

# Energiepfähle: Symbiose zwischen Statik und Energie: zukunftsweisendes System zur umweltschonenden Beheizung und Kühlung von Gebäuden

Autor(en): **Kapp, Hans / Kapp, Christoph**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **111 (1993)**

Heft 23

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78192>

## Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

**Literatur**

- [1] RAVEL: «RAVEL zahlt sich aus, ein praktischer Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen», EDMZ, Bestellnummer 724.397.42.01 d, Fr. 12.–
- [2] J. Marti: «Thermische Sonnenenergienutzung – eine Standortbestimmung», Fachartikel in «Heizung/Klima» Nr.7/91)

1990 und 2000, Abnahme des Verbrauchs nach 2000, zusätzliche 15% an Brennstoff sparen zugunsten der Treibstoffe

□ *erneuerbare Energien Wärme* (bezogen auf den fossilen Verbrauch): im Jahre 2000 zusätzlich 3% gegenüber 1990

□ *erneuerbare Energien Elektrizität*: im Jahre 2000 zusätzlich 0,5% gegenüber 1990.

Gegenwartig werden die Verbräuche im Ist- (Jahr 1990) und Sollzustand (Jahr 2000) ermittelt. Beim Sollzustand sind ebenfalls die in dieser Dekade geplanten Neubauten und der Mehrverbrauch durch «Mehrnutzung» (z.B. Ausbau der Informatik) zu berücksichtigen. Anschliessend wird das vorhandene Spar-

potential überprüft und die Kosten zur Zielerreichung ermittelt. Anhand dieser Zahlen und der gewährten finanziellen Mittel wird dann das definitive Ziel für das AFB bestimmt.

Zum Erreichen dieser Ziele wurde dem AFB bereits eine erste Tranche von 180 Mio. Fr. zugesprochen. Mit diesem Geld können unter anderem bei bestehenden Bauten alternative Wärmeerzeugungsanlagen und sogenannte Zusatzsysteme (z.B. Solaranlagen) realisiert werden. Bei Neubauvorhaben wird es möglich sein, die Zusatzkosten gegenüber einer konventionellen Lösung abzudecken.

Im übrigen haben Erhebungen gezeigt, dass in den letzten Jahren der fossile Verbrauch trotz wachsender Energiebezugsfläche (EBF) nicht mehr zugenommen hat, dies im Gegensatz zum Elektrizitätsverbrauch. Erfreulich ist auch, dass der Anteil erneuerbarer Energien im Bereich Wärme im «Startjahr», bezogen auf den fossilen Verbrauch, bereits 5,6% betrug.

**Fazit**

Alternative Wärmeerzeugungsanlagen erfordern gute Fachleute, eine seriöse

Planung und eine saubere Ausführung. Wichtig ist auch die Instruktion des späteren Bedienungspersonals. An dieses werden hohe Ansprüche gestellt. Dies ist bei der Anstellung und der späteren Aus- und Weiterbildung zu beachten. Klare, nachgeführte Revisionsunterlagen gehören auf jede Anlage. Es darf nicht vorkommen, dass nur der Ingenieur – als Vater der Anlage – die Anlage bauen und betreiben kann!

Es bleibt immer noch gültig, dass die nicht benötigte Wärmeenergie, trotz alternativen Wärmeerzeugungsanlagen, immer noch die günstigste Energie ist. Deshalb lautet die Devise nach wie vor:

- Wärmeverluste minimieren
- Wärmegewinne maximieren
- Abwärme nutzen
- Verteilverluste minimieren
- kleine Umwandlungsverluste anstreben
- erneuerbare Energien einsetzen
- Restwärmebedarf mit «übrigen» Energien abdecken.

Adresse des Verfassers: E. Ursenbacher, Ing HTL, Amt für Bundesbauten, Abteilung Haustechnik, Effingerstrasse 20, 3003 Bern.

