

**Schlüsselwörter:**

Thermische Energiespeicher · Kältespeicher

Kältespeicher bieten viele Vorteile im energetischen, ökonomischen und ökologischen Bereich [1–4], jedoch spielt die Kältespeicherung für die Gebäudeklimatisierung und Technikkühlung in Deutschland zur Zeit noch eine geringe Rolle. Kältespeicher sind hierzulande fast ausschließlich im kleinen Leistungsbereich zu finden. Aus technischer Sicht existieren aber viele geeignete Speicherstoffe und Speicherkonstruktionen sowie -verfahren. Dies zeigte eine systematische und umfassende Auswertung der Literatur. Die Ergebnisse sollen hier zusammengefasst dargestellt werden.

**Review of cold storages technology****Keywords:**

Thermal energy storage · cold storage

Thermal energy storages on low temperature level (so called "cold storages") have many advantages in the fields of energy, economy and ecology. At present cold storages are insignificant for air-conditioning and technical cooling in Germany. These storages will apply at the most in the low power range. From the technical point of view many storage materials, technologies and constructions are well known. A systematic and extensive study of literature was carried out. The results of this study are summarized in the article.

**Autoren**

Dr.-Ing. Thorsten Urbaneck  
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Platzer  
Dr.-Ing. Ulrich Schirmer

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Chemnitz;

Dipl.-Ing. Uwe Barthel  
Dipl.-Ing. Ulf Uhlig  
Dipl.-Ing. Dieter Zimmermann  
Dipl.-Ing. Thomas Göschel  
Stadtwerke Chemnitz AG, Chemnitz

# Review zur Kältespeichertechnik

## 1 Einleitung

Die Komplexität der Kältespeichertechnik wird zum einen durch die hohe Anzahl von potenziellen Speicherstoffen mit z.T. sehr speziellen Eigenschaften in Verbindung mit physikalischen Vorgängen und chemischen Reaktionen geprägt<sup>1</sup>. Zu unterscheiden sind beabsichtigte Phänomene (z.B. Nutzung des Phasenwechsels) und nicht beabsichtigte Phänomene (z.B. Korrosion). Hinzu kommen die System-Speicherkopplung und die resultierenden Konstruktionen, die erhebliche Auswirkungen auf die Effizienz, Betriebsweise, Kosten usw. haben. Des Weiteren stehen einige Exergiequellen zur Verfügung (z.B. Kältemaschinen, Zustand der Atmosphäre oder der oberflächennahen Erdschichten bzw. Gewässer im Winter), die für die Speicherbeladung relevant sind. Als Exergiesenken sollen vorwiegend die Gebäudeklimatisierung und die Kühlung der technischen Gebäudeausrüstung betrachtet werden. Deswegen liegt der Schwerpunkt in diesem Artikel bei Speichern mit Temperaturen von  $-10$  bis  $20$  °C.

## 2 Motivation zur Kältespeicherung

Wie auch bei den sog. Wärmespeichern sind die meisten Kältespeicher Kurzzeit-Speicher. Die Beladung erfolgt vorwiegend durch Kältemaschinen. Folgende Vorteile sind typisch:

### energetisch

- Abbau der elektrischen Lastspitze in der tagsüber auftretenden Hochlastzeit
  - Reduktion der bereitzustellenden elektrischen Anschluss- und Kältemaschinenleistung
  - ggf. geringere vorzuhaltende Kraftwerksleistung
  - Reduktion des Einkaufs von Strom in der Hochlastzeit (aus Sicht des Energieversorgungsunternehmens)
- stärkere Verlagerung des Kältemaschinenbetriebes in die Nachtzeit (Speicherbeladung, abhängig vom Konzept)
  - Nutzung von preiswerten Nachtstromüberschüssen<sup>2</sup> (aus Sicht der Verbraucher)
  - wärmetechnisch günstigerer Nachtbetrieb der Kühltürme
- Betrieb der Kältemaschinen am Auslegungspunkt, bessere Wirkungs- und Nutzungsgrade<sup>3</sup> (starke Reduktion des Teillastbetriebes), hohe Auslastung der Kältemaschinen

- in der Regel hohe Gesamteffizienz wegen der Kurzzeit-Speicherung mit geringen Verlusten

### ökonomisch

- Investitionskosten: Systemlösung mit Speicher oftmals günstiger als der Einsatz von schwach ausgelasteten Kompressionskältemaschinen zur Spitzenlastdeckung
- verbrauchsgebundene Kosten: Nutzung der Differenz zwischen Hoch- und Niedertarifen

