bis zwei Jahren nochmals nachgestellt werden. Es wird empfohlen, diese Arbeit in die Ausschreibung des Kollektorfeldes aufzunehmen.

Die Kollektoranschlussleitungen dehnen sich bei Erwärmung aus. Diese Längenausdehnung muss beim Anschluss der Kollektoren sowie bei der Führung der Sammelleitungen kompensiert werden können.

### ■ Druckprüfungen bei Großanlagen, Frostschutz

Für die Dichtigkeitsprüfung der Kollektorfeldverrohrung wird diese meist einer Druckprobe mit Wasser unterzogen. Gemessen wird, ob der aufgebrachte Druck in den zu überprüfenden Feldabschnitten über Nacht erhalten bleibt. In frostfreien Nächten mit klarem Himmel und Außentemperaturen, die nur gering über 0 °C liegen, kann durch den Strahlungsaustausch zwischen den Absorberflächen und dem klaren, kalten Himmel das Wasser in den Kollektoren einfrieren und Frostschäden verursachen. Dies ist bereits in mehreren Anlagen aufgetreten. Selbst in einem im Sommer geprüften Kollektorfeld entstand ein Frostschaden, als im Winter ein durch das Abdrücken mit Wasser gefülltes Blindrohr einfro. Ein unbeabsichtigtes Einfrieren von Kollektoren kann vermieden werden, wenn mit Luft oder Stick-

stoff abgedrückt wird. Dies muss mit den ausführenden Firmen abgestimmt werden, da eine Wasserdichtigkeit der Rohrverbindungen nicht mit einer Gasdichtigkeit gleichgesetzt werden kann - ein wasserdichtes Rohr muss nicht gasdicht sein.

### ■ Sicherheitskonzept

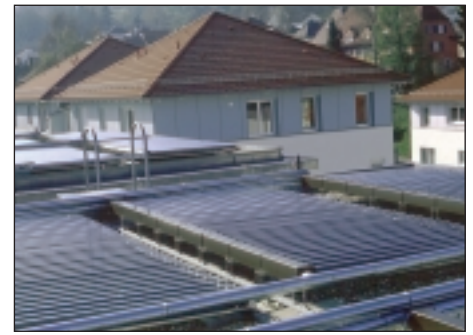
Die Sicherheitstechnik großer Kollektorfelder hat sich seit deren Aufnahme in die Dampfkesselverordnung geklärt. Das für die Pilotanlage in Hamburg entwickelte System ist in **9** dargestellt: Alle Kollektorfelder sind ohne feldinterne Absperrhähne installiert. Um bei Wartungsarbeiten nicht das gesamte Solarnetz entleeren zu müssen, kann jedes einzelne Feld mit einem Absperr- und einem Drei-Wege-Hahn vom Solarnetz getrennt werden. Der Drei-Wege-Hahn öffnet das Kollektorfeld und die Solarflüssigkeit läuft in einen mobilen Auffangbehälter. Nur so kann auf ein Sicherheitsventil im Feld verzichtet werden; denn alle Kollektorfelder sind über das Sicherheitsventil in der Heizzentrale abgesichert.

Ist bei starker Sonneneinstrahlung auf das Kollektorfeld keine ausreichende Wärmeabnahme gewährleistet, drückt der entstehende Dampf über das Sicherheitsventil den Wärmeträger aus dem Kollektorfeld in den Auffangbehälter. Mündet die Abblaseleitung entsprechend den Vorschriften der DIN 4757 „beobachtbar“ frei in den Auffangbehälter, kann dies zu einer Luftanreicherung im Wärmeträger führen, so dass der Solarkreis nach mehrmaligem Abblasen entlüftet werden muss. Anlagen, die die Abblaseleitung unter Luftabschluss in den Auffangbehälter führen, weisen diese Probleme nicht auf.

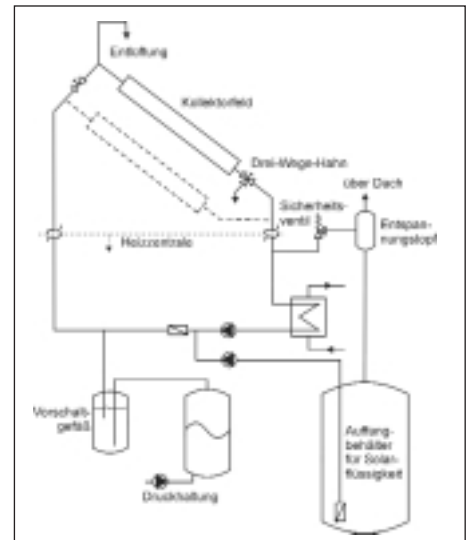
Nach einem Öffnen des Sicherheitsventils darf die Solaranlage nicht automatisch in Betrieb gehen, denn das Ventil muss zuvor überprüft werden. Eine automatische Wiederinbetriebnahme ist nur erlaubt, wenn parallel zum Sicherheitsventil ein Überströmventil installiert wird, das auf einen geringeren Maximaldruck als das Sicherheitsventil eingestellt ist. Generell ist darauf zu achten, dass in beiden Ventilen eine Feder mit weicher Kennlinie verwendet wird, um Druckstöße beim Abblasen zu vermeiden.

### Der Wärmespeicher

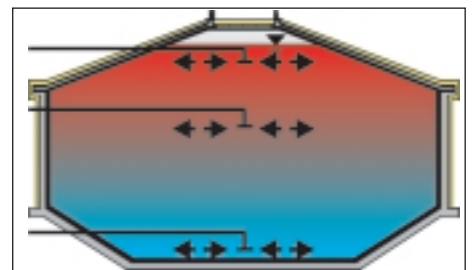
Als Kurzzeit-Wärmespeicher in Nahwärmanlagen werden derzeit ausschließlich Heißwasser-Wärmespeicher eingesetzt. Zur saisonalen Wärmespeicherung stehen weitere Konzepte zur Verfügung. Als Speichermedium kann neben Wasser der natürliche Untergrund bzw. eine Kombination von beidem verwendet werden. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt vor allem von den örtlichen Gegebenheiten, dem erforderlichen Volumen und insbesondere von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab. Zur Minimierung der Wärmeverluste benötigen die Speicher eine geeignete Geometrie, d.h. ein kleines Oberflächen-/Volumen-Verhältnis, sowie eine Wärmedämmung.



**8** Vakuumröhren-Kollektorfeld in Schwäbisch-Gmünd



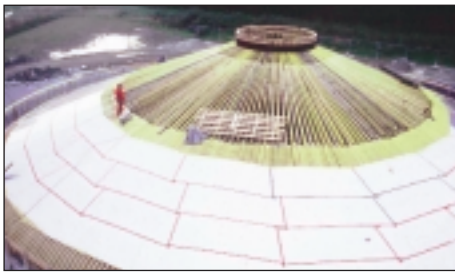
**9** Ein Sicherheitskonzept für große Kollektorfelder