**ASIC-Artikelreihe: Neuzeitliche Aufgaben**

## Energiepfähle: Symbiose zwischen Statik und Energie

Zukunftsweisendes System zur umweltschonenden Beheizung und Kühlung von Gebäuden

**Wenn Bauten aus statischen Gründen auf Pfähle fundiert werden müssen, können letztere ohne grosse Mehraufwendungen zur alternativen Energiegewinnung herangezogen werden. Durch die in den Pfählen verlegten Wärmetauscherrohre kann dem Untergrund Energie in Form von Wärme- oder Kälteleistung entzogen werden. Mit solchen «Energiepfählen» ist es grundsätzlich möglich, einzelne Gebäude oder ganze Überbauungen zu beheizen und/oder zu klimatisieren – ein für die Schweiz neues, in hohem Masse zukunftssträchtiges, wirtschaftlich interessantes und umweltfreundliches Verfahren.**

**System der Zukunft**

Die Idee der Nutzung von Erdwärme zur Energiegewinnung ist nicht neu; der Wärmeentzug aus dem Untergrund mittels Pfählen basiert auf demselben Prinzip wie die seit Jahren bewährte Erdwärmesonde. Neu an dieser Idee ist je-

doch der Ansatz, ohnehin aus fundationstechnischen Gründen erforderliche Pfähle so auszubilden und zu ergänzen, dass das Potential der Erdwärme im Untergrund entweder zu Heiz- und/oder zu Kühlzwecken mittels Wärmepumpen genutzt werden kann. Die Erkenntnis, dass zur Nutzung dieser Energie nicht unbedingt auf den bei Erdsonden übli-

chen Tiefenbereich von ca. 80-150 m zurückgegriffen werden muss, sondern dass hierfür im allgemeinen bereits her-

VON HANS KAPP, ST. GALLEN,  
UND CHRISTOPH KAPP,  
ZÜRICH

kömmliche Pfahllängen genügen, ist zwar nicht unbedingt revolutionär, wird jedoch mit Energiepfählen erstmals in die Praxis umgesetzt. Schon wenige Meter unter der Geländeoberfläche herrscht über das gesamte Jahr hinweg im Normalfall eine relativ konstante, von der Oberfläche weitgehend unabhängige Temperatur. Die Differenz zwischen dieser Erdoberflächentemperatur und der Verbrauchertemperatur ergibt das nutzbare Temperaturpotential  $\Delta t$  der Energiepfähle.

**Tragen-Heizen-Kühlen-Speichern**

Energiepfähle werden im benachbarten Ausland bereits seit einigen Jahren erfolgreich in der Praxis eingesetzt, und auch in der Schweiz sind vereinzelte Pi-

lotprojekte schon vor einiger Zeit lanciert worden. Aus unerklärlichen Gründen sind die damals gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aber wieder versiegt – erst, seitdem sich auch das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) unter dem Titel «Energie 2000» für das neue Verfahren interessiert, scheint es allmählich zum Durchbruch zu kommen.

Energiepfähle sind heute mit Ausnahme von Holzpfählen auf die meisten gängigen Pfahlsysteme anwendbar: Bei massiven Betonfertigpfählen wird das Wärmetauscher-Kunststoffrohrsystem zusammen mit der Armierung bereits im Werk eingebaut, bei Hohlpfählen im Hohlraum vor Ort, und bei Ortsbetonpfählen in einem an der Armierung befestigten Schutzrohr oder direkt am Armierungskorb. Die in den Kunststoffrohren zirkulierende Wärmetauscher-Flüssigkeit besteht im allgemeinen aus Wasser und Frostschutzmittel. Die aus dem umgebenden Erdreich gewonnene Energie wird durch die Wärmetauscher-Flüssigkeit zu einer Wärmepumpe gebracht und dort gleich wie bei herkömmlichen Erdsonden auf das gewünschte Temperaturniveau transformiert. Selbstverständlich darf die Rücklauftemperatur nicht wesentlich unter  $0^{\circ}\text{C}$  absinken, weil Gefriererscheinungen im Boden rund um den Pfahlmantel u.a. zu einer unzulässigen Verminderung der Mantelreibung und damit der Pfahltragfähigkeit führen können. Von der Wärmepumpe weg verläuft der Prozess gleich wie bei herkömmlichen Wärmepumpensystemen.

