

# Pumpfähige Sole-Eisgemische (pSE) in Kältenetzen - Eine lohnende Alternative?

Von Christian Dötsch, Daniel Hölder und Wilhelm Althaus, Oberhausen \*)

**Pumpfähige Sole-Eisgemische (pSE) sind physiologisch unbedenkliche, zwei-phasige Stoffgemische auf Wasserbasis, die aus kleinen, feinverteilten Eiskristallen bestehen. Aufgrund der Schmelzenthalpie des Eises weisen sie eine hohe Energiedichte auf und stellen somit eine vielversprechende Alternative zum Transport und zur Verteilung von Kälte dar. Nicht nur im Bereich der »Minus-Kälte« (unter 0 °C), wo sie insbesondere eingesetzt werden können, sondern auch im Bereich der Klimakälteversorgung ist ihr Einsatz denkbar. Im folgenden wird die Wirtschaftlichkeit von pumpfähigen Sole-Eisgemischen in diesem Einsatzgebietes näher betrachtet.**

## Summary of the report:

### Ice-slurry in district cooling systems - A promising alternative?

A centralized cooling supply offers a number of advantages compared to the self-supplying individual consumers: the total cooling capacity of the individual consumers is lower than the sum of the self-supplying consumers and storage through redundancy can be realized with a cooling supply network much more simple and cost efficient. At the same time, the specific investment costs for larger cooling machines are declining (figure 1).

However, the commercial efficiency of a central cooling supply is being questioned because of the high investment costs for the distribution network. Due to the low cooling transfer capacity of cold water at a conventional temperature difference of 6/12 °C, pipelines with large nominal width would have to be laid (table 1).

This disadvantage in costs leads in many cases to the fact that cooling networks are only competitive under optimal surrounding conditions. Through the use of a cooling carrier with a significantly higher transport capability - for example ice slurry - pipelines with a small nominal width can be put to use, thus reducing the costs for construction of a completely new network drastically. Ice slurry therefore is a good future alternative to the large scale cooling transfer.

### Pumpable ice-slurry

The pumpable ice-slurry is a two-phased water-based mixture of substances consisting of small, evenly distributed ice crystals in a watery solution, which offer a high energy density due to their melting enthalpy of 332 kJ/kg. A further distinctiveness is, that these suspensions remain pump-able up to an ice content of 40 % and partially even higher [3].

Ice slurry is produced via an ice-generator. At this time, three different construction types are available [4]:

- **Ice-scrapers:** Here the ice layer which forms at the surface of the heat-exchanger of an evaporator is mechanically removed with ice-scrapers.
- **Vacuum ice procedure:** This method uses the triple point of water. Through expansion of the injected water, a part evaporates and draws off heat from the system. Then ice crystals form in the solution.
- **Supercooler:** Here the water is cooled off slowly, thus suppressing the formation of ice crystals in the evaporator; in a following turbulent area the ice then crystallizes - similar to the vacuum procedure - within the solution.

Due to the melting enthalpy of the ice, the energy density of the coolant carrier increases - depending on the ice content - up to factor 8.

With an average ice content of 30 to 50 %, the pipe diameter can be reduced by approx. 60 % as opposed to the cold water network (figure 2). Compared to the generally needed nominal widths for cold water pipes (DN 100 to DN 500), this means significant savings.

### Costs of a cooling network

The pipe laying costs for local cooling networks are - compared to those for district heat - dependent on the necessary

pipe width and the laying conditions (figure 3). The pipe laying costs for networks could be significantly reduced by reducing the nominal width of the pipes. When using ice slurry with an ice content of 40 % savings of 30 to 50 % would be possible (figure 4).

The construction of the house substations is similar to the indirect house stations used for district heat and district cooling. The investment costs for the indirect house transfer stations for cold water or ice slurry networks are therefore almost identical.

### Investment- and operation expenses of the ice generator

The savings with the network construction are consumed by the higher investment costs for the chiller to include a storage tank as well as higher operation costs.

The degree of efficiency of a chiller (COP), which lies for cold water utilization around 4.2 to 5.8, decreases due to the lower evaporation temperatures by 20 to 35 %. This equals approx. the efficiency value of a conventional chiller, coupled with an ice storage tank as a buffer. If the storage tank is sufficiently dimensioned for ice slurry, the chiller can do most of the cold generation during night, thus achieving a good degree of efficiency due to the lower temperatures; the lower power tariffs at night will keep the operation cost low. Furthermore, due to the low peak capacity of the chiller, there are lower power capacity costs.