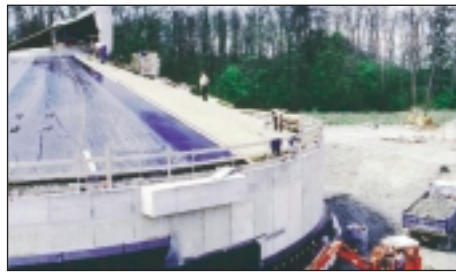
**10** Heißwasser-Wärmespeicher

### ■ Heißwasser-Wärmespeicher

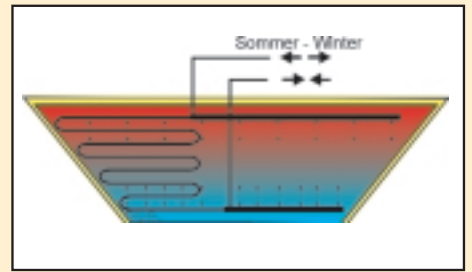
Die vielseitigsten Einsatzbereiche eröffnen sich dem Heißwasser-Wärmespeicher **10**. Er kann unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße, z.B. als Wärmespeicher für einen Zeitraum von Tagen bzw. Wochen, eingesetzt werden. Bei saisonalen Wärmespeichern wird der Behälter derzeit aus Stahlbeton hergestellt und teilweise ins Erdreich eingebaut, bzw. möglichst unauffällig in die Landschaft des Baugebiets integriert. Falls die Wasserdichtigkeit nicht durch spezielle Betonmischungen gewährleistet ist, muss eine zusätzliche Auskleidung des Speichers erfolgen **11**. Der Speicher wird drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95 °C betrieben. Da Kunststoff-Folien für Temperaturen über 80 °C in der Regel keine aus-



**11** Edeldstahlauskleidung als Schalung in Friedrichshafen (Lichtentel)



**12** Montage der Wärmedämmung in Friedrichshafen



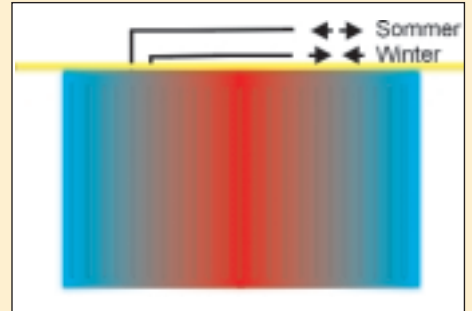
**13** Kies-Wasser-Wärmespeicher



**14** Verschweißen der Kunststoffolie in Steinfurt (Foto: PKI)



**15** Indirekte Ladewechseinrichtung in Steinfurt (Foto: PKI)



**16** Erdsonden-Wärmespeicher



**17** Doppel-U-Rohr-Sonde (Erdwärmesonde) mit Abstandshaltern und Injektionsschlauch

reichende Zeitstandfestigkeit aufweisen, wurden die ersten in Deutschland erstellten Speicher mit einer Auskleidung aus 1,2 mm starkem Edeldstahlblech ausgeführt. Am meist zylindrischen Tank wird eine außenliegende Wärmedämmung angebracht **12**, die mindestens den Bereich des Deckels und der Speicherwände umfasst und bei hinreichender Druckfestigkeit des Dämmwerkstoffs auch unter dem Speicher montiert wird. Als Dämmstoffe kommen je nach Temperaturbereich Glas- oder Mineralfaser, Schaumglas, Schaumglasschotter oder Blähglasgranulat zum Einsatz, die gegen Feuchtigkeit geschützt werden müssen.

In den Speichern sollte eine Temperaturschichtung vorherrschen, so dass der kältere untere Bereich nicht gedämmt werden muss, insbesondere wenn der Speicher ins Erdreich eingelassen ist. Die Ladewechseinrichtungen sind als Prallteller mit horizontal gerichteter Strömungsführung am Austritt ausgeführt, um eine Durchmischung des Speicherinhaltes zu verhindern. Sie sind mindestens oben und unten im Behälter anzubringen, zusätzlich auch in einer mittleren

Ebene, um unabhängig voneinander zeitgleiches Be- und Entladen auf unterschiedlichem Temperaturniveau zu ermöglichen. Eine Alternative zur beschriebenen Betonkonstruktion stellen neben Stahltragswerke aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) dar. Die Entwicklung dieses Konzepts wird seit 1995 an der Technischen Universität Ilmenau betrieben.

Der Aufbau des Tragwerkes besteht aus GFK-Verbundmaterialien, die Speichertemperaturen bis zu 95 °C zeitlich unbegrenzt zulassen. Die Wärmedämmung wird durch einen in das Tragwerk - zwischen Innen- und Aussenwand - integrierten PUR-Hartschaum realisiert. Hierdurch ist eine Durchfeuchtung der Wärmedämmung über die gesamte Betriebszeit des Speichers ausgeschlossen. Eine Aufheizphase ist durch die speziellen Materialeigenschaften nicht erforderlich. Das GFK-Konzept ist aus dreijährigen Betriebserfahrungen (Materialtests) mit einem Musterpeicher sowie dem ersten 300 m<sup>3</sup>-Pilotspeicher Schortetal entstanden. Mit dieser neuen Technologie wird insbesondere für den Bereich kleinerer Speichergrößen ein hohes Anwendungspotential erschlossen. Die Bau-reihenentwicklung wurde auf Speichervolumina von 50 bis 6.000 m<sup>3</sup> und Speichertemperaturen von 10 bis 95 °C ausgelegt.

#### ■ Kies-Wasser-Wärmespeicher

Insbesondere Erdbecken-Wärmespeicher sind eine kostengünstige Alternative zu den Behälterbauwerken. In eine Grube, die meist die Form eines Kegel- oder Pyramidenstumpfes bzw. eines Quaders hat **13**, wird eine wasserdichte Kunststoff-Abdichtungsbahn eingebracht (HD-PE oder PP). Die Seitenwände der Grube werden je nach Bodenfestigkeit geböschet, so dass sie von selbst standfest

sind. Bei diesen Speichern dient ein Gemisch aus Kies bzw. Erdreich und Wasser als Speichermedium. Die maximal erreichbaren Speichertemperaturen sind durch die Temperaturfestigkeit der Abdichtungsfolie **14** auf ca. 80 °C begrenzt. Vorteilhaft ist, dass im Vergleich zu einem Wasserspeicher keine tragende Deckenkonstruktion erforderlich ist. Die Speicher werden seitlich und oben wärmedämmt, je nach Speichervolumen und -tiefe auch an der Unterseite. Die Be- und Entladung der Speicher erfolgt bei kleineren Volumina in der Regel indirekt über eingelegte Kunststoff-Rohrschlangen **15**. Der Ladewechsel bei einem Kies-Wasser-Wärmespeicher kann auch mittels direktem Wasseraustausch erfolgen. Bei beiden Varianten ist darauf zu achten, dass die Temperaturschichtung im Speicher unterstützt wird. Bedingt durch den Kiesanteil von etwa 60 bis 70 Vol.% und der gegenüber Wasser geringeren Wärmekapazität des Kieses muss ein Kies-Wasser-Wärmespeicher gegenüber einem reinen Heißwasser-Wärmespeicher ein um etwa 50 % größeres Bauvolumen aufweisen, um die selbe Wärmemenge speichern zu können.

Beim Bau eines Kies-Wasser-Wärmespeichers ergeben sich gegenüber der Errichtung eines Heißwasser-Wärmespeichers Kostenvorteile, wenn am Speicherstandort Kies im Untergrund vorliegt, der ggf. in gereinigtem Zustand wieder als Speichermedium eingebaut werden kann. Ist dies nicht der Fall, kann alternativ zum Kies auch gewöhnliches Erdreich als Wärmespeichermedium verwendet werden. Dieses wird mit Wasser gesättigt, um die Wärmekapazität und bei indirekten Ladewechselsystemen den Wärmeübergangskoeffizienten zu erhöhen.

Der Erdreich-Wasser-Wärmespeicher kann von Aufbau und Funktionsweise mit dem nachfolgend beschriebenen Erdsonden-Wärmespeicher verglichen werden.