Sinngemäss kann der Kreislauf dann, wenn keine Wärme benötigt wird, d.h. vorwiegend im Sommer, auch umgekehrt ablaufen und auf diese Weise das Erdreich mit natürlicher Sonnenenergie, betrieblicher Abwärme und dgl. regeneriert werden. Damit wird einerseits Kühlleistung frei und andererseits Energie für Zeiten mit grösserem Wärmebedarf gespeichert. Energiepfähle können demzufolge ebenfalls zu Kühlzwecken genutzt werden und liefern in diesem Fall die Kälteleistung für eine Klimaanlage, unter Umständen sogar genügend Kälte für den Betrieb einer Klimaanlage im «free-cooling»-Verfahren.

Energiepfähle stehen selbstredend überall dort im Vordergrund, wo Neubauten aufgrund schlechter Baugrundverhältnisse ohnehin auf Pfähle fundiert werden müssen. Da die Mehrkosten für die Ausstattung der Pfähle mit Wärmetauschersonden inklusive Verbindungen und Zuleitungen zur Wärmepumpe relativ niedrig sind, stellen Energiepfähle aus wirtschaftlicher Sicht eine äusserst interessante Art der Energiegewinnung dar.

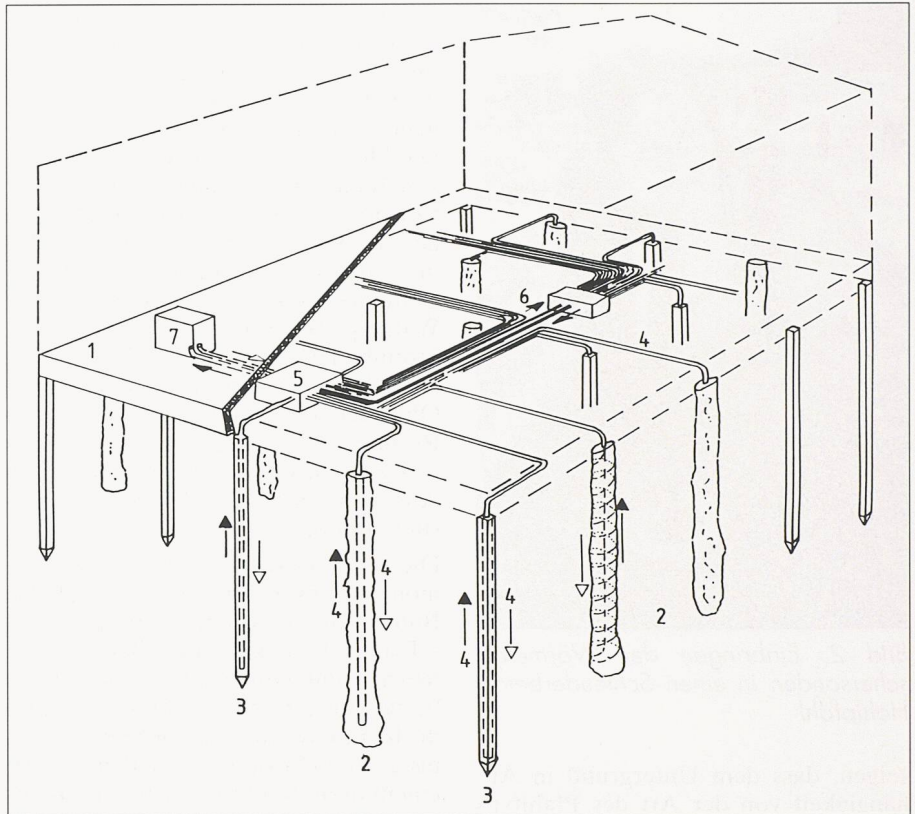


Bild 1. Schematische Darstellung einer Energiepfahl-Anlage mit verschiedenen Pfahltypen: 1 – Bodenplatte, 2 – Ortsbetonpfahl, 3 – Fertigbetonpfahl, 4 – Wärme- und Kühlkreisläufe, 5 – Verteilerkasten, 6 – Wärmepumpe