### technisch

- sehr flexible Betriebsweisen der Systeme
- auch nachträglich nachrüstbar, u.U. modular
- in der Regel keine hohen Anforderungen an die Technik im Bestand
- viele Kleinspeichertypen international am Markt vorhanden, ideale Anpassung an das System möglich
- höhere Versorgungssicherheit in Zeiten ohne Spitzenlast<sup>4</sup>
- Speicher als z.B. hydraulische Weiche ideal für Systembetriebsweise

Bei der Langzeit-Speicherung werden oft die niedrigen Temperaturen im Winterhalbjahr zur Speicherbeladung genutzt (z.B. Abbau von Eis aus Oberflächengewässern). Heute kommen nur große Speicher dafür infrage.

## 3 Speicherphänomene und -stoffe

Im Folgenden werden die Ursachen (grundlegende Phänomene) für die Änderung der Enthalpie bei Speichervorgängen genannt und die entsprechenden Stoffe, die für eine Kältespeicherung infrage kommen, zugeordnet sowie bewertet (Tabelle 1).

1 Auf Grund der sehr hohen Quellenanzahl wird auf [4] verwiesen, wo alle Quellen genannt sind.

2 Kraftwerke müssen in der Regel auf einem Minimalniveau betrieben werden. Nachts ist der Absatz bzw. die Anwendung von Elektroenergie energetisch sinnvoll.

3 Beim Sinken der Speichertemperatur sinkt gleichzeitig die Leistungszahl der Kältemaschine. Das trifft besonders auf Eisspeicher zu. Eine Optimierung ist erforderlich. Die Speicherentwickler reagierten mit verschiedenen Eisspeicherkonstruktionen. Auf dem Markt sind deshalb viele verschiedene Eisspeichertypen bzw. Eisgeneratoren verfügbar.

4 Der Speicher kann die teilweise bis vollständige Versorgung über eine kurze Zeit übernehmen, z.B. Notversorgung.

**Tabelle 1: stark vereinfachte Übersicht zu Speicherstoffen mit ihren grundlegenden Eigenschaften sowie deren Einsatz in Kältespeichern, Temperaturbereich von ca. – 10 bis 20°C**

|                                   | Basis                               | Bewertung  |  |                             |                        |   |  |                          |                             |                            |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|--|-----------------------------|------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Stoff, Stoffgruppe                | Temperaturänderung<br>Phasenwechsel | volumetrische Wärmekapazität<br>[MJ/m <sup>3</sup> ] | Schmelzenthalpie [kWh/m <sup>3</sup> ] | Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)] | Schmelztemperatur [°C] | Physiologie, Umwelt,<br>Explosionsgefährdung, Korrosivität  | Eignung für direkte Be- und<br>Entladung | Kosten, geschätzt [€/kg] | Eignung für kleine Speicher | Eignung für große Speicher |
| Wasser                            | ✓                                   | 4,2  | 82                                     | 0,57                        | 0                      | ✓   | ✓  | 0,002                    | ✓                           | ✓                          |
| wässrige Gemische                 | ✓                                   | 6  | 6                                      | 6                           | – 10...0               | (✓)   | ✓  |                          | ✓                           | ✓                          |
| Erdreich, Aquifere <sup>7</sup>   | ✓                                   | 1,2...3,7  |  | 0,6...2,5                   |                        | ✓   | (✓)                                      |                          |                             | ✓                          |
| Wassereis                         | ✓                                   | 1,87   | s.o.                                   | 2,25                        | 0                      | ✓   |  |                          | ✓                           | ✓                          |
| Schnee                            | ✓                                   | 8  | 8                                      | 0,15...1,1                  | 0                      | ✓   |  |                          |                             | ✓                          |
| Paraffine, Paraffingemische       | ✓                                   | 2,13   | 39...46                                | 0,21...0,26                 | – 12...20              | (✓)   | (✓)                                      | 70...600                 | ✓                           |                            |
| Salzhydrate, Salzhydratmischungen | ✓                                   |  | 60...170                               |                             | – 10...20              | (✓) ... ☠ ☒   |  | 20...200                 | ✓                           |                            |
| Polyethylenoxide <sup>9</sup>     | ✓                                   |  |  |                             | – 6...20               | (✓)   |  | 10...50                  |                             |                            |
| Fettsäuren                        | ✓                                   |  | 36...53                                |                             | – 11...17              | (✓) ... ☠ ☠ ☠   |  | 20...7000                |                             |                            |
| Legende                           | ✓                                   | zutreffend   |  |                             |                        | Die Angaben des Herstellers bzw. des Sicherheitsdatenblattes usw. müssen unbedingt beachtet werden. |  |                          |                             |                            |
|                                   | (✓)                                 | bedingt zutreffend                                   |  |                             |                        |   |  |                          |                             |                            |
|                                   | ☠                                   | toxisch  |  |                             |                        |   |  |                          |                             |                            |
|                                   | ☠                                   | explosiv   |  |                             |                        |   |  |                          |                             |                            |
|                                   | ☒                                   | korrosiv   |  |                             |                        |   |  |                          |                             |                            |

6 Die Stoffwerte sind von der Stoffkombination abhängig. 7 Die physikalischen Vorgänge im Erdreich sind komplex (z.B. Austrocknung). Weiterhin existieren viele Bodenarten. 8 Die Konsistenz des Schnees wirkt sich stark auf die Stoffwerte aus. 9 Einsatz als Gefrierpunkt senkender Stoff bei Wasser

### Speicherbasis: Temperaturänderung

- Wasser (sehr viele positive Eigenschaften)
- wässrige Gemische (Gefrierpunkt senkende Maßnahmen, sog. Sole, Inhibierung für Korrosionsschutz notwendig, Einsatz technischer Fluide)
  - mit Salzen (z.B. NaCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>)
  - mit organischen Substanzen (z.B. Methanol, Ethanol, Ethylenglykol, Propylenglykol, Glycerin)
- Erdreich, Aquifere, Baustoffe (z.B. Fundamente) usw. (Nutzung vorhandener, preiswerter Speichermassen)

### Speicherbasis: reversibler Phasenwechsel

- vorwiegend flüssig-fest
- Wassereis
- Paraffine und Paraffingemische
- Salzhydrate
- Polyethylenoxide

- Fettsäuren
- Gemische, z.B. Paraffine und Salzhydrate
- Besonderheiten von PCMs<sup>5</sup>
  - Unterkühlungsneigung (z.B. Salzhydrate)
  - Neigung zur Entmischung (z.B. Salzhydrate)
  - Volumenänderung beim Phasenwechsel (z.B. Paraffine)
  - schlechte Wärmeleitfähigkeit (z.B. Paraffine)
  - Korrosionsneigung (z.B. Salzhydrate)

### Speicherbasis: Adsorption und Desorption von Wasser

- Zeolithe (aufbereitete Aluminium-Silizium-Oxide)
- wesentlich höhere Energiedichten als PCMs
- Potenzial zur verlustarmen Langzeit-Speicherung

### Sonstige Verfahren

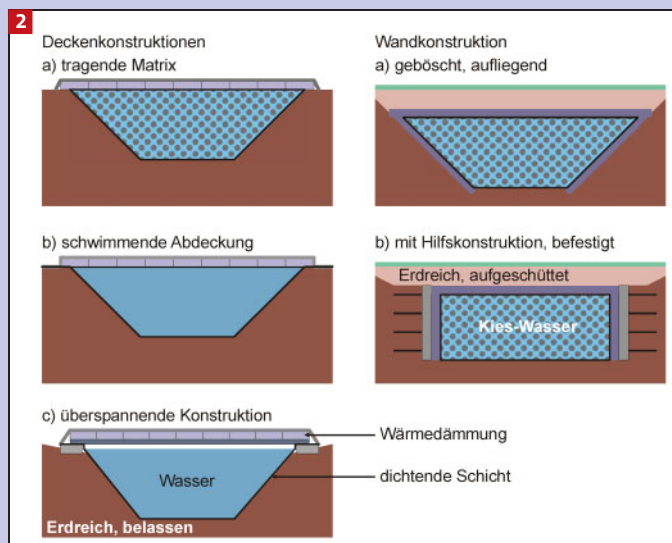
- Trockeneis (Phasenwechsel fest-gasförmig)
- Flüssiggas (Phasenwechsel flüssig-gasförmig), sehr tiefe Temperaturen
- Kältemischungen (negative Lösungsenthalpien), Nutzung vorzugsweise am eutektischen Punkt
  - Wasser mit Salzen
  - Wassereis mit Salzen
  - Trockeneis mit organischen Stoffen

Viele interessante Speichermöglichkeiten mit hohen Energiedichten auf der Basis von PCMs (außer Wasser) sind mit Nachteilen verbunden, die im Wesentlichen auf hohe Materialkosten, geringe Be- und Entladeleistungen wegen geringerer Wärme-

<sup>5</sup> Phase Change Material (PCM): Phasenwechselmaterial



**1** University of Texas, El Paso (1999), 15 100 m<sup>3</sup> Kaltwassertank mit gleichzeitiger Funktion als Löschwasserreserve, Quelle: John S. Andrepont, Coolsolutions und Chicago Bridge & Iron Co.