Because of the high energy density of ice slurry, the volume flow to be transported in the cold water network will decrease by up to 90 %. This figure can only be quantified exactly if the precise solution system consisting of ice, water and additives as well as the operational parameters (fluid dynamics etc.) are known. At an average ratio of the energy demand between chiller and pumps of approx. 15:1, the total operational costs for cold generation and distribution for ice slurry would be approx. 13 to 27 % higher.

The investment costs of an ice generator can vary from 140 to 260 \$/kW and are therefore 10 to 100 % higher than a conventional chiller [8]. In order to simplify the electrical and hydraulic control of the chiller and to catch peak loads, the ice slurry systems are operated mainly in combination with a brine-ice-storage tank. Compared to a conventional cold water tank, the investment costs are approx. 30 to 60 % lower because of the high energy density of ice slurry, so that

\*) Dr.-Ing. W. Althaus, Bereichsleiter Energietechnik, Dipl.-Ing. D. Hölder, Dipl.-Ing. C. Dötsch, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik Umsicht, Oberhausen.

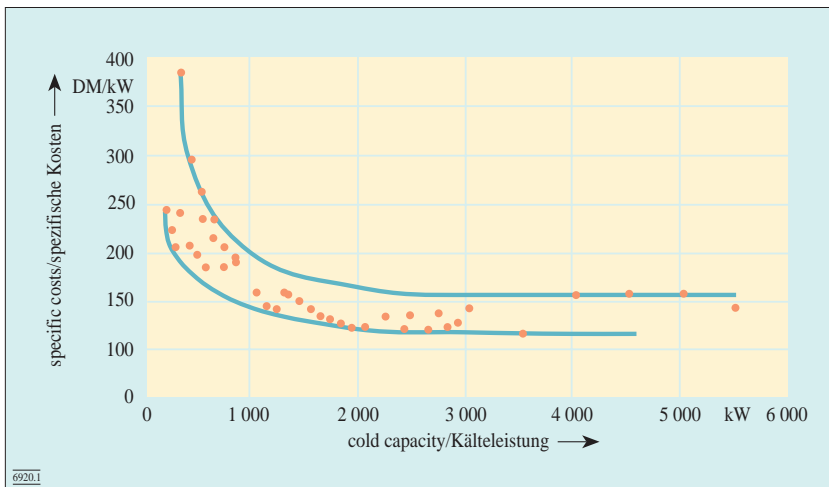


Figure 1. Investment costs of compression chillers [1]

Bild 1. Investitionskosten von Kompressionskältemaschinen [1]

the total costs for ice generation and storage are around 85 to 140 % of a comparable cold water system [9].

## Summary

The investment and operation costs for chiller for ice slurry are as a rule higher than the conventional cold water prices for the climate-cooling industry. Here the general utilization of a chilled water generator based on ice slurry makes no sense. However, when connecting more than one consumer via a local cooling network, the noticeably lower network construction costs compared to the cold water networks can still lead to a competitive advantage. And even for individual consumers with significant peak loads, which up to now has used conventional chillers with ice storage tanks, the ice slurry is a promising alternative due to their cost efficient storage possibilities [10].

However, in order to find reliable statements regarding the economic efficiency of ice slurry in the various areas of cooling supply, precisely specified data of all cost relevant points will have to be assembled first. Unfortunately the information published so far has been quite incomplete and partially contradicting. The Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology, Oberhausen, has therefore developed a test module with which all necessary components of an ice slurry based cooling supply can be investigated and optimized (figure 5). A detailed report about the test results will be presented in one of the next issues of this magazine. ■

## Allgemeines

Eine zentrale Kälteversorgung bietet gegenüber der Eigenversorgung der einzelnen Verbraucher mehrere Vorteile. Zum einen ist die gesamte Kälteleistung der einzelnen Verbraucher geringer als die Summe der Einzelverbraucher, da die einzelnen Lastspitzen zumeist nicht zeitgleich auftreten; z.B. benötigt ein Theater die Kälteleistung vor allem in den Abendstunden und am Wochenende wohingegen ein Bürogebäude die Kälte tagsüber an Werktagen benötigt. Zum anderen kann bei einem Kälteversorgungsnetz die Reservehaltung durch Redundanz einfacher und kostengünstiger realisiert werden; zugleich sinken bei größeren Kältemaschinen die spezifischen Investitionskosten (Bild 1). Hieraus ergeben sich für die zentrale Kälteversorgung deutlich niedrigere Investitionskosten. Auch die Betriebskosten einer Kältezentrale sind günstiger, da die Wartung einfacher und das Teillastverhalten günstiger sind.