Wie oben erwähnt, kommen – mit Ausnahme von Holzpfählen und einzelner spezieller Pfahltypen – praktisch sämtliche gängigen Pfahlsysteme als Energiepfähle in Betracht (s. Bild 1). Im Falle der Fertigbetonpfähle müssen sogenannte Hohlpfähle von den Massivpfählen unterschieden werden. Die Pfähle werden entweder bereits im Werk oder erst am Bau derart mit den Wärmetauscherrohren bestückt, dass diese zumindest einen Teil (massive gekuppelte Betonfertigpfähle), bevorzugt jedoch die gesamte zur Verfügung stehende Pfahllänge bestreichen. Die Anordnung der Leitungen im Pfahlinnern ist abhängig von verschiedenen Faktoren: Gewünschte Energiemenge, Pfahltyp, Pfahldurchmesser, Armierungsgrad, geologische Verhältnisse, statische Aspekte sowie Materialkennwerte müssen für eine optimale Dimensionierung mitberücksichtigt werden. Im Normalfall werden pro Pfahl mehrere Schlaufen bzw. Kreisläufe eingebracht, um einen möglichst hohen Temperaturgradienten zu erreichen. Selbstverständlich ist es unerlässlich, dass die Besonderheiten eines Energiepfahlsystems möglichst frühzeitig mit dem zuständigen Statiker und dem beauftragten Heizungsingenieur abgesprochen werden, ein Optimierungsprozess, der unter Umständen sogar zur Wahl eines anderen (energiepfahlgerechteren) Pfahlsystems als ursprünglich vorgesehen, führen kann.

Nach Beendigung der Pfählungsarbeiten werden die Wärmetauscherleitungen am Pfahlkopf herausgeführt und in Absprache mit der Bauleitung entweder im Planum oder in der Bodenplatte verlegt. Je nach Grundriss der zu bestückenden Fläche werden die Leitungen in Serie- und/oder Parallelschaltung in einem oder mehreren Verteilerkästen zusammengeführt. Letztere erlauben eine genaue Regulierung durch individuell zu- und abschaltbare Kreisläufe. Von den Verteilerkästen gelangt die Wärmetauscherflüssigkeit via Sammelleitungen zur Wärmepumpe, wo die Energie auf das gewünschte Niveau transformiert wird. Da in den Wärmetauscherrohren ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel zirkuliert, besteht keine Gefahr einer Beeinträchtigung oder Verschmutzung des Grundwassers durch allenfalls leck gewordene Kreisläufe. Erfahrungen zeigen zudem, dass die Lebenserwartung derartiger Wärmetauscherrohre sehr hoch ist, so dass nicht mit einem Versagen aufgrund von Materialermüdungen zu rechnen ist. Ausserhalb von Gebieten, welche direkt der Grundwassernutzung dienen, werden die behördlichen Bewilligungen für den Betrieb einer Energiepfahlanlage deshalb im allgemeinen ohne nennenswerte Vorbehalte erteilt.

Die heute vorliegenden Resultate aus Versuchen über mehrere Jahre hinweg

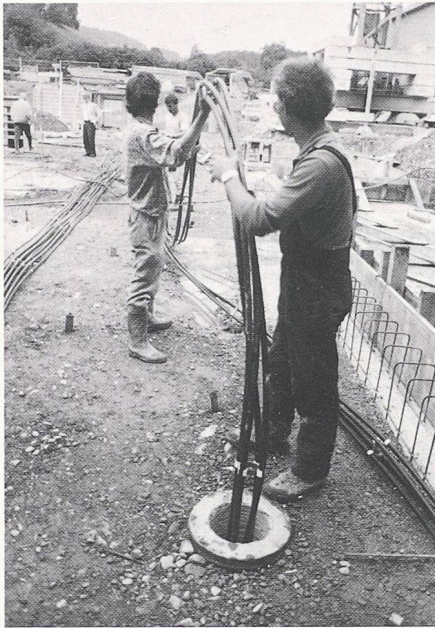


Bild 2. Einbringen der Wärmetauschersonden in einen Schleuderbeton-Hohlpfahl

zeigen, dass dem Untergrund in Abhängigkeit von der Art des Pfahltyps sowie der geologischen und hydrologischen Verhältnisse auch schon bei den für Pfahlgründungen üblichen, relativ geringen Tiefen wirtschaftlich interessante Mengen an Energie entnommen oder zugeführt bzw. gespeichert werden können, die durchaus im Bereich der spezifischen Leistung herkömmlicher Erdsonden-Felder liegen.