**2** Speicherkonstruktionen von Erdbecken-Speichern

leitfähigkeit der Speicherstoffe sowie notwendiger Trennung der Stoffe (Folgeaufwand für aufwändige Be- und Entladesysteme) und schwieriges Handling (Dichtheit, Kompensation der Volumenänderung usw.) zurückzuführen sind. Daraus resultieren folgende generelle Maßnahmen bei der Anwendung von PCMs bzw. der Speicherkonstruktion:

- Verkapselung: stofflicher Einschluss
  - Mikroverkapselung
  - Makroverkapselung
- Einsatz nichtmischbarer Fluide: direkte Be- und Entladung ohne Verkapselung
- Einlagerung in poröse Strukturen: stoffliche Bindung
- Gestaltung der Wärmeübertrager im Speicherraum: Verbesserung des inneren Wärmeübergangs
  - „klassische“ Rippe-Rohr-Wärmeübertrager, z.B. nach Beckert
  - fein strukturierte Wärmeübertrager, z.B. nach Freitag (Kapillarrohrmatten), nach Fukai (Kohlefaserbürsten)
  - Verwendung von Verkapselungsmaterialien und Einlagerungsstrukturen mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z.B. poröse Metallschäume, nach Freitag, Graphit nach SGL Technologies)
  - Einsatz von Keimbildnern: Vermeidung der Unterkühlung

#### 4 Kältespeicher

Die folgende Aufzählung soll eine Systematik zu vorwiegend existierenden Kältespeichern bzw. typischen Konstruktionen oder aussichtsreichen Konzepten geben<sup>10</sup>.

Der Speichereinsatz ist jedoch stark von den jeweiligen Randbedingungen abhängig (z.B. Klima, Versorgungssystem, Raum- und Bodenverhältnisse).

*Tank-Speicher* (Bild 1) sind oft im Bereich der Kurzzeit-Speicher anzutreffen, die mit Kompressions- oder Absorptionskältemaschinen beladen werden. Als Speicherstoff kommen Wasser, Sole<sup>11</sup> oder PCMs zum Einsatz. Die Speicherhülle besteht aus Stahl, glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und Stahlbeton. Die Erhöhung der effektiven Speicherkapazität wird über folgende Maßnahmen erreicht:

- Soleinsatz: höhere Temperaturdifferenzen beim Speicherbetrieb
- ohne stoffliche Trennung zwischen kalter und warmer Zone bei Verdrängungsspeichern<sup>11a</sup>: Vergrößerung der effektiven Speicherhöhe zur Verbesserung der thermischen Schichtung
  - Gestaltung der Speicherform (schlanke Speicher)
  - Reihenschaltung von mehreren Speichern
  - Labyrinth-Einbau (Wände im Speicher)
- mit stofflicher Trennung zwischen kalter und warmer Zone
  - Speicherumladensysteme
  - Einsatz von Membranen in Verdrängungsspeichern

*Erdbecken-Speicher* (Bild 2) sind eine bedeutende Alternative zu Tankspeichern im Bereich großer Volumina (Kurzzeit- bis Langzeit-Speicherung). Wird Wasser als Speicherstoff verwendet, kann die Deckenkonstruktionen als tragende Konstruktion (z.B.