Die Wirtschaftlichkeit einer zentralen Kälteversorgung wird jedoch durch die hohen Investitionskosten für das Kälteverteilnetz in Frage gestellt. Aufgrund der niedrigen Kälte transportkapazität von Kaltwasser bei der konventionellen Temperaturspreizung von 6/12 °C im Vor-/Rücklauf müssen Rohrleitungen mit großen Nennweiten verlegt werden (Tafel 1).

Dieser Kostennachteil führt in vielen Fällen dazu, daß Kältenetze nur unter optimalen Rahmenbedingungen wettbewerbsfähig sind. Durch den Einsatz eines Kälte trägers mit deutlich höherer spezifischer Transportkapazität - wie pSE - können Rohrleitungen mit geringeren Nennweiten verlegt und damit die Netzbaukosten drastisch reduziert werden.

Andere Kälte transportmedien - wie NH<sub>3</sub> - die vorwiegend im industriellen Bereich eingesetzt werden, stehen hierzu in Konkurrenz, wobei jedoch der Einsatz aufgrund der nach BImSchG genehmigungsrelevanten Grenze von 3 t und den notwendigen Sicherheitsmaßnahmen rückläufig ist [2]. Auch gegenüber anderen Kälte transportmedien (FCKW/FKW) heben sich pumpfähige Sole-Eisgemische durch Ungiftigkeit, sehr gute umweltrelevante Eigenschaften und einfache Handhabbarkeit positiv ab. Pumpfähige Sole-Eisgemische stellen daher eine zukunftssträchtige Alternative zum Kälte transport großer Leistungen dar.

## Pumpfähige Sole-Eisgemische (pSE)

Pumpfähige Sole-Eisgemische sind physiologisch unbedenkliche, zweiphasige Stoffgemische auf Wasserbasis und bestehen aus kleinen, feinverteilten Eiskristallen in einer wäßrigen Lösung, die aufgrund der Schmelzenthalpie (332 kJ/kg) hohe Energiedichten bieten. Eine weitere Besonderheit ist, daß diese Suspensionen bis zu einem Eisgehalt von 40 % und teilweise auch darüber hinaus pumpfähig sind [3]. Die Sole-Eisgemische enthalten neben der Hauptkomponente Wasser und den Eiskristallen noch Additive. Diese senken den Gefrierpunkt und ermöglichen damit die Einstellung des gewünschten Temperaturniveaus sowie des Eisgehaltes. Dadurch kann auf die Eiskristallmorphologie Einfluß genommen werden. Als Zusätze können zum Beispiel Alkohole, Salze oder Glycerin eingesetzt werden.

Table 1. Cold transport capacity of a standard cold water pipe (43/54 °F, flow velocity 2 m/s) depending on the pipe diameter

Tafel 1. Übertragbare Kälteleistung in Kaltwasserversorgungsleitungen (6/12 °C, Strömungsgeschwindigkeit 2 m/s) in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser

Rohr-durchmesser DN	übertragbare Kälteleistung kW
50	98
65	166
80	252
100	394
125	616
150	886
200	1 576
250	2 462
300	3 545
350	4 826
400	6 303

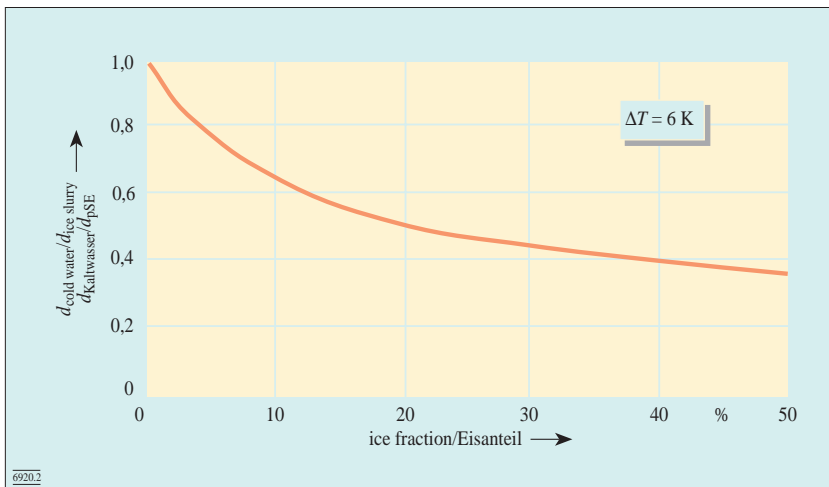


Figure 2. Pipe diameter reduction with ice slurry

Bild 2. Verminderung des Rohrdurchmessers durch pumpfähige Sole-Eisgemische (pSE)

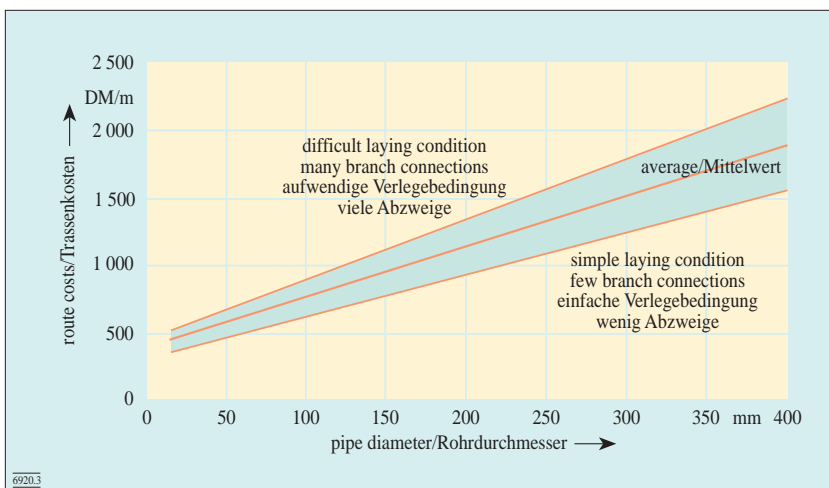


Figure 3. Pipeline and laying costs of plastic jacket pipes per route meter [5;6]

Bild 3. Rohr- und Verlegekosten von Kunststoffmantelrohren je Trassenmeter [5;6]

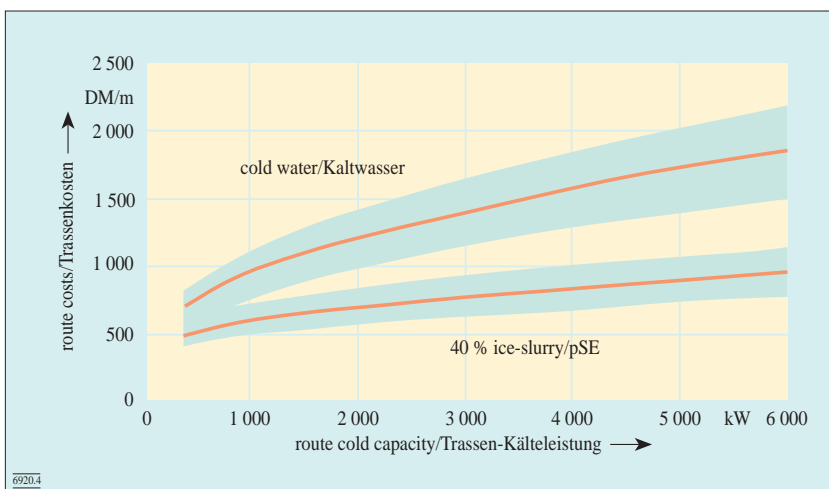


Figure 4. Comparison of district cooling network costs: Cold water / ice-slurry

Bild 4. Vergleich von Kältenetzkosten: Kaltwasser / pumpfähige Sole-Eisgemische

Die Erzeugung von pSE erfolgt mittels eines Eiszerstellers, wobei derzeit 3 verschiedene Bauarten zur Verfügung stehen [4]:

- Bei **Eiskratzern** wird die Eisschicht, die sich an der Wärmetauscherfläche des Verdampfers bildet, durch Kratzer oder Abstreifer mechanisch entfernt.
- Das **Vakuumeisverfahren** arbeitet am Tripelpunkt des Wasser. Durch Expansion des eingedüsten Wassers verdampft ein Teil und entzieht dem System Wärme. Dadurch bilden sich Eiskristalle in der Lösung.
- Die »**Supercooler**« unterkühlen das Wasser langsam und unterdrücken so die Eiskristallbildung im Verdampfer; in einem folgenden turbulenten Bereich kristallisiert dann das Eis - ähnlich wie beim Vakuumeisverfahren - in der Lösung aus.

Durch die Schmelzenthalpie des Eis erhöht sich die Energiedichte des Kälteübermittlers - je nach Eisgehalt - bis um den Faktor 8. Die daraus resultierende Reduktion des Rohrdurchmessers bei gleicher Kälteleistung und gleicher Strömungsgeschwindigkeit ist in Bild 2 dargestellt.

Bei einem mittleren Eisgehalt von 30 bis 50 % reduziert sich der Rohrdurchmesser um rd. 60 % gegenüber einem Kaltwassernetz. Bei den im Kaltwasserbereich üblichen großen Nennweiten (DN 100 bis DN 500) führt dies zu deutlichen Kosteneinsparungen.

### Kältenetzkosten

Die Netzbaukosten für lokale Kältenetze sind - vergleichbar mit denen von Fernwärmenetzen - abhängig von der notwendigen Rohrmennweite und den Verlegebedingungen. Aufgrund der unterschiedlichen Verlegebedingungen weisen die Gesamtkosten der Verlegung - von denen die Materialkosten nur 15 bis 20 % ausmachen eine große Streuung auf (Bild 3).

Bei oberirdischer Leitungsverlegung - beispielsweise in Industriegebieten - können diese Kosten unterschritten bzw. bei aufwendiger Verlegung - z.B. Dükerung eines Flusses - auch deutlich überschritten werden.

Die Netzbaukosten können bei sonst festliegenden Randbedingungen durch Verringerung der Rohrmennweiten deutlich gesenkt werden. Beim Einsatz von pSE mit einem Eisgehalt von 40 % sind Kosteneinsparungen von 30 bis 50 % möglich (Bild 4).

Die Hausübergabestationen entsprechen in der Bauart indirekten Hausstationen aus der Fernwärme bzw. Fernkälte, bei denen das Netz und die Hausinstallation hydraulisch getrennt sind. Die Investitionskosten für die indirekten Hausübergabestationen sind daher bei Kaltwasser- bzw. pSE-Netzen nahezu identisch.

## Investitions- und Betriebskosten des Eiszeigers

Den Einsparungen bei den Netzbaukosten stehen höhere Investitionen für die Kältemaschine inklusive eines Speicherbehälters sowie höhere Betriebskosten gegenüber.

Der Wirkungsgrad der Kältemaschine (COP), der bei elektrischen Kaltwassersätzen bei 4,2 bis 5,8 liegt, sinkt aufgrund der tieferen Verdampfertemperaturen um 20 bis 35 %. Dies entspricht in etwa der Leistungsziffer einer konventionellen Kältemaschine, die mit einem Eispeicher als Pufferspeicher gekoppelt ist. Bei einem ausreichend groß dimensionierten Speicher für pSE kann die Kältemaschine innerhalb der Nacht einen Großteil der Kälteleistung erbringen, so daß aufgrund der geringeren Außentemperaturen günstigere Wirkungsgrade erzielt und durch die Nutzung der Strom-Niedrigtarifzeiten die Betriebskosten gesenkt werden können. Darüber hinaus ergeben sich durch die niedrigere Spitzenleistung der Kältemaschine geringere Strom-Leistungspreise.

Durch die hohe Energiedichte von pSE sinkt der zu fördernde Volumenstrom im Kaltwassernetz um bis zu 90 %. Exakt quantifiziert werden kann dies nur bei genauer Kenntnis des Stoffsystems bestehend aus Eis, Wasser und Additiv sowie den Betriebsparametern (Strömungsgeschwindigkeit etc.), da der Druckverlust von der Zusammensetzung und der Strömungsform (Newton/Bingham) abhängt [7]. Bei einem durchschnittlichem Verhältnis des Energiebedarfs zwischen Kältemaschine und Pumpen von rd. 15:1, sind die Gesamtbetriebskosten für Kälteerzeugung und -verteilung bei pSE um rd. 13 bis 27 % höher.

Die Investitionskosten eines Eiszeigers für pSE können - je nach Größe, Bauart und Hersteller - 140 bis 260 \$/kW betragen und sind damit um 10 bis 100 % höher als bei einer konventionellen Kältemaschine [8]. Um die elektrische und hydraulische Regelung der Kältemaschine zu vereinfachen und Lastspitzen aufzufangen, werden pSE-Anlagen im Regelfall in Kombination mit einem Sole-Eis-Speicher betrieben. Im Vergleich zu einem konventionellen Kaltwasserspeicher sind die Investitionskosten wegen der hohen Energiedichte von pSE um rd. 30 bis 60 % niedriger anzusetzen, so daß die Gesamtkosten für Eiszeiger und Speicher bei rd. 85 bis 140 % einer vergleichbaren Kaltwasseranlage liegen [9].

Die meisten Komponenten eines Eiszeigers entsprechen in der klassischen Kältetechnik dem Stand der Technik. Da jedoch der Verdampfer eine Sonderan-



Figure 5. Ice-slurry test-bench at Fraunhofer Umsicht

Bild 5. pSE-Prüfstand im Technikum von Fraunhofer Umsicht

fertigung ist, sind durch technische Verbesserungen und Serienfertigung in Zukunft Einsparungen zu erwarten.

### Zusammenfassung

Die Investitions- und Betriebskosten von Kältemaschinen für pumpfähige Sole-Eisgemische sind im Regelfall höher als die konventioneller Kaltwassersätze für den Klimakälte-Bereich. Daher ist ein genereller Ersatz der Kaltwassermaschinen durch pSE nicht sinnvoll. Beim Zusammenschluß mehrerer Verbraucher mittels eines lokalen Kältenetzes dagegen können die deutlich niedrigeren Netzbaukosten im Vergleich zu Kaltwassernetzen jedoch zu einem Wettbewerbsvorteil führen. Aber auch bei Einzelverbrauchern mit ausgeprägten Lastspitzen bei denen bisher konventionelle Kältemaschinen mit Eisspeichern eingesetzt werden, sind pumpfähige Sole-Eisgemische aufgrund der kostengünstigen Speichermöglichkeiten häufig eine vielversprechende Alternative [10].

Um jedoch belastbare Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von pSE in verschiedenen Bereichen der Kälteversorgung zu erhalten, müssen fundierte Daten zu sämtlichen kostenrelevanten Punkten bereitgestellt werden. Leider sind die bisher publizierten Informationen noch sehr lückenhaft und zum Teil widersprüchlich. Das Fraunhofer Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik Umsicht, hat daher einen Prüfstand entwickelt, mit dem alle erforderlichen Komponenten einer pSE-basierten Kälteversorgung untersucht und optimiert werden können (Bild 5). Ein ausführlicher Bericht über die Meßergebnisse folgt in einer der nächsten Ausgaben dieser Zeitschrift.

### Schrifttum

- [1] Nordmann, M.; Noeres, P.: Branchentypische Kältekonzepte und kostengerechte Kältetarifgestaltung bei der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Interner Bericht Fraunhofer Umsicht, 1997.
- [2] Schönberg, I.; Althaus, W.: Kälte Dienstleistung - Technologien und Wettbewerb. Euroheat & Power - Fernwärme international, 1-2/1998, S. 40-50.
- [3] Gonswa, M.: Klimatisierung im Abbau und abbaunahen Bereich von Hochleistungs-Strebbetrieben durch Einsatz von Wasser-Eis-Gemischen. Glückauf 133, 7/8 1997, S. 457f.
- [4] Vadrot, A.; Delbes, J.: District Cooling Handbook. European Marketing Group District Heating and Cooling, Oktober 1997.
- [5] Dötsch, C.; Taschenberger, J.; Schönberg, I.: Leitfaden Nahwärme, Umsicht-Schriftenreihe Band 6, Fraunhofer IRB-Verlag, März 1998.
- [6] Noeres, P.; Fleischmann, C.; Schönberg, I.; Althaus, W.: IEA District Cooling: Balancing the Production and Demand in CHP, Final Report on the IEA-Project, IEA International Energy Agency, Novem BV, Fraunhofer-Umsicht, Februar 1998.
- [7] Egolf, P. W.; et al.: Kältespeicherungseigenschaften und Strömungsverhalten von binärem Eis, Schlussbericht, Eigenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf/Schweiz, April 1996.
- [8] Snoek, C.-W.: The design and operation of ice-slurry based district cooling systems, IEA International Energy Agency, Novem BV, November 1993.
- [9] Winters, P. J.; et al.: Direct Freeze Ice Slurry District Cooling System Evaluation, Proceedings of the 82nd Annual Conference of the International District Heating and Cooling Association, San Francisco, 1991, S. 381f.
- [10] Paul, J.: Binäreis - ein zweiphasiger Kälteüberträger, in Cube, H.L. et al.: Lehrbuch der Kältetechnik, Band 1, C. F. Müller Verlag Heidelberg, 1997, S. 297f. (6920)