### Wirtschaftlich interessant

Energiepfähle können entweder zu Kühlzwecken, zur Wärmegewinnung oder als Kombination dieser beiden Varianten ausgelegt werden. Die für das Einbringen und Verlegen der Wärmetauscher-Röhrchen anfallenden Kosten sind relativ gering; sie belaufen sich aufgrund bisheriger Erfahrungen auf ca. 15-25% der «Ohnehin-Pfahlungskosten», machen jedoch nur 40-50% der für Erdsondenbohrungen im allgemeinen zu veranschlagenden Kosten aus.

Die weiteren Vorteile ökologischer und wirtschaftlicher Art sind dieselben wie bei anderen alternativen Energiesystemen; sie lassen sich im wesentlichen unter den Stichworten «Verzicht auf nicht-erneuerbare, umweltbelastende Energieträger» und «geringe Betriebskosten» zusammenfassen.

### Pilotanlagen und Demonstrationsobjekte

Um konkretere Aussagen über das Langzeitverhalten von Energiepfahlanlagen machen zu können, werden zurzeit verschiedene Pilotprojekte mess-

technisch überwacht. Durch computer-gestützte Aufzeichnung und Auswertung der interessierenden Daten wird die Funktionstüchtigkeit in Betrieb stehender Energiepfahlsysteme überprüft. Die Messungen geben Aufschluss über den Temperaturverlauf im Untergrund bzw. im Energieträgermedium, über die dem Boden effektiv entziehbaren oder in diesen rückführbaren Energiemengen, über die Funktionalität der Wärmepumpen in Abhängigkeit des Strombedarfs sowie über die Wirkung eigentlicher, grossflächiger Pfahlfelder. Obwohl bereits heute sehr ermutigende Resultate vorliegen, können zum jetzigen Zeitpunkt noch keine definitiven Angaben bezüglich effektiver, langfristiger Energieleistung gemacht werden.

Die oben erwähnten Pilot- und Demonstrationsobjekte werden durch das Bundesamt für Energiewirtschaft und z.T. auch durch kantonale Behörden finanziell unterstützt und gefördert. Es besteht die Absicht, die Messdaten und die hieraus resultierenden Neuerkenntnisse zu publizieren und damit auch einem breiteren Interessentenkreis zugänglich zu machen. Die zukünftige Planung und Dimensionierung von Energiepfahlanlagen wird von diesen praktischen Erfahrungen auf jeden Fall profitieren. Insbesondere interessiert in diesem Zusammenhang z.B. die Frage, ob die Pfähle im Innern eines Pfahlfeldes überhaupt zur Energienutzung in Betracht kommen, oder ob sie durch die feldäusseren Pfahlreihen energetisch abgeschirmt werden.

### Bisherige Erfahrungen

Obwohl die praktische Baustellen-Erfahrung zurzeit noch nicht sehr gross ist, lassen sich doch schon erste und wichtige Erkenntnisse festhalten:

□ Das Gespräch zwischen dem Statiker, dem Heizungsingenieur und dem Energiepfahl-Projektanten ist in einem möglichst frühen Planungsstadium zu suchen. Nur so kann eine optimale Synthese zweier an sich unterschiedlicher Zweckbestimmungen ein und desselben Systems erreicht werden.

□ Der Teil «Energiepfähle» einer Pfahlgründung muss ebenso sorgfältig geplant und submittiert werden wie die Pfählung als solche.

□ Für den Einbau und das Verlegen der Wärmetauscher-Röhrchen vor Ort kommen nur ausgewiesene Spezialisten in Betracht.

□ Unterschiedliche Pfahlsysteme eignen sich nicht in gleicher Weise als Energiepfähle:

Bei massiven, gekuppelten Betonfertigpfählen kann üblicherweise nur das

oberste Segment mit Wärmetauscher-Röhrchen bestückt werden, weil sich letztere nicht durch die Kupplungen hindurchführen lassen. Negativ wirkt sich auch aus, dass bei «stehenden» Pfählen die Köpfe im allgemeinen nicht einheitlich auf ein konstantes Sollniveau gerammt werden können, was dann eine relativ aufwendige Konfektionierung der Röhrchen nach dem Abspitzen der Pfahlköpfe erfordert.