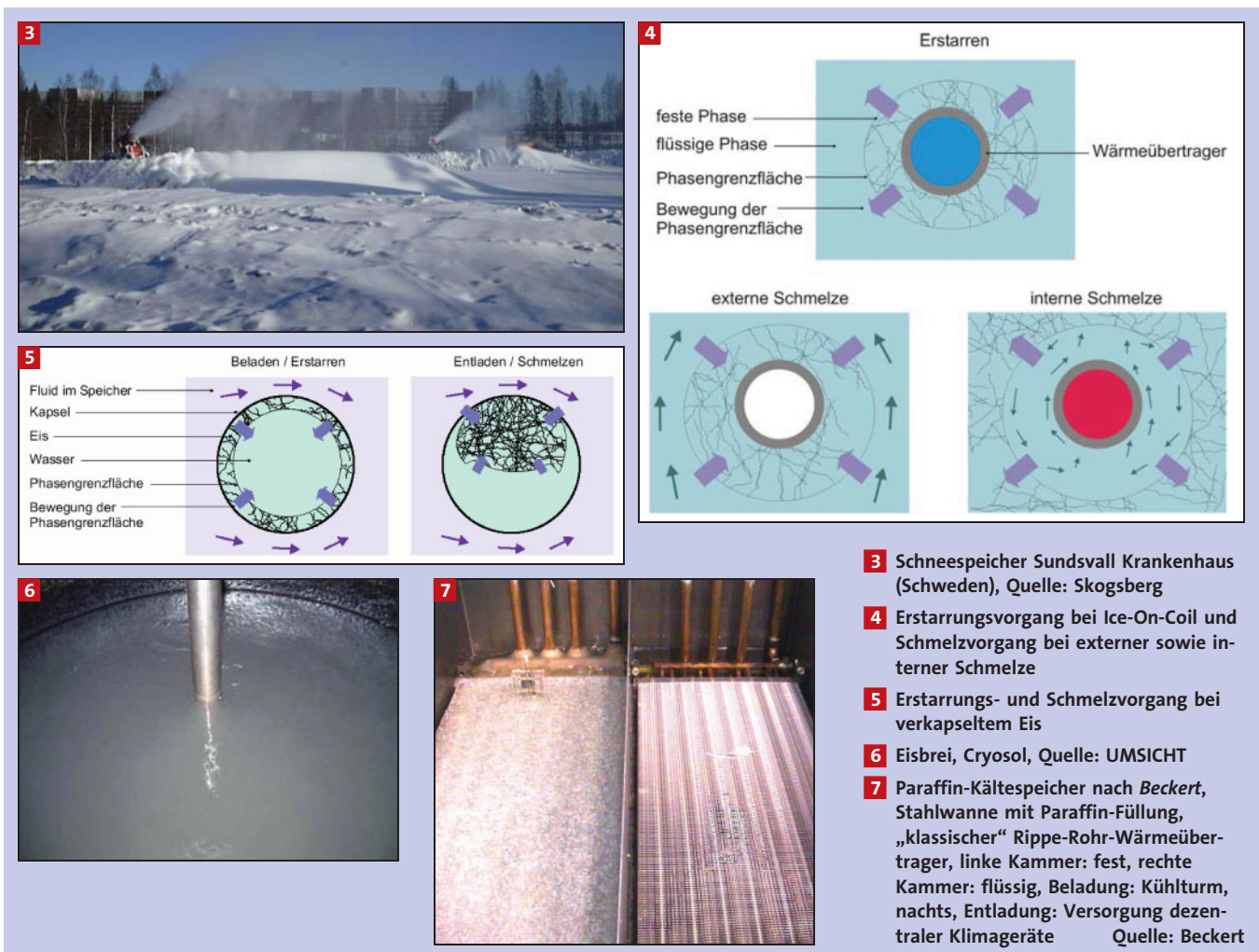
mit überspannenden Trägern) oder schwimmende Abdeckung ausgeführt werden. Bei den Wandkonstruktionen gibt es zwei grundlegende Konzepte: geböschtes Becken ohne tragende Konstruktionen oder Beckenwände mit tragender Konstruktion. Setzt man Wasser-Schüttgut-Stoffsysteme (Kies-Wasser oder Sand-Wasser) als Speichermassen ein, kann die Deckenkonstruktionen als aufliegende Abdeckung ausgeführt werden. Bei den Erdbecken-Speichern sind ähnliche Maßnahmen zur Optimierung der Funktionsweise wie bei Wassertanks möglich. Bei indirekter Be- und Entladung mit Rohrschlangen im Speicher ist auch eine Vereisung des Speicherwassers möglich.

*Schnee-Speicher* (Bild 3) können z.B. als geböschtes Becken (Erdbeckenspeicher) gebaut werden. Z.Z. testet man diese typischen Langzeit-Speicher in Schweden. Günstig ist ein langer Winter und ein kurzer Sommer, wenn möglich mit sehr kurzer Übergangszeit. Die Beladung erfolgt mit natürlichem Schnee (z.B. Winterräumdienst) oder teilnatürlichem Schnee (z.B. Einsatz von Schneekanonen). Die Abdeckung besteht z.B. aus Holzschnitzeln. *Gruben und Berg-*

10 Kleine Kältespeicher, wie z.B. Transportkältespeicher für Spenderorgane, werden hier nicht weiter betrachtet.

11 Der Soleinsatz dient zur Senkung des Gefrierpunktes von Wasser. Damit wird eine Kapazitätsvergrößerung bei Erhalt der thermischen Schichtungsfähigkeit unterhalb von 4 °C erreicht.

11a Gut funktionierende Be- und Entladesysteme und optimale Betriebsstrategien sind eine Voraussetzung.



**3** Schneespeicher Sundsvall Krankenhaus (Schweden), Quelle: Skogsberg  
**4** Erstarrungsvorgang bei Ice-On-Coil und Schmelzvorgang bei externer sowie interner Schmelze  
**5** Erstarrungs- und Schmelzvorgang bei verkapseltem Eis  
**6** Eisbrei, Cryosol, Quelle: UMSICHT  
**7** Paraffin-Kältespeicher nach Beckert, Stahlwanne mit Paraffin-Füllung, „klassischer“ Rippe-Rohr-Wärmeübertrager, linke Kammer: fest, rechte Kammer: flüssig, Beladung: Kühlturm, nachts, Entladung: Versorgung dezentraler Klimageräte Quelle: Beckert

werke können ebenfalls zur Schneelagerung eingesetzt werden.

Bei *Speichern basierend auf geologischen Strukturen* greift man auf die Erschließung des Erdreiches zurück, welches ein riesiges Potenzial darstellt. Die Nutzung des Winterklimas ist typisch für die Beladung dieser Langzeit-Speicher: Aquifer-Speicher, Erdsonden-Speicher, Kavernen-Speicher<sup>12</sup>. Diese Speichertypen können auch kombiniert als Wärme- und Kältespeicher genutzt werden. Dann be- und entladen Wärmepumpen mit reversible Betriebsweise den Speicher.

*Eisspeicher* sind typische Kurzzeit-Speicher, die meistens mit Kompressionskältemaschinen beladen werden. Die Speichertypen und -konzepte<sup>13</sup> kann man in folgende Gruppen einteilen:

- Ice-on-coil (vereiste Rohrschlange, Bild 4)
  - external melt (externe Schmelze), direkte Eisspeicher-Systeme
  - internal melt (interne Schmelze), indirekte Eisspeicher-Systeme
- Sheet ice harvester (Schichteis-Erntemaschine), direkte Eisspeicher-Systeme, Silo-Eisspeichersysteme

- Encapsulated ice (gekapseltes Eis, Bild 5), Eiskugelsystem
- Ice Slurry (Eisbrei), Produktbezeichnungen: Cryosol (Bild 6), Binäreis, FLO-ICE, Maxim-ICE, Vacuum ICE
- hybride Konzepte

*Paraffinspeicher* werden ebenfalls als Kurzzeit-Speicher geplant. Als konstruktive Beispiele wären die Stahlwanne mit Abdeckung und innen liegendem Wärmeübertrager (Rippe-Rohr) nach Beckert (Bild 7) und makroverkapseltes Paraffin in Tankspeichern zu nennen. Bei den PCMs scheint Paraffin der mittelfristig aussichtsreichste Kandidat zu sein.

#### Dank:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit unter dem Kennzeichen 0327357A gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger Jülich für die Unterstützung des Vorhabens. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Weiterhin bedanken sich die Auto-

ren für das zur Verfügung gestellte Bildmaterial.

#### Literatur

- [1] Meyer, F. Kältespeicher in großen Netzen. Projektinfo 10/05 BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.), 2005. – ISSN 0937 8367
- [2] Urbaneck et al. Optimierung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Kältespeichern. Euro-Heat&Power, VWEW Energieverlag 34 (2005) 11, S. 50–57
- [3] Urbaneck, T. et al.: Absorptionskältemaschinen und Kaltwasser-Speicher – Eine Analyse zur Kurzzeit-Speicherung. KI Luft- und Kältetechnik Hühthig 41 (2005) 12, S. 509–515
- [4] Urbaneck, T. et al.: Machbarkeitsuntersuchung zur Stärkung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung durch den Einsatz von Kältespeichern in großen Versorgungssystemen. Abschlussbericht BMWA-Forschungsvorhaben, Identifikation 0327357A, Chemnitz: Stadtwerke Chemnitz, TU Chemnitz, 2006. – ISBN 3-00-015770-0

<sup>12</sup> in Deutschland nicht relevant

<sup>13</sup> Bei den Eisspeichertechniken sind verschiedene Begriffe gebräuchlich. Die Einteilung im englischen und deutschen Sprachraum ist z.T. unterschiedlich und nicht systematisch.