### ■ Erdsonden-Wärmespeicher

Als Speichermedium dienen das Erdreich bzw. die Gesteinsschichten im natürlichen Untergrund. Die Wärmeübertragung in den bzw. aus dem Untergrund erfolgt über U-Rohr-förmige oder koaxiale Wärmeübertragerröhre, meist aus Kunststoff (PE oder PB), die in senkrechte Bohrlöcher (Durchmesser 100 bis 200 mm) eingebracht werden ( 16 , 17 und 18 ). Der Zwischenraum zwischen dem Wärmeübertrager und der Bohrlochwand muss durch ein geeignetes Verfüllmaterial, z.B. eine Sand-Wasser-Zement-Bentonit-Mischung, ausgefüllt werden, um verschiedene geologische Horizonte zu trennen und die thermische Ankopplung der Erdwärmesonde an das Erdreich zu verbessern. Typische Bohrtiefen liegen zwischen 20 und 100 m, der Bohrlochabstand beträgt zwischen 1,5 und 3 m. Der Wärmetransport innerhalb des Speichers erfolgt durch Wärmeleitung, weshalb ein trägeres Betriebsverhalten gegenüber den anderen vorgestellten Speicherkonzepten vorliegt und Spitzenlasten bei der Erzeugung oder dem Bedarf über einen Pufferspeicher im System ausgeglichen werden müssen. Erdsonden-Wärmespeicher können nur zur Oberfläche hin mittels einer um einige Meter über den Speicherrand hinausragenden Wärmedämmung ausgestattet werden, weshalb die Wärmeverluste bei kleinen Speichervolumina (bis ca. 50.000 m<sup>3</sup>) auch im sogenannten eingeschwungenen Zustand bis zu 50% betragen können. Bei der Planung der Geometrie müssen die Speicherberandungsflächen möglichst klein gehalten werden. Es ist zu beachten, dass sich der Speichernutzungsgrad aufgrund der starken Wechselwirkungen mit dem umgebenden Untergrund erst allmählich erhöht: In den ersten fünf Betriebsjahren ist teilweise mit deutlich höheren Wärmeverlusten zu rechnen als später im eingeschwungenen Betriebszustand. Gut geeignete geologische Formationen für Erdsonden-Wärmespeicher sind wassergesättigte Tone bzw. Tongesteine. Diese weisen eine hohe Wärmekapazität auf, sind gleichzeitig jedoch sehr dicht und unterbinden somit mögliche Grundwasserbewegungen. Die Vorteile des Erdsonden-Wärmespeichers liegen im relativ geringen Bauaufwand und der einfachen Erweiterbarkeit. Durch die geringere Wärmekapa-

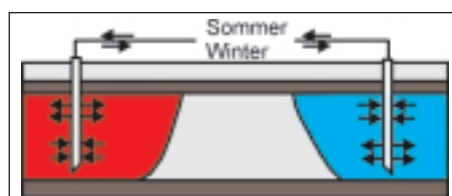


18 Installierte Erdwärmesonden in Neckarsulm

zität des Speichermediums gegenüber Wasser und aufgrund einer geringeren Temperaturspreizung im Betrieb müssen Wärmespeicher dieser Bauart im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern ein etwa drei- bis fünffach höheres Volumen besitzen.

### ■ Aquifer-Wärmespeicher

Bei einem Aquifer-Wärmespeicher werden natürlich vorkommende, abgeschlossene Grundwasserschichten zur Wärmespeicherung genutzt ( 19 ). Die Wärme wird über Brunnen in den Speicher eingebracht bzw. bei Umkehrung der Durchströmungsrichtung wieder entnommen. Es sind daher nur geringe Erdbewegungen notwendig ( 20 ). Oberflächennahe Aquifere sind häufig der Trinkwassernutzung vorbehalten. Daher liegen typische Tiefen geeigneter Schichten eher mindestens 100 m unter Geländeoberkante. Da eine Wärmedämmung des Speichers nicht möglich ist, ist ein Aquifer-Wärmespeicher auf hohem Temperaturniveau nur bei sehr großem Speichervolumen sinnvoll (minimal 100.000 m<sup>3</sup> erschlossenes Volumen). Bei Temperaturen über 50°C kann es je nach Beschaffenheit des vorliegenden Grundwasserleiters zu Veränderungen der Qualität kommen, die ohne geeignete Maßnahmen zu einem Erliegen der Förderung eines Brunnens führen kann. Jede Einleitung von Wasser in den Untergrund muss wasserrechtlich erlaubt oder bewilligt werden. Es darf keine Gefährdung für das Grundwasser bestehen. Die Normen des Deutschen Vereins für das Gas- und Wasserfach e.V. (DVGW) und das



19 Aquifer-Wärmespeicher

Heißwasser-Wärmespeicher	Kies-Wasser-Wärmespeicher	Erdsonden-Wärmespeicher	Aquifer-Wärmespeicher
<b>Speicheraufbau</b>			
Wärmegeädmmter, wassergefüllter, ins Erdreich eingegrabener oder ebenerdiger Behälter mit Tragwerkskonstruktion meist aus Stahlbeton oder GFK.	Wärmegeädmmtes, zum Erdreich hin mittels Kunststoffolie abgedichtetes Kies-Wasser-Gemisch.	Vertikale Doppel-U-Rohr-Sonden in wassergesättigtem Erdreich.	Verfilterte Brunnen in natürlich vorkommenden, möglichst nach oben und unten abgeschlossenen Grundwasserschichten.
<b>Anforderungen an den Standort</b>			
Gut stehender Boden, Bodenklasse II-III, möglichst kein Grundwasser, 5 bis 15m Tiefe. Bei ebenerdiger Anordnung keine Anforderungen an die Grundwassertiefe.	Gut stehender Boden, Bodenklasse II-III, möglichst kein Grundwasser, 5 bis 15m Tiefe.	Gut bohrbarer Boden, Bodenklasse I-III, Grundwasser günstig, geringe Durchlässigkeit ( $k_f < 10^{-10}$ m/s), geringe Fließgeschwindigkeit ( $< 1$ m/a), 30 bis 100 m tief.	Abgeschlossen nach oben und unten durch dichte Schicht, hohe Porosität, Grundwasser und hohe Durchlässigkeit ( $k_f > 10^{-4}$ m/s) notwendig; geringe Fließgeschw., 20 bis 50 m mächtig.
<b>Speichermedium</b>			
Wasser	Kies-Wasser-Gemisch	Formation im Untergrund	Wassergesättigte Formation im Untergrund
<b>Speicherkapazität</b>			
60 bis 80 kWh/m <sup>3</sup>	30 bis 50 kWh/m <sup>3</sup>	15 bis 30 kWh/m <sup>3</sup>	30 bis 40 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Speichervolumen für 1 m<sup>3</sup> Wasseräquivalent</b>			
1 m <sup>3</sup>	1,3 bis 2 m <sup>3</sup>	3 bis 5 m <sup>3</sup>	2 bis 3 m <sup>3</sup>
<b>Baukosten für einen Speicher mit 10.000 m<sup>3</sup> Wasseräquivalent, bezogen auf 1m<sup>3</sup> Wasseräquivalent (inkl. Planung, ohne MwSt.)</b>			
180 bis 220 DM/m <sup>3</sup>	160 bis 200 DM/m <sup>3</sup>	160 bis 200 DM/m <sup>3</sup>	140 bis 180 DM/m <sup>3</sup>
<b>Realisierte Projekte (Standort, Speichervolumen, Betrieb seit)</b>			
Rotthweil, 600 m <sup>3</sup> , '94 Hamburg, 4.500 m <sup>3</sup> , '96 Friedrichshafen, 12.000 m <sup>3</sup> , '96 Hannover, 2.750 m <sup>3</sup> , '00	Stuttgart, 1.050 m <sup>3</sup> , '85 Augsburg, 6.500 m <sup>3</sup> , '97 Steinfurt, 1.500 m <sup>3</sup> , '99 Chemnitz, 8.000 m <sup>3</sup> , '00	Neckarsulm 63.360 m <sup>3</sup> , '01 20.000 m <sup>3</sup> , '98, 4.300 m <sup>3</sup> , '97	Berlin, '99 Rostock, '00

## 21 Daten der unterschiedlichen Baukonzepte für Langzeit-Wärmespeicher



20 Bohrarbeiten in Rostock

Wasserhaushaltsgesetz des Bundes sind dabei einzuhalten. Innerhalb von Trinkwasserschutzgebieten können Aquifer-Wärmespeicher in der Regel nur in Zone III B (erweiterte Schutzzone) errichtet werden.

Auch für Aquifer-Wärmespeicher gilt, dass die Wärmeverluste in den ersten Betriebsjahren deutlich höher sind als im späteren quasistationären Betrieb. Von allen Speichertypen stellt der Aquifer-Wärmespeicher hinsichtlich den notwendigen hydrogeologischen Voraussetzungen die höchsten Ansprüche. Dazu gehört neben den abgrenzenden Bodenschichten eine hinreichende Durchlässigkeit im Inneren des Speichergebiets. Darüber hinaus ist eine geeignete chemische Wasserqualität erforderlich, so dass keine negativen Veränderungen aufgrund des Temperaturwechsels auftreten können (mine-

ralische Ausfällungen, Korrosion an Anlagenteilen, etc.). Dies muss ggf. durch eine Anlage zur Wasseraufbereitung sichergestellt werden. Aufgrund des direkten Austausches des Grundwassers bei hohem Temperaturniveau ist die Realisierung eines Aquifer-speichers nur bei ausreichender Entfernung von Trinkwassergewinnungsanlagen möglich. 21 fasst die wichtigsten Daten der unterschiedlichen Speichertypen zusammen. Für sämtliche Speichertypen, insbesondere Aquifer- und Erdsonden-Wärmespeicher, ist eine hydrogeologische Voruntersuchung des Speicherstandortes unbedingt erforderlich. Geklärt werden müssen die Schichtenabfolge, die Lage und Neigung des Grundwasserspiegels, die hydraulische Durchlässigkeit des Untergrunds, die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung des Grundwassers.

Die Auslegung für das Gesamtsystem sollte immer mit dynamisch rechnenden Simulationsprogrammen erfolgen. Grobe Richtwerte für einen solaren Deckungsanteil von rund 50% können 22 entnommen werden.

<b>Heißwasser-Wärmespeicher</b>	1,5 bis 2,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>FK</sub>
<b>Kies-Wasser-Wärmespeicher</b>	2,5 bis 4 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>FK</sub>
<b>Erdsonden-Wärmespeicher</b>	8 bis 10 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>FK</sub>
<b>Aquifer-Wärmespeicher</b>	4 bis 6 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>FK</sub>

22 Notwendiges Speichervolumen je m<sup>2</sup> Kollektorfläche für einen solaren Deckungsanteil von 50% (FK: Flachkollektor)

## Projektergebnisse und Erfahrungen

*Die realisierten Pilotanlagen bestätigen die technische Machbarkeit solarthermischer Langzeitwärmespeicherung. Die Erfahrungen aus Planung und Umsetzung der Projekte sollen zur Weiterentwicklung und Kostenreduzierung führen.*

phase eingespeichert werden muss, um den Wärmespeicher auf Betriebstemperatur zu bringen, die sogenannte "Anfangsinvestition". Die höchsten Speichertemperaturen lagen bei etwa 80 °C im oberen Speicherbereich. Die Aufheizung des Erdreichs, das den Wärmespeicher umgibt, ist nach etwa vier bis fünf Jahren abgeschlossen. Damit beginnt der quasistationäre Betrieb.

Eine große Abweichung gegenüber den vor-ausgerechneten Werten liegt bei den Speicherverlusten vor. Hier ist man von 200 MWh im dritten Betriebsjahr bei einem abfallenden Verlauf mit den Betriebsjahren ausgegangen. Wie die gemessenen Daten aus 27 zeigen, liegen die Verluste insgesamt deutlich über dem Wert der Planung. Die Ursache für diesen Umstand ist derzeit noch

### Projekte der ersten Generation

Die im Rahmen des Förderprogramms „Solarthermie-2000“, Teilprogramm 3 untersuchten Pilotanlagen mit saisonalem Wärmespeicher können in Anlagen der ersten Generation 23 und der zweiten Generation 33 eingeteilt werden. In den neueren Anlagen wurde insbesondere auf die Umsetzung von Niedertemperatur-Heiztechnik in den Gebäuden und niedrige Netzrücklauftemperaturen geachtet.

#### ■ Friedrichshafen: Erfahrungen mit einem großen Langzeit-Wärmespeicher

24 und 25 zeigen den Langzeit-Wärmespeicher in Friedrichshafen. Er ist mit einem Volumen von 12.000 m<sup>3</sup> Wasser der derzeit größte Langzeit-Wärmespeicher in Deutschland. Der in Ortbetonbauweise errichtete Wärmespeicher hat die Form eines Zylinders mit je einem Kegelstumpf im Decken- und Bodenbereich. Berücksichtigt wurde dabei die Optimierung der Speicheroberfläche, sowie die Kostensenkung durch Massenreduktion und durch Vermeidung von Aushub. Voraussetzung dazu ist, den Speicherdeckel über Geländeniveau herausragen zu lassen und mit Erdreich anzuschütten. Die Wärmedämmung besteht aus hochfester Mineralwolle an Wänden und Decke. An der Seitenwand weist sie eine Dicke von 20 cm auf, im Deckenbereich 30 cm. Im Inneren ist der Speicher mit einem 1,25 mm dicken Edelstahlblech ausgekleidet, um die nötige Was-

ser- und Dampfdiffusionsdichtigkeit zu gewährleisten.

Eine gute Temperaturschichtung im Friedrichshafener Wärmespeicher konnte in den ersten Betriebsjahren erreicht werden 26. Die niedrigste Temperatur nach dem ersten Speicherzyklus stellte sich Anfang März 1998 mit etwa 43 °C ein. Die Differenz zur Temperatur bei der Befüllung (11 °C) repräsentiert die Wärmemenge, die in der Aufheiz-

	Hamburg	Friedrichshafen	Neckarsulm II, 1. BA	Chemnitz, <sup>1</sup> 1. BA
Versorgungsgebiet	124 Einfamilienreihenhäuser	1. BA: 270 WE in MFH, im EA 570 WE	6 MFH, Schule, Altenwohnheim, Ladenzentrum	Bürogebäude
Betriebsbeginn	1996	1. BA: 1996, EA: 2001	1998	2000
Beheizte Wohn- bzw. Nutzfläche in m <sup>2</sup>	14.800	1. BA: 22.937, EA: 39.500	20.000	4.680
Solaranlage Absorberfläche in m <sup>2</sup>	3.000	1. BA: 2.700 EA: 5.600	2.700	540 VR
Speichertyp	Heißwasser	Heißwasser	Erdwärmesonden	Kies-Wasser
Speichervolumen in m <sup>3</sup>	4.500	12.000	20.000	8.000
Gesamtwärmebedarf ab Heizzentrale in MWh/a (mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)	1.610	1. BA: 2.250, EA: 4.106	1.663	1. BA: 573
Nutzwärmlieferung Solarsystem in MWh/a (mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)	789	1. BA: 644, EA: 1.915	832	1. BA: 169
Solarer Deckungsanteil in % (mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)	49	1. BA: 32, EA: 47	50	1. BA: 30
Kosten Solarsystem in Mio. DM	4,3	EA: 6,3	2,9	1. + 2. BA: 2,8
Solare Wärmekosten in Pf/kWh (ohne Förderung, ohne MWSt., inkl. Planung)	50	EA: 31	34	1. + 2. BA: 47

23 Technische Daten der Pilotanlagen der ersten Generation (MFH: Mehrfamilienhaus, WE: Wohneinheiten, BA: Bauabschnitt, EA: Endausbau, VR: Vakuumröhre, 1: Angaben TU Chemnitz)



nicht vollständig geklärt. Vermutet wird jedoch eine partielle Durchfeuchtung der Wärmedämmung, eine reduzierte Dämmwirkung sowie zusätzliche Wärmeverluste durch ungedämmte, um den Speicher angeordnete Revisionsschächte.

### ■ Hamburg: Kostensenkung durch Optimierung der Speicherform

In Hamburg-Bramfeld wurden große Kollektormodule in die Dächer der Reihenhäuser integriert (28), während in Friedrichshafen die Kollektoren größtenteils auf den Flachdächern der Mehrfamilienhäuser auf Unterkonstruktionen montiert sind.

Der Bau des Wärmespeichers in Hamburg wurde im März 1995 ausgeschrieben. Die eingereichten Angebote lagen um 50 bis 100 % über den vorausgegangenen Kostenschätzungen. Das günstigste Angebot war mit 2,25 Mio. DM ca. 600 TDM teurer als die Kostenschätzung des ITW vom September 1994.

In der Folge wurde die erste Ausschreibung aufgehoben und der Speicherentwurf nochmals überarbeitet. Dabei wurde insbesondere die Speicherform geändert, um Aushub und Betonmasse einzusparen. In Verhandlungen mit der Hamburger Umweltbehörde wurde erreicht, dass der Speicher entgegen der ursprünglichen Vorgabe 2 m über die ursprüngliche Geländeoberkante herausragen durfte. In der zweiten Ausschreibung wurden zwei Speichervarianten alternativ ausgeschrieben. In (29) ist die ursprüngliche Speicherform gegenüber der neuen Speichervariante gegenübergestellt. Die untere Variante aus (29) mit einem Volumen von 4.500 m<sup>3</sup> hat sich dabei als die kostengünstigste herausgestellt und wurde verwirklicht.

### ■ Neckarsulm: Stufenweiser Speicherausbau

Die Langzeit-Wärmespeicherung mit Erdwärmesonden direkt im Erdreich wurde in einem Vorprojekt erforscht. Der 1997 in Neckarsulm gebaute Pilotspeicher mit einem Volumen von ca. 4.300 m<sup>3</sup> bestätigte die Forschungsergebnisse. Der erste Bauabschnitt des Speichers (20.000 m<sup>3</sup>) wurde 1998 gebaut. Im Jahr 2001 wird der zweite Bauabschnitt des Wärmespeichers fertiggestellt. Das Volumen wird dann 63.000 m<sup>3</sup> betragen (siehe (30)). (31) zeigt ein Kollektordach auf der Grundschule in Neckarsulm.

Die Temperaturen im Speicher in den Jahren 1999 und 2000 sind in (32) dargestellt. Die blauen Linien zeigen Temperaturverläufe im Zentrum des Speichers der ersten Ausbaustufe, die rote Linie zeigt Temperaturen im Zentrum des ehemaligen Pilotspeichers (siehe (30)). Die Erdwärmesonden sind 30 Meter lang.

### Projekte der zweiten Generation

#### ■ Steinfurt: Wärmespeicherung und Niedertemperatur-Gebäudetechnik

Im August 1998 ging die Pilotanlage in Steinfurt-Borghorst in Betrieb. Sie wurde im Rahmen des Projektes „50 Solarsiedlungen in

Nordrhein-Westfalen“ errichtet und versorgt 42 Wohneinheiten in 11 Reihenhäusern, 4 Doppelhäusern und 7 Drei- bzw. Vierfamilienhäusern mit Wärme (34). Als Langzeit-Wärmespeicher kommt hier ein Kies-Wasser-Wärmespeicher zum Einsatz, der über Rohrschlangen indirekt be- bzw. entladen wird und für Betriebstemperaturen bis 90 °C ausgelegt ist.

Die Gebäude in Steinfurt sind mit Fußbodenheizungen ausgeführt, wodurch niedrige Betriebstemperaturen ermöglicht werden. Das Wärmeverteilnetz wird in der Heizzeit auf dem niedrigen Temperaturniveau der Heizungen betrieben, um die Netzverluste zu reduzieren und möglichst niedrige Netzrücklauftemperaturen zu erzielen. Sind zur Trinkwassererwärmung höhere Temperaturen erforderlich, so werden diese über Nachheizungen in den Gebäuden ermöglicht (35).

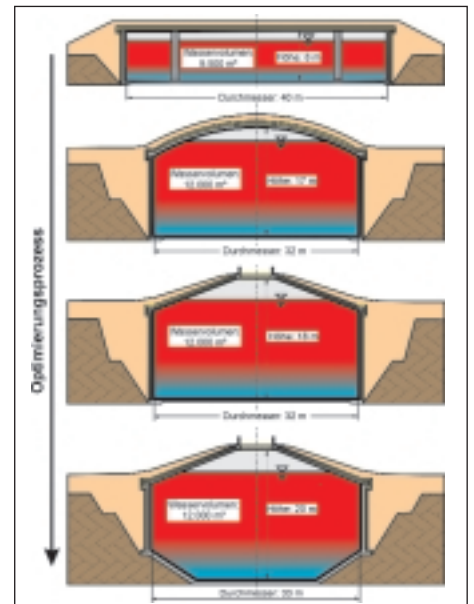
Der Kies-Wasser-Wärmespeicher besitzt die Form eines umgedrehten Pyramidenstumpfes. Es handelt sich um ein mit Kunststoffolie ausgekleidetes Erdbecken, das mit Kies gefüllt und mit Wasser geflutet wurde. Speicherboden, -wand und -decke sind mit Schaumglasplatten bzw. einem Schüttgut aus Blähglasgranulat wärmegeleitet. (14) und (15) zeigen den Speicher während der Bauphase. Zwischen die Kiesschichten wurden in 6 Ebenen Be- bzw. Entladerohre eingebracht. (36) zeigt die gemessene Wärmebilanz im Projekt Steinfurt aus dem Jahr 2000. Im Sommer wurde der Wärmebedarf vollständig von der Solaranlage gedeckt, der solare Deckungsanteil über das gesamte Jahr betrug 26%. Der für den langfristigen Betrieb berechnete Wert von 34% wurde damit noch nicht erreicht. Ursache waren erhöhte Wärmeverluste des Speichers wegen Durchfeuchtung der Wärmedämmung durch einen Ausfall im Drainagesystem im Juni 2000.

#### ■ Chemnitz: Notwendigkeit der Speicher-auslastung

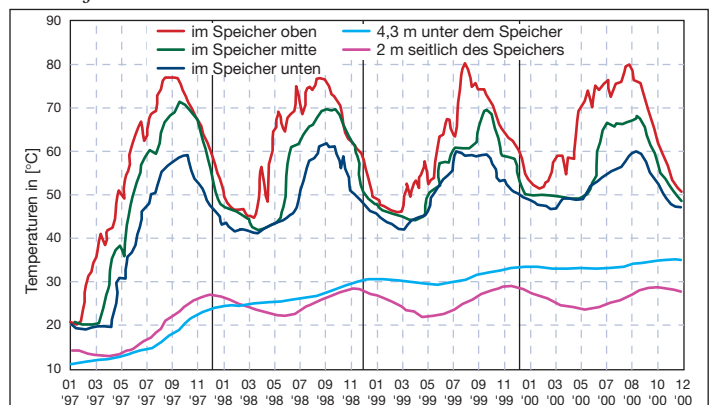
In Chemnitz wurde im Rahmen einer notwendigen Bodensanierung 1996 ein Kies-Wasser-Wärmespeicher gebaut, der für eine Maximaltemperatur von 85 °C ausgelegt ist und direkt be- und entladen wird. Der Speicher ist bei einem solaren Deckungsanteil von 42% im Endausbau für einen jährlichen Wärmebedarf von 1.200 MWh/a ausgelegt (Angaben TU Chemnitz). Bisher ist eine erste Ausbaustufe mit 540 m<sup>3</sup> Kollektorfläche zur Beheizung von zwei



24 Heißwasser-Wärmespeicher in Friedrichshafen



25 Entwicklungsstufen des Speicherentwurfs in Friedrichshafen



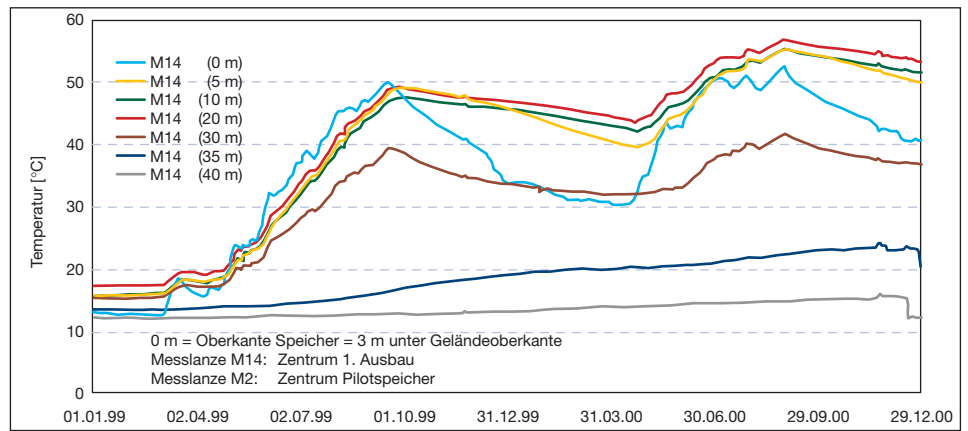
26 Temperaturen im Speicher in Friedrichshafen in den ersten vier Betriebsjahren

Jahr	1997	1998	1999	2000
Wärmelieferung in den Speicherkreis	1.080	946	880	944
Wärmelieferung aus dem Speicherkreis	475	620	478	611
Wärmeinhalt im Speicher (geg. 1.1.97)	343	344	386	359
Speicherkreisverluste	357	325	359	360

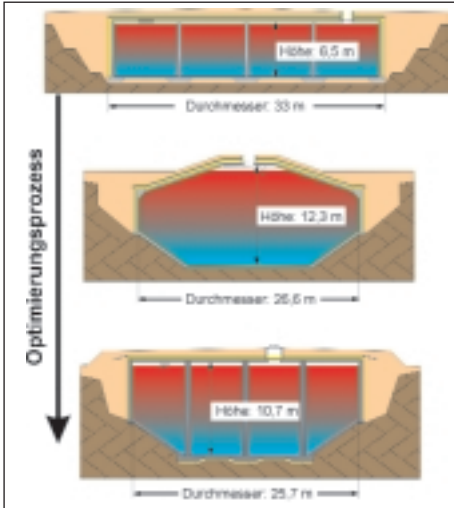
27 Gemessene Bilanz des Speichers in den ersten vier Betriebsjahren (in MWh)



28 Ansicht der Kollektorfelder in Hamburg



32 Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher Neckarsulm in den Jahren 1999 und 2000



29 Speichervarianten Projekt Hamburg

Gebäuden verwirklicht. Sie nutzt die zur Verfügung stehende Speicherkapazität nicht vollständig aus, da nur ein Teil der geplanten Kollektorfläche installiert ist. Im Zuge der weiteren Bebauung des Gewerbe- und Technologieparks Solaris wird die Integration zusätzlicher Kollektorflächen und Niedertemperatur-Verbraucher angestrebt. Die Projektgruppe "Solarthermie-2000" der TU Chemnitz führt die wissenschaftliche Begleitung, inkl. des umfangreichen Messprogramms, für das solar unterstützte Nahwärmesystem durch. Der Speicher <sup>37</sup> befindet sich ca. 3,5 m unter der Geländeoberkante und ist mit einer Straße überbaut. Er besitzt die Form eines Quaders mit den Abmessungen 58 m x 20 m x 7 m (Länge x Breite x Höhe). Die Baugrube musste aus geologischen und sicherheitstechnischen Gründen mit einem Berliner Verbau ausgeführt werden. Der Speicher ist seit Frühjahr 2000 in Betrieb.

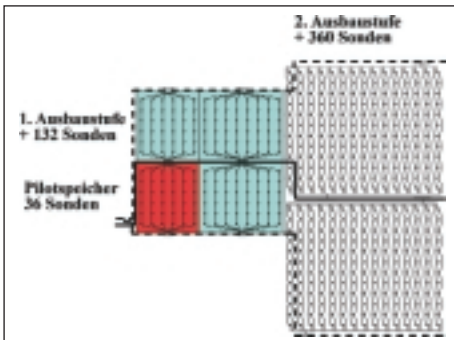
luste zu reduzieren und auf eine Wasseraufbereitung verzichten zu können, auf niedrigem Temperaturniveau betrieben (max. 50 °C). Zur Erhöhung der Speicherkapazität ist eine Wärmepumpe in die Wärmeversorgung integriert. Zur Wärmeverteilung wurde ein Niedertemperatur-Heizsystem (50/30 °C) mit Radiatoren realisiert. Dies gewährleistet niedrige Betriebstemperaturen und garantiert damit günstige Betriebsbedingungen für die Solaranlage und die Wärmepumpe.

■ **Hannover: Weiterentwicklung des Baustoffes**

Im neuen Hannoveraner Stadtteil Kronsberg befindet sich ein Wärmespeicher, der als eingegrabener Stahlbetonbehälter mit freitragendem Kegelstumpf-Schalendach ausgeführt wurde <sup>39</sup>. An Decke und Seitenwand kommt eine Wärmedämmung aus Blähglasgranulat zum Einsatz. Die Wasserdichtigkeit des Speichers wird bei diesem Speicher nicht über eine Edelstahl-Auskleidung sichergestellt, sondern durch die Betonwandung selbst. Es wird ein nahezu dampfdiffusionsdichter Hochleistungsbeton eingesetzt. Als Neuerung wurde eine zusätzliche, in der Höhe variable Beladetasse in mittlerer Speicherhöhe angebracht. Hiermit kann das Schichtungsverhalten im Speicher verbessert und ein gleichzeitiges Ein- und Ausspeichern ermöglicht werden. Die Anlage ging im Juni 2000 in Betrieb.

■ **Rostock: Wärmepumpen-Integration**

In Rostock <sup>38</sup> ging im Jahr 2000 die erste solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit einem Aquifer-Wärmespeicher in Betrieb. Die Anlage versorgt ein großes Mehrfamilien-Reihenhaus mit 108 Wohneinheiten. Der Aquifer befindet sich in einer Tiefe von ca. 15 bis 30 Metern und wird, um die Wärmever-



30 Schema des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm



31 Ansicht des Kollektorfeldes auf der Grundschule in Neckarsulm

	Steinfurt	Rostock <sup>1</sup>	Hannover <sup>2</sup>
Versorgungsgebiet	42 WE in 15 EFH u. 7 MFH	108 WE in MFH	106 WE
Betriebsbeginn	1999	2000	2000
Beheizte Wohn- bzw. Nutzfläche in m <sup>2</sup>	3.800	7.000	7.365
Solaranlage			
Absorberfläche in m <sup>2</sup>	510	1.000	1.350
Speichertyp	Kies-Wasser	Aquifer	Heißwasser
Speichervolumen in m <sup>3</sup>	1.500	20.000	2.750
Gesamtwärmebedarf ab Heizzentrale in MWh/a (mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)	325	497	694
Nutzwärmelieferung Solarsystem in MWh/a (mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)	110	307	269
Solarer Deckungsanteil in % (mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)	34	48	39
Kosten Solarsystem in Mio. DM	1,0	1,4	2,4
Solare Wärmekosten in Pf/kWh (ohne Förderung, ohne MWSt., inkl. Planung)	82,8	49,9	81

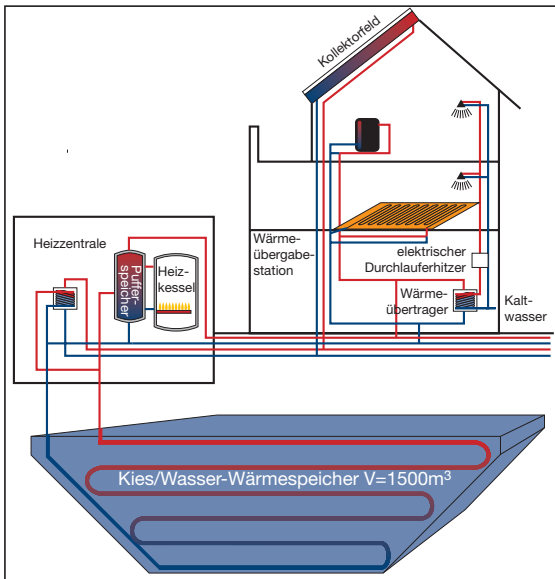
32 Technische Daten der Pilotanlagen der zweiten Generation. Die Werte für das Projekt Rostock wurden nicht mit TRNSYS berechnet). EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, WE: Wohneinheit, 1: Angaben GTN, Neubrandenburg; 2: Angaben IGS, TU Braunschweig

## Schlussfolgerungen

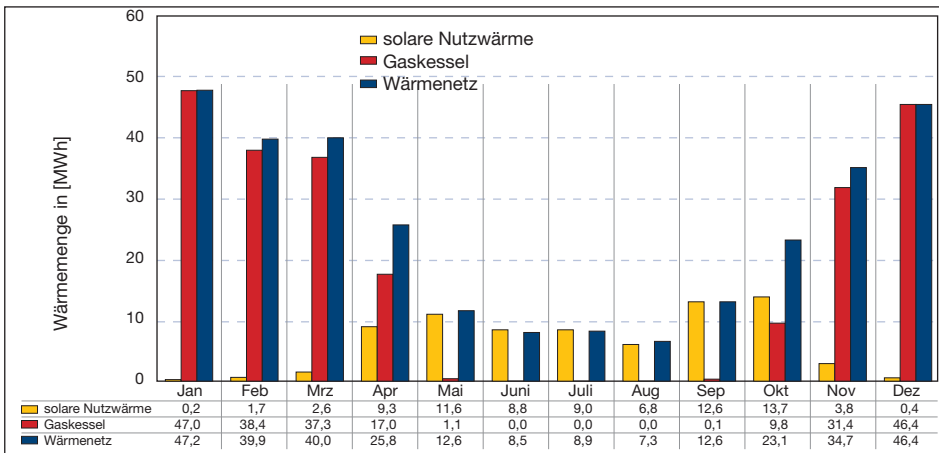
Eine hohe Effizienz des Solarsystems mit saisonalem Wärmespeicher kann nur mit einer Nahwärmenetz- und Gebäudetechnik erreicht werden, die sehr niedrige Netzrücklauftemperaturen ermöglicht. Ziel sollte hierbei sein, eine im Jahresdurchschnitt leistungsgewichtete Netzrücklauftemperatur von unter 35 °C zu erreichen. Die heutigen Pilotanlagen erreichen dies nur in Ausnahmefällen, da die Gebäudetechnik - Raumheizung und Trinkwassererwärmung - oder die Wärmeübergabestationen solch tiefe



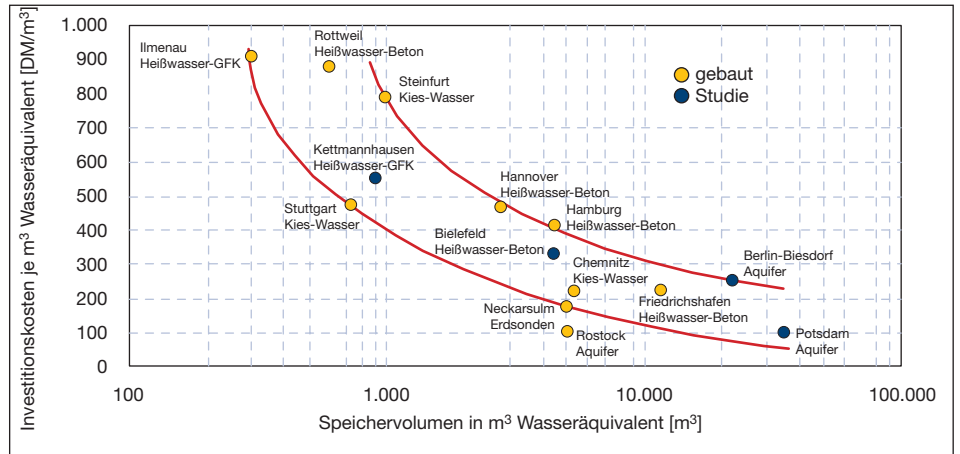
31 Luftaufnahme der Solarsiedlung in Steinfurt, der ersten realisierten Solarsiedlung in NRW (Foto: Gokell, Braunschweig)



35 Anlagenschema des Projekts in Steinfurt-Borghorst



36 Gemessene Wärmebilanz des Projekts Steinfurt im Jahr 2000 (IGS, TU Braunschweig)



40 Volumenbezogene Investitionskosten für Langzeit-Wärmespeicher (inkl. Planung)

Temperaturen nicht ermöglichen - selbst wenn sie dafür geplant wurden. Aus diesem Grund ist eine konsequente Umsetzung von Niedertemperatur-Gebäudetechnik mit beispielsweise Raumheizsystemen, die für eine Vorlauftemperatur von 45 °C und eine Rücklauftemperatur von 30 °C geplant sind, für neue Anlagen notwendig. Auch die Trinkwassererwärmung muss so ausgeführt werden, dass dauerhaft Netzrücklauftemperaturen über 40 °C durch die notwendige Erwärmung der Trinkwasserzirkulation verhindert werden. Hierzu können Durchlauferhitzer oder angepasste Speicherladensysteme verwendet werden. Neben der Weiterentwicklung einer praxisfähigen Niedertemperatur-Gebäudetechnik müssen die Bautechniken der saisonalen Wärmespeicher weiterentwickelt werden, um deren Baukosten reduzieren zu können. 40 zeigt die auf ein m³ Wasseräquivalent bezogenen Baukosten von Langzeit-Wärmespeichern. Die Investitionskosten (inkl. Planung) liegen für Wärmespeicher mit einem Volumen von über 10.000 m³ derzeit zwischen

150 und 200 DM pro m³ Wasseräquivalent. Da alle gebauten Speicher Pilotcharakter haben, sind deren Baukosten stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Insgesamt zeigt sich eine starke Kostenreduktion mit zunehmender Speichergröße. Somit sind solar unterstützte Nahwärmanlagen um so kostengünstiger, je größer die Siedlung ist, die versorgt werden soll.



37 Kies-Wasser-Wärmespeicher in Chemnitz im Bau (ZSW, Stuttgart)



38 Gebäude HELIOS in Rostock



39 Heißwasser-Wärmespeicher in Hannover (PKI, Stuttgart)

# Fazit und Ausblick

Die Erfahrungen aus den Pilotprojekten der solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher ergaben bislang solare Deckungsanteile von 30 bis 35%. Durch eine weitere Verbesserung der Systemtechnik können solare Deckungsanteile von 50 bis 60% erwartet werden.

Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit solar unterstützter Nahwärmesysteme ist notwendig; die solaren Nutzwärmekosten müssen weiter reduziert werden. Neben den Kosten ist vor allem die Effizienz des Gesamtsystems zu verbessern. Deshalb wird das Hauptziel der künftigen Entwicklungen im optimalen Zusammenwirken aller Einzelsysteme wie Solaranlage, Wärmespeicher und konventioneller Heiztechnik sowie deren Weiterentwicklung liegen. Diese Zielsetzung soll durch weitere Pilotprojekte für jedes der dargestellten Speicherkonzepte erreicht werden. Dabei bestehen keine Prioritäten für eines der vier Konzepte. Ausschlaggebend für die Wahl des Speichertyps sind die Gegebenheiten vor Ort. Im Rahmen von „Solarthermie-2000“ sind derzeit neben den sieben in Betrieb befindlichen Anlagen eine weitere in Bau und zwei in Planung. Darunter ist die Erprobung eines neuen Speichertyps in Attenkirchen zu nennen, der eine Kombination aus Heißwasser- und Erdsondenwärmespeicher darstellt (Hybrid-Speicher).

Hinsichtlich des Ziels, hohe solare Nutzwärmeerträge zu erreichen, liegt das größte Umsetzungsdefizit in der Niedertemperatur-

Gebäudetechnik vor. Nicht nur für diesen Bereich bedarf es deshalb eines integralen Planungsablaufs, der von stadtplanerischen Festlegungen bis zu Wohnungsheizung und Trinkwassererwärmung alle Systeme und Randbedingungen umfasst, die ein solar unterstütztes Nahwärmesystem mit Langzeit-Wärmespeicher beeinflussen. Weitere technische Konzepte, z.B. kombinierte Anwendungen mit Biomasse-Nutzung, sind in die Planungen einzubeziehen. Sie können im Einzelfall zwar eine geringere solare Deckung, dafür aber einen wirtschaftlich günstigeren Betrieb gewährleisten. Solche Systeme können den verbleibenden Anteil an fossiler Energie weiter reduzieren und sogar CO<sub>2</sub>-neutrale Wärmeversorgungen ermöglichen.

Durch große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung werden schon heute solare Nutzwärmekosten von rund 15-20 Pf/kWh erreicht. Anlagen mit saisonalen Wärmespeichern liegen noch weit darüber. Angestrebt werden in den nächsten Jahren solare Nutzwärmekosten, die ohne Förderung maximal doppelt so hoch sind wie die gegenwärtigen Kosten für konventionelle Nahwärmelösungen auf Basis fossiler Energieträger.

## Literaturverzeichnis

- [1] Peuser, F.A.; Croy, R.; Rehrmann, U. u.a.: Solare Trinkwassererwärmung mit Großanlagen. Praktische Erfahrungen. BINE-Informationspaket. Köln : TÜV-Verl., 1999. 167 S., ISBN 3-8249-0541-8
- [2] Hahne, E.: Solare Nahwärme. Ein Leitfaden für die Praxis. BINE-Informationspaket. Köln : TÜV-Verl., 1998. 120 S., ISBN 3-8249-0470-5
- [3] Guigas, M.; Kübler, R.; Lutz, A. u.a.: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeitwärmespeicher. Forschungsbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0328867C. Universität Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. 1995. 78 S. ISBN 3-9802243-9-2
- [4] Benner, M.; Mahler, B.; Mangold, D. u.a.: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher. Forschungsbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0329606C. Universität Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. 1999. 99 S. ISBN 3-9805274-0-9
- [5] Mangold, D.; Hahne E.: Technische Erfahrungen aus den solar unterstützten Nahwärmeeinrichtungen des Förderprogramms „Solarthermie-2000“. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.): Zehntes Symposium Thermische Solarenergie. 2000. S. 106-113. ISBN 3-934681-05-0

## Ergänzende Informationen

Weitere Informationen, Adressen und Links zum Thema sind bei BINE oder im Internet unter <http://bine.fiz-karlsruhe.de> (Service/InfoPlus) abrufbar.

## Projektorganisation

### Förderung der Vorhaben

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi),  
53123 Bonn

Projekträger Jülich (PTJ) des BMWi  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Volkmart Lottner  
52425 Jülich

### Projektadressen

Wissenschaftliche Programmbegleitung,  
„Solarthermie-2000“, Teilprogramm 3:  
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)  
Prof. Dr. Hans Müller-Steinhagen  
Dirk Mangold  
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart

Technische Universität Chemnitz  
Lehrstuhl Technische Thermodynamik  
Projektgruppe „Solarthermie-2000“  
Dr. Ulrich Schirmer, 09107 Chemnitz

Technische Universität Braunschweig  
Institut Gebäude- und Solartechnik (IGS)  
Prof. Dr. Norbert Fisch  
Mühlenpfordrstraße 23, 38106 Braunschweig

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Maschinenbau  
FG Thermo- und Fluidodynamik  
Jürgen Bühl, Postfach 10 05 65, 98684 Ilmenau

## Impressum

### ISSN

1436-2066

### Herausgeber

Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH,  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

### Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig mit vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares. Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung des jeweils Berechtigten.

### Autoren

Dirk Mangold, Martin Benner,  
Thomas Schmidt,  
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
(ITW, Universität Stuttgart)

### Redaktion

Uwe Friedrich

### Kontakt

Weitere Informationen zu diesem Thema erhalten Sie bei BINE. Wenden Sie sich an die untenstehende Adresse, wenn Sie vertiefende Informationen, spezielle Auskünfte, Adressen etc. benötigen, oder wenn Sie allgemeine Informationen zum energie- und umweltgerechten Planen und Bauen wünschen.



**BINE**

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Meckenstraße 57, 53129 Bonn  
Tel. 0228 / 9 23 79 0  
Fax 0228 / 9 23 79 29  
eMail [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: <http://www.bine.info>