Fertigbeton-Hohlpfähle haben den Vorteil, dass die Wärmetauscher-Röhrchen (abgesehen von der massiven Spitze) im allgemeinen ohne nachträgliche Konfektionierung auf die gesamte Pfahllänge verlegt werden können, was die Energiebilanz natürlich wesentlich verbessert. Hingegen ist besonders darauf zu achten, dass der Hohlraum auch wirklich hohl und röhrchendurchgängig ist; «vergessene» Zementrückstände, Holzreste oder andere in den Hohlraum gefallene Gegenstände können letzteres unter Umständen verunmöglichen und müssen dann mühsam herausgebohrt werden.

Bei Ortsbetonpfählen wird das Rohrsystem meist in einem an der Armierung befestigten Hüllrohr eingebracht, was i.a. auf der gesamten Pfahllänge möglich ist. Bei entsprechender Wahl der Wärmetauscherrohre können letztere auch direkt an der Armierung befestigt und bis zum Pfahlfuss hinuntergeführt werden (siehe Bild 2).

Grundsätzlich gilt, dass sich Energiepfähle in ihrer Funktionsweise ähnlich verhalten wie Erdsonden. Die bei letzteren bereits vorhandenen Erfahrungen lassen sich sinngemäss auch auf Energiepfähle übertragen. Dies bedeutet u.a., dass sich zu nahe beieinander stehende Erdsonden und Pfähle mittel- und langfristig im Sinne abnehmender Energieleistung gegenseitig beeinflussen können. Der Grad dieser Beeinflussung ist u.a. auch abhängig von den hydrogeologischen Gegebenheiten (fliessendes oder stagnierendes oder kein Grundwasser). Solange hierzu noch keine umfassenden Erfahrungswerte vorhanden sind, ist es deshalb in den meisten Fällen angezeigt, das langfristige Funktionieren einer Energiepfahlanlage durch Regenerierung im Sommerhalbjahr oder mittels Abwärmenutzung sicherzustellen (sogenannte Energiepfahl-Speicheranlage), was meist ohne grossen Mehraufwand möglich ist.

### Optimistischer Ausblick

Obwohl Energiepfähle in der Schweiz erst seit kurzem am Markt angeboten werden, ist das Interesse sowohl bei Behörden als auch bei privaten und

öffentlichrechtlichen Bauherren beträchtlich. Offensichtlich ist die Bereitschaft vorhanden, «etwas für den Umweltschutz zu tun», wenn das Kosten/Nutzen-Verhältnis stimmt. Im Falle der Energiepfähle fasziniert natürlich in erster Linie der *Ausblick, dass Pfähle, die ja sonst nur Mehrkosten verursachen, für noch etwas mehr Geld als wirtschaftlich höchst interessanter und umweltschonender Energieträger genutzt werden können*. Dass derartige alternative Energiesysteme auch weit-

gehende Unabhängigkeit gegenüber wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen im Ausland mit sich bringen, ist ein anderer nicht zu unterschätzender Faktor. Der Ausblick auf weitere Nutzungsmöglichkeiten ist ebenfalls vielversprechend; so lassen sich z.B. glatteisgefährdete Brücken und Lehnviadukte, wenn sie auf Pfählen fundiert sind, oft ohne Zwischenschaltung einer Wärmepumpe und damit zu minimalsten Betriebskosten, soweit beheizen, dass die Frostgefahr bei durch-

schnittlichen Minustemperaturen auch ohne Tausalz weitgehend eliminiert werden kann. Andere Anwendungsmöglichkeiten werden zurzeit untersucht – innovative Phantasie ist gefragt.

Adressen der Verfasser: *Hans Kapp*, Dr. geol. ASIC/SIA, Grundbauberatung AG, Helvetiastrasse 41, 9000 St. Gallen, und *Christoph Kapp*, dipl. geol., Dr. sc. nat. ETH-Z, NEK-Umwelttechnik AG, Clausiusstrasse 41, Postfach, 8033 Zürich.

## Latentwärme-Speicher

Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung mit Hilfe von Phasenwechsel-Materialien

**«Sonnenstrahlung hätten wir genug – leider zum falschen Zeitpunkt». Der Schlüssel zu einer effizienten Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung liegt deshalb in der Speicherung von Wärmeenergie. Wechselt ein Stoff seinen Aggregatzustand – z.B. von fest auf flüssig –, nimmt er viel Wärme auf bzw. gibt sie beim Erstarren wieder ab. Durch die Wahl eines Stoffs mit grosser Schmelzwärme und günstig liegender Schmelztemperatur kann Wärmeenergie mit hoher Dichte verlustarm gespeichert werden.**

### Warum Wärmespeicherung?

Die jährliche Sonneneinstrahlung auf 1 m<sup>2</sup> horizontale Fläche der Stadt Zürich beträgt 4156 MJ. Nach SIA 380/1 (Grenzwert) beträgt der maximal zulässige Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser von neuen Mehrfamilienhäusern nur noch 400 MJ pro m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche und Jahr. Weil jedoch Angebot und Nachfrage zeitlich schlecht übereinstimmen, muss Energie gespeichert werden. Im Bereich der thermischen Sonnenenergie-Nutzung unterscheiden wir drei Fälle:

- ☐ Angebot am Tag/Bedarf auch in der Nacht
- ☐ Angebot während Schönwetterperiode/Bedarf vorwiegend während Schlechtwetterperiode
- ☐ Angebot hauptsächlich im Sommer/Bedarf im Winter (Bild 1).

### Speicherarten, insbesondere Latentwärme-Speicher

Am geeignetsten erscheint uns eine Einteilung der verschiedenen Speicher nach dem physikalischen Prinzip der Speicherung (Bild 2).

Um Wärme speichern zu können, wird ein Speichermedium als Wärmeträger benötigt. Am gebräuchlichsten sind die

VON HEINRICH MANZ UND  
PETER W. EGOLF,  
DÜBENDORF

*sensiblen Speicher:* Das Speichermedium bleibt in sämtlichen Systemzuständen im gleichen Aggregatzustand. Meistens handelt es sich um einen Festkörper oder eine Flüssigkeit, da deren spezifische Wärmekapazitäten grösser sind als die der entsprechenden Gasphase. Kleinere Ausdehnungskoeffizienten im festen und flüssigen Zustand sind ebenfalls ein Vorteil. In solchen Speichern geht mit einer Wärmeaufnahme eine monotone Temperaturerhöhung einher. Die gespeicherte Wärmeenergie beträgt:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT \quad (1)$$

Die Grösse  $m$  bezeichnet die Masse des Speichermediums,  $c_p$  dessen spezifische Wärmekapazität.  $T_i$  und  $T_f$  sind die Temperaturen im Anfangs- (initial) und Endzustand (final).

### Formelzeichen

|                                                                                                     |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $a$ : Temperaturleitzahl                                                                            | [m <sup>2</sup> /s]  |
| $h$ : Spezifische Enthalpie                                                                         | [J/kg]               |
| $h_m$ : Spez. Schmelzenthalpie                                                                      | [J/kg]               |
| $T$ : Temperatur                                                                                    | [°C oder K]          |
| $\dot{Q}$ : Wärmefluss durch Leitung                                                                | [W/m <sup>2</sup> ]  |
| $\dot{Q}'$ : Energiefluss in das Speichermedium (zum Beispiel durch Absorption von Sonnenstrahlung) | [W/m <sup>2</sup> ]  |
| $t$ : Zeit                                                                                          | [s]                  |
| $\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit                                                                      | [W/m K]              |
| $\rho$ : Dichte                                                                                     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $c_p$ : spezifische Wärmekapazität                                                                  | [J/kg K]             |

Die *Latentwärme-Speicher* ändern bei Erreichung der Temperatur  $T_m$  auch die Phase (Bild 3). Der Phasenwechsel ist mit einer zusätzlichen Energieaufnahme, resp. -abgabe verbunden, die in der folgenden Gleichung durch den zweiten Term beschrieben wird:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot h_m + \int_{T_m}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT \quad (2)$$

Die latente Wärmeaufnahme  $m \cdot h_m$  ist in den meisten Fällen viel grösser als die gespeicherten sensiblen Wärmemengen. Daher können mit diesen Speichern höhere Energiedichten erzielt werden.

*Chemische Speicher* erreichen sehr hohe Energiedichten durch das Aufspalten und Neuordnen von molekularen Bindungen in einem umkehrbaren chemischen Prozess. Zudem bieten sie den Vorteil, bei Zimmertemperatur verlustfrei Energie speichern zu können. In der Anwendung sind solche Speicher aber schwieriger zu handhaben als die ersten beiden Speicherarten.

Wärme-Speicher lassen sich aber auch nach anderen Kriterien einteilen: