

Indirekte Kälteanlagen

Michael Kauffeld, Århus (DK)

Sekundäre Kältemittel (Kälte-träger) werden in indirekten Wärmepumpen oder Kälteanlagen für den Wärmetransport von der Wärmequelle oder vom Kühlraum zum Verdampfer verwendet. In Abb. 1 ist eine derartige indirekte Kälteanlage oder Wärmepumpe schematisch gezeigt.

Indirekte Anlagen haben in den letzten Jahren viele neue Anwendungen gefunden, besonders bei Tiefkühlkälteanlagen. Ein Grund für die Verbreitung von sekundären Kälteanlagen sind die verschärften Umweltauflagen hinsichtlich des primären Kältemittels.

Indirekte Systeme haben gegenüber direkten Systemen folgende Vorteile: In den indirekten Anlagen kann die eigentliche Kälteanlage sehr kompakt und mit einer sehr kleinen primären Kältemittelfüllmenge konstruiert werden. Es können fabrikgefertigte Einheiten benutzt werden und die Montage von Systemen vor Ort kann vereinfacht werden. Gleichzeitig können die Möglichkeiten für Leckagen reduziert werden, da die Herstellung in der Fabrik eine bessere Qualitätskontrolle erlaubt. Bei einigen Anwendungen, z. B. bei Supermarktkälteanlagen, sorgen indirekte Systeme auch für stabilere Temperaturverhältnisse an den Kühlstellen.

Die sekundären Kältesysteme haben jedoch nicht nur Vorteile. Es ist mindestens eine Pumpe und ein Wärmeaustauscher zusätzlich erforderlich. Beide erhöhen die

Investitions- und Betriebskosten der Anlagen. Um den Energieverbrauch der Anlagen nicht unnötig zu erhöhen, ist es wichtig, einen geeigneten Kälte-träger zu wählen.

Für Temperaturen bis zu etwa +1 bis 3 °C ist Wasser der beste Kälte-träger; deshalb wird es auch in einer Unzahl von Anlagen zur Verflüssigerkühlung verwendet oder in Klimaanlage bei Temperaturen von +6 bis 8 °C benutzt. Die Herausforderung liegt darin, geeignete Kälte-träger für Temperaturen unter 0 °C zu finden. Dies ist besonders schwierig bei sehr niedrigen Temperaturen in z. B. Gefrierstellen in Supermarktkälteanlagen.

Jeder Kälte-träger soll eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Ein Kälte-träger soll gute thermophysikalische Eigenschaften besitzen, die den Transport von großen Kältemengen mit einer kleinen Temperaturänderung und einem kleinen Volumenstrom ermöglicht. Ein Kälte-träger soll hohe Wärmeübergangszahlen haben, die zu kleinen Temperaturunterschieden im Wärmeaustauscher führen. Ein Kälte-träger soll möglichst kleine Druckverluste in den Rohrsystemen aufweisen, um die

zum Autor

Dipl.-Ing.
Michael Kauf-
feld,
Wissenschaft-
licher Mitarbei-
ter im Dänisch-
Technolo-
gischen Institut
DTI, Energie-,
Kälte- und
Wärme-
pumpentechnik



Pumpenarbeit zu reduzieren. Ein Kälte-träger darf nicht zu Problemen mit Werkstoffkorrosion führen. Außerdem soll er nicht-giftig, umweltfreundlich, nicht-brennbar sowie leicht und risikofrei zu hantieren sein. Darüberhinaus soll er leicht zu beschaffen sein – zu einem akzeptablen Preis.

Einen Kälte-träger, der alle diese Anforderungen erfüllt, gibt es nicht. Für jeden Zweck ist daher das am besten geeignete

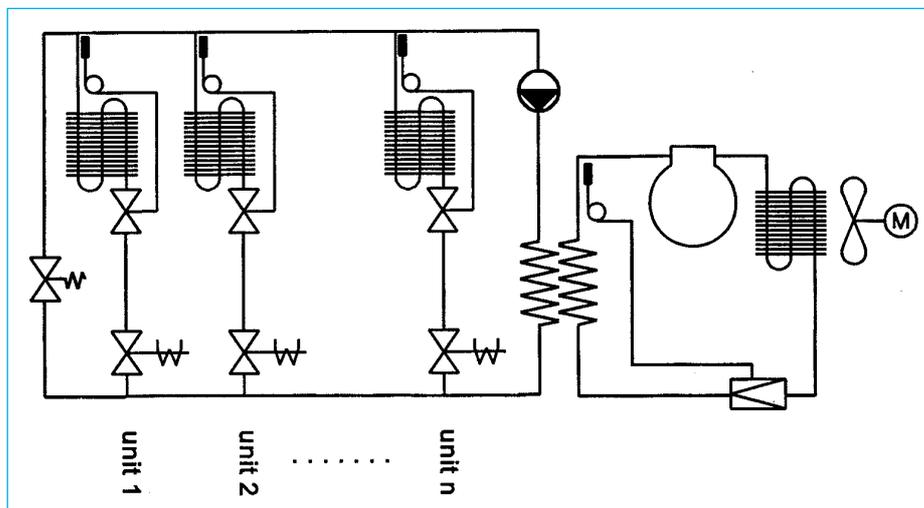


Abb. 1 Indirekte Kälteanlage

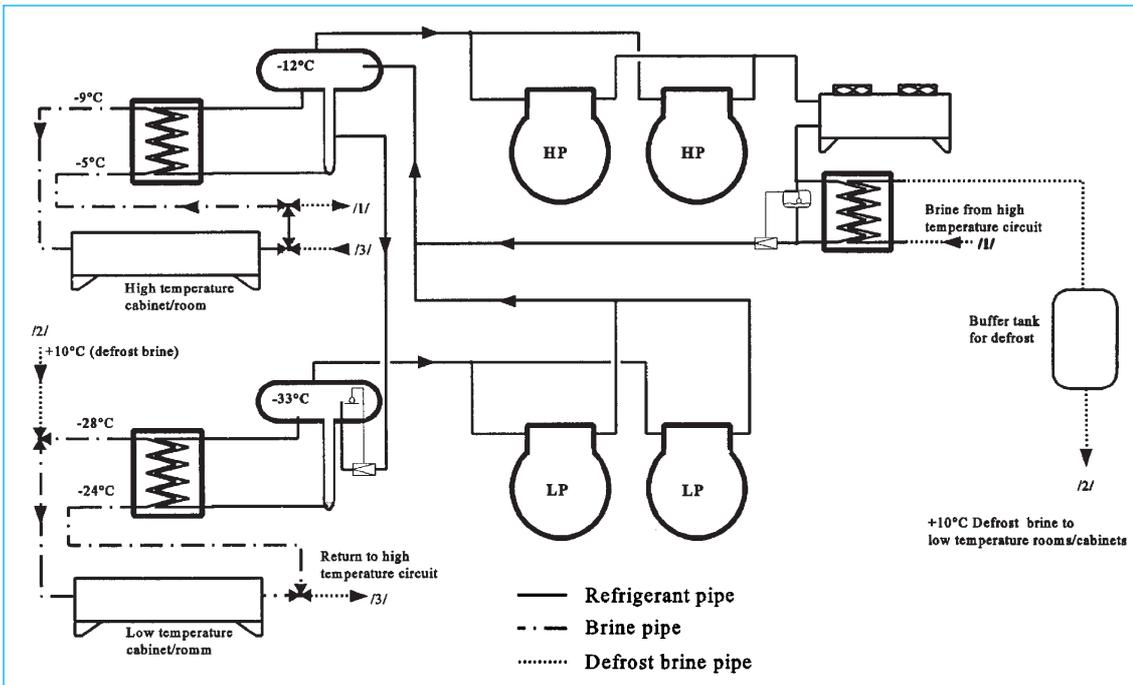


Abb. 2 Indirekte Supermarktkälteanlage in Roskilde

Mittel mit den wenigsten Nachteilen zu wählen.

Kälteträger können in Ein-Phasen-Flüssigkeiten, die die Wärme mittels sensibler Wärme überführen und die allgemein einen verhältnismäßig niedrigen Energieinhalt haben, und auf der anderen Seite in sekundäre Kältemittel mit Phasenübergang in Form von Schmelzen oder Verdampfen aufgeteilt werden. Die letztgenannten Kälteträger haben im allgemeinen einen höheren Energieinhalt.

Traditionell werden in Kälteanlagen und Wärmepumpen Ein-Phasen-Flüssigkeiten – entweder auf Wasserbasis oder kommerzielle, nicht-wasserbasierte Flüssigkeiten – benutzt. Neuere Entwicklungen – besonders auf dem Kälteanlagengebiet – gehen in Richtung von schmelzenden Kälteträgern, sogenannter Eisbrei, oder verdampfenden sekundären Kältemitteln, z. B. Kohlendioxid.

Ein-phasige Kälteträger

Für ein-phasige Kälteträger gilt, daß der Gefrierpunkt unter der Anwendungstemperatur liegen soll. Die Viskosität darf bei dieser Temperatur nicht zu hoch sein, außerdem soll die Flüssigkeit eine hohe, spezifische Wärmekapazität und gute Wärmeleitfähigkeiten haben.

Die gebräuchlichsten wasserbasierten Kälteträger sind:

Wasser:	Wasser friert bei etwa 0 °C. Wasser ist korrosiv, wenn Sauerstoff vorhanden ist, und dies gilt für alle wasserbasierten Flüssigkeiten.
Ethylenglykol: Propylenglykol:	Giftig und umweltgefährlich. Hohe Viskosität bei niedriger Temperatur sowie Risiko für Umweltverschmutzung, jedoch weniger als bei Ethylenglykol.
Ethanol: Methanol: Glycerin: Ammoniak: Kaliumkarbonat:	Ethanol ist brennbar. Ebenfalls brennbar sowie gesundheitsschädlich. Glycerin hat eine hohe Viskosität bei niedrigen Temperaturen. Brennbar, hat einen niedrigen Siedepunkt und riecht. Hoher ph-Wert, der bei Augenkontakt gefährlich ist. Der eutektische Punkt liegt bei -37,5 °C.
Calciumchlorid:	Korrosiv, eutektischer Punkt liegt bei -55°C. Der Korrosionsschutz durch Chromat kann gesundheitsschädlich sein, besonders während des Mischprozesses. (Gilt für alle Flüssigkeiten, wenn Chromat benutzt wird).
Magnesiumchlorid: Natriumchlorid: Kaliumazetat:	Korrosiv, eutektischer Punkt bei -33,5 °C. Korrosiv, eutektischer Punkt bei -20,7 °C. Verhältnismäßig hoher ph-Wert, relativ neuer Kälteträger, deshalb fehlen Langzeiterfahrungen.
Kaliumformat:	Höherer ph-Wert als bei Kaliumazetat und noch neuer als sekundäres Kältemittel, deshalb liegen noch weniger Erfahrungen vor. Die Viskosität bei niedrigen Temperaturen ist aber sehr gut.

Abgesehen von diesen wasserbasierten, Kälteträgern gibt es einige kommerzielle Flüssigkeiten, die besonders bei niedrigen Temperaturen benutzt werden, da diese Flüssigkeiten bei niedrigen Temperaturen eine niedrige Viskosität haben. Eine gute Übersicht über die verschiedenen sowohl wasserbasierten als auch kommerziellen, Kälteträger wurde 1997 vom International Institute of Refrigeration herausgegeben [1].

Eines der Gebiete innerhalb der Kältebranche, wo Kälteträger eine gewisse Verbreitung gefunden haben, sind Supermarktkälteanlagen. Das Dänische Technologische Institut hat zusammen mit einer Reihe von dänischen Betrieben einen exi-



Der Schou-Epa-Supermarkt in Roskilde, Dänemark. Trotz Umrüstung von direkter Verdampfung auf ein indirektes System mit Ammoniak für den Primärkreislauf und Kaliumazetat als Kälte­träger für den Sekundärkreislauf konnten die bestehenden Verkaufsmöbel beibehalten werden.

stierenden Supermarkt von direkter Verdampfung auf ein indirektes System umgestellt. Dabei wurden die bestehenden Verkaufsmöbel beibehalten. Das neue System verwendet Ammoniak als primäres Kältemittel und Kaliumazetat als Kälte­träger – sowohl für die Kühl- als auch für die Gefrierstellen.

Die indirekte Anlage ist in Abb. 2 schematisch gezeigt. Die Anlage ist mit separaten Kälte­träger­kreisläufen für die Kühlung (Vorlauftemperatur: $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$) und für die Gefrierung (Vorlauftemperatur: $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$) aufgebaut. Die Ammoniakverdichter sind in einem Container montiert, welcher auf dem Dach des in einem Wohngebiet liegenden Supermarktes steht. Die Ammoniakfüllmenge beträgt 75 kg.

Die Abtauung von Kühl- und Gefrierstellen geschieht mittels warmer Sole bei $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die warme Sole wird zur Unterkühlung des Ammoniak­kondensates benutzt. Die Anlage läuft nunmehr seit 2 Jahren. Es wurden Energieverbrauchs- und Temperaturmessungen vor und nach dem Umbau durchgeführt. Die Messungen erstreckten sich über fast 1 Jahr vor und 1 Jahr nach dem Umbau. Dadurch war es möglich, für verschiedene Kühlmöbeltemperaturen und Umgebungstemperaturen zu korrigieren. Tabelle 1 gibt eine Über-

Tabelle 1
Vorher- und Nachhermessungen sowie simulierte Direktverdampfungsanlage

	Gemessene Leistungsaufnahme [kW]	Korrigierte Leistungsaufnahme [kW]	Änderung [%]	Änderung [%]
FCKW/H-FCKW DX-Anlage	60,1	59,3	100	
Indirekte Ammoniakanlage	46,3	38,6	65,1	100
Simulierte DX-Anlage		35,6	60	92,2

sicht über den gemessenen Energieverbrauch. Zum Vergleich der Vorher- und Nachhermessungen wurden Korrekturgrößen für die Verdampfer-, Verflüssiger- und Außentemperaturen ermittelt. Die Tabelle enthält auch die mit diesen Korrekturgrößen errechneten, korrigierten Leistungsaufnahmen.

Da die alte Expansionsanlage aus einer Reihe von nicht-energieoptimierten Einheiten bestand, wo sich die Verflüssiger in

einigen Fällen im alten Maschinenraum befanden, und die Verflüssigungstemperaturen somit unzweckmäßig hoch waren, ist auch eine simulierte Direktverdampfungsanlage aufgeführt. Wie der letzten Kolonne der Tabelle zu entnehmen ist, verbraucht die indirekte Ammoniak­kälteanlage etwa 8 % mehr Energie als die simulierte Direktverdampfungsanlage.

Dieses Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung mit verschiedenen Publikationen, z. B. Hegglin [2].

Zwei-phasige, sekundäre Kältemittel

Schmelzende, sekundäre Kältemittel/Kälte­träger

Als Ausgangsprodukt für schmelzende Kälte­träger (Eisbrei) können alle im letzten Abschnitt beschriebenen, wasserbasierten Kälte­träger benutzt werden. Bisher wurden die größten Erfahrungen mit Ethanol

als Zusatzstoff sowie mit Natriumchlorid (Meereswasser) gemacht.

Eisbrei ist eine Mischung von sehr feinen Eispartikeln in einer Flüssigkeit. Abb. 3 zeigt den Enthalpieinhalt von Ethanolbasiertem Eisbrei bei verschiedenen Temperaturen. Zum Vergleich ist auch eine konventionelle Wasser-Ethanolmischung (30 % Ethanol) gezeigt, wo der Gefrierpunkt unter dem im Diagramm gezeigten Anwendungsbereich von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt.

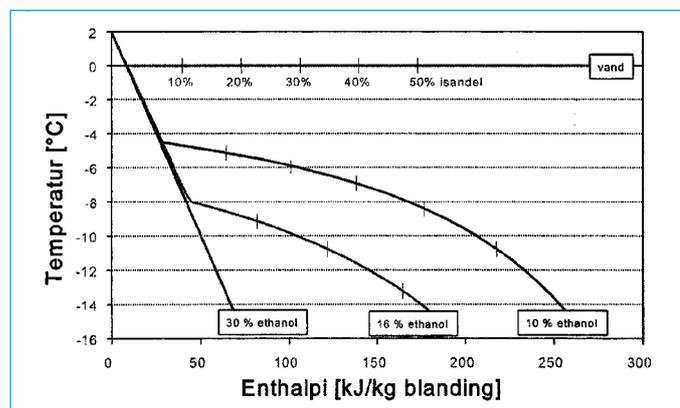


Abb. 3
Enthalpie-Inhalt ausgewählter Kälte­träger bei verschiedenen Temperaturen

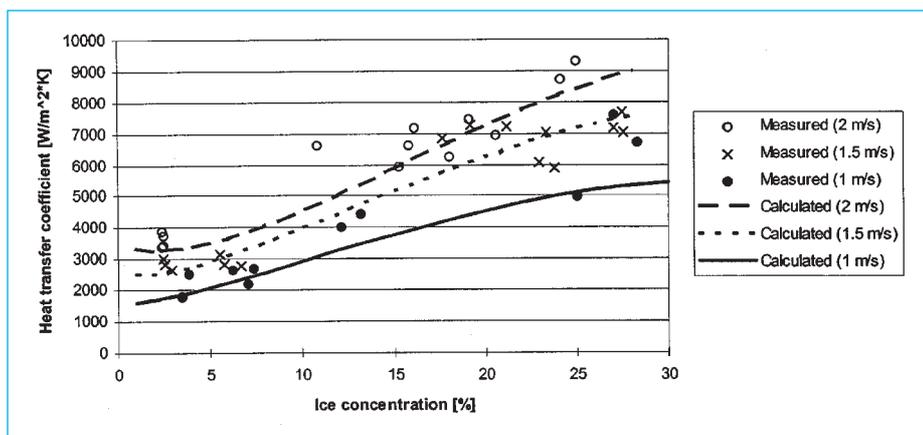


Abb. 4: Wärmeübergangszahlen für Eisbrei bestehend aus Wasser und Ethanol, gemessen in einem Rohr mit einem Innendurchmesser von 21,6 mm

Der Gefrierpunkt für eine 16 %ige Ethanolwassermischung liegt bei -8°C . Bei dieser Temperatur frieren die ersten Wasserpartikel. Dadurch wird die verbleibende Flüssigkeit reicher an Ethanol, und der Gefrierpunkt sinkt. Bei weiterer Abkühlung werden mehr Eispartikel, die immer reines Wasser enthalten, gefroren, deshalb wird die verbleibende Flüssigkeit noch reicher an Ethanol, und der Gefrierpunkt fällt weiter, wie die fallende Kurve für 16 % Ethanol veranschaulicht.

Wenn man nun z. B. in einer Kälteanlage eine Temperaturschwungung von -12 bis -8°C erlaubt, sieht man in Abb. 3 deutlich den Vorteil bei der Anwendung von Eisbrei, dadurch daß der Enthalpie-Inhalt fast 8 mal größer ist für den Eisbrei als für den konventionellen flüssigen Kälte-träger (30 % Ethanol).

Die Versuche bei u. a. DTI haben gezeigt, daß die Druckverluste bei moderaten Eiskonzentrationen, d. h. bis zu 20 % Eisanteil, mehr oder weniger dieselben wie bei konventionellen Flüssigkeiten sind. Gleichzeitig ist die Wärmeübertragung jedoch etwa doppelt so gut für schmelzenden Eisbrei wie für konventionelle Kälte-träger (Abb. 4).

Der große Kälteinhalt zusammen mit den guten Wärmeübertragungszahlen bei etwa gleichen Druckverlusten bewirken, daß die Rohrdurchmesser um etwa 50 % reduziert werden können. Gleichzeitig damit kann die Strömungsgeschwindigkeit bis auf die Hälfte und die Pumpenleistung somit auf $\frac{1}{8}$ der für konventionelle Kälte-träger erforderlichen Größe reduziert werden.

Bei der Anwendung von Eisbrei als Kälte-träger gibt es zwei Dinge die man beachten muß. Das eine ist der Wärmeaustauscher (Verdampfer), der den Eisbrei herstellen soll. Bisher gibt es am Markt nur Wärmeaustauscher vom Schabertyp, das heißt solche mit beweglichen, rotierenden Teilen. Es wird jedoch an verschiedenen anderen Lösungen gearbeitet, wie z. B. direkter Kontakt zwischen einem nicht-wasserlöslichen Kälte-träger und dem Eisbrei, welchen man herstellen möchte, sowie Rohrbündelwärmeaustauscher, die durch besonders glatte Oberflächen ein Festfrieren des Eisbreis verhindern.

Der andere Punkt, auf den man achten muß, ist die Gestaltung des Rohrnetzes. Es sollte z. B. verhindert werden, daß der Eisbrei in der Anlage über längere Zeit zum Stillstand kommt. Beim Stillstand separieren sich die Eispartikel von der Trägerflüssigkeit. Da die Eispartikel leichter als Wasser sind, bewegen sie sich nach oben in senkrechten Rohrstrecken, aber auch in waagrecht liegenden Rohren. Dauert der Stillstand längere Zeit, können diese Separationen zwischen Eis und Flüssigkeit zu einer Blockierung in den Rohrsystemen

führen. Dasselbe kann bei Abzweigungen passieren. Hat z. B. ein T-Stück eine Abzweigung nach oben, dann wird das Eis – auch wenn die Flüssigkeit im waagerechten Rohr fließt – in den senkrechten Teil des T-Stückes fließen, wodurch diese Rohrstrecke blockiert werden kann. Abzweigungen sollten von daher immer zur Seite oder nach unten erfolgen.

Ein anderer wichtiger Parameter, den man kennen muß, um die sekundäre Kälteanlage mit Eisbrei zu regeln, ist die Eiskonzentration. Diese kann auf verschiedene Weisen gemessen werden, z. B. durch Dichtebestimmung mittels des Höhenunterschiedes in einem Behälter oder einem Rohrstück oder mittels eines Massendurchflußmeßgerätes nach dem Coriolis-Prinzip. Durch Temperaturmessung und anhand einer Kurve, wie der in Abb. 3 gezeigten. Außerdem durch sich ändernde elektrische Leitfähigkeit oder elektrische Kapazität des Eisbreis sowie durch Änderung der Lichtdurchlässigkeit bei steigender Eiskonzentration.

Es ist wichtig, daß die verschiedenen Aspekte bei der Anwendung von Eisbrei weiterhin erforscht werden. Am Dänischen Technologischen Institut wird in enger Zusammenarbeit mit acht Industriepartnern und der dänischen Universität an der Untersuchung von Eisbrei gearbeitet.

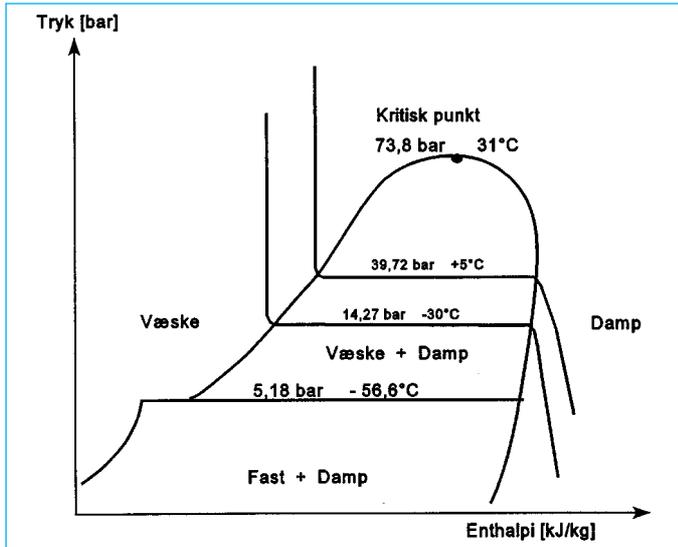
Nicht desto trotz gibt es jedoch eine Anzahl ausgeführter Anlagen, z. B. wird die Eisbrei-Technologie bei Kältespeichern in zahlreichen japanischen Klimaanlageanlagen benutzt. Darüber hinaus gibt es hauptsächlich in Europa verschiedene Supermarktanlagen und Fleischereikühlanlagen.

Verdampfende, sekundäre Kältemittel

Bei verdampfenden, sekundären Kältemitteln wird das sekundäre Kältemittel im Prinzip wie aus direktverdampfenden Kälteanlagen bekannt benutzt. Der einzige Unterschied ist der, daß das Kältemittel, das an den Kühlstellen verdampft, nicht dasselbe ist wie das in der primären Kälteanlage. In den letzten Jahren ist besonders Kohlendioxid (CO_2) als verdampfendes, sekundäres Kältemittel benutzt worden.

Kohlendioxid ist durch sehr gute Umwelteigenschaften gekennzeichnet, bei Anwendung in Kälteanlagen muß aber auf

Abb. 5 Prinzipielles ph-Diagramm für CO₂



Mischung von CO₂-Flüssigkeit und Gas durch den Kältespeicher, der aus 600 Liter Propylen-Glykol in einem gut isolierten Behälter besteht, geleitet, wonach das CO₂ zum Ammoniakverdampfer zurückkehrt. Die Zirkulationszahl für das CO₂ in den schwedischen Anlagen ist ca. 1,3.

Wenn ein verdampfendes, sekundäres Kältemittel benutzt wird, kann man selbstverständlich den Pumpenumlauf durch einen Kältemittelverdichter ersetzen. Eine solche Anlage könnte als eine Kaskade wie in Abb. 7 gezeigt konstruiert werden. Auch bei einer solchen Kaskadenanlage muß eine der obigen Maßnahmen zur Begrenzung des Druckes während des Stillstandes realisiert werden, wenn man nicht den ganzen Niedertemperaturkreislauf für Hochdruck konstruieren möchte bzw. kann.

den relativ hohen Druck (ca. 35 bar bei 0 °C) Rücksicht genommen werden.

Abb. 5 zeigt schematisch ein ph-Diagramm für CO₂. Betriebserfahrungen mit CO₂ als verdampfenden Kälte-träger sind besonders in Schweden gemacht worden, wo die Firma Stal eine Reihe von Anlagen mit CO₂ in Pumpenzirkulation und Ammoniak als primärem Kältemittel gebaut hat [4]. Möchte man vermeiden, daß das ganze System für den verhältnismäßig hohen Sättigungsdruck von CO₂ bei Raumtemperatur (ca. 50 bar) konstruiert werden soll, müssen Systeme mit CO₂ als sekundärem Kältemittel mit einer oder anderen Form für Druckbegrenzung bei Stillstand ausgerüstet werden. Geeignete Maßnahmen sind abgestimmte Füllmenge, kontrolliertes Abblasen beim Stillstand, Adsorption, Kältespeicher oder externe Kühlung. Die bis jetzt konstruierten Anlagen in Schweden und in der Schweiz benutzen Kältespeicher als Maßnahmen zur Senkung des Stillstandsdruckes.

Abb. 6 zeigt die Prinzipskizze eines der schwedischen Systeme. Kohlendioxid wird mittels verdampfendem Ammoniak kondensiert und wird in einem Sammler gespeichert, von wo aus eine Pumpe das CO₂ bei -33,9 °C zu den Gefriermöbeln und -räumen fördert. Nach der Verdampfung an diesen Gefrierstellen wird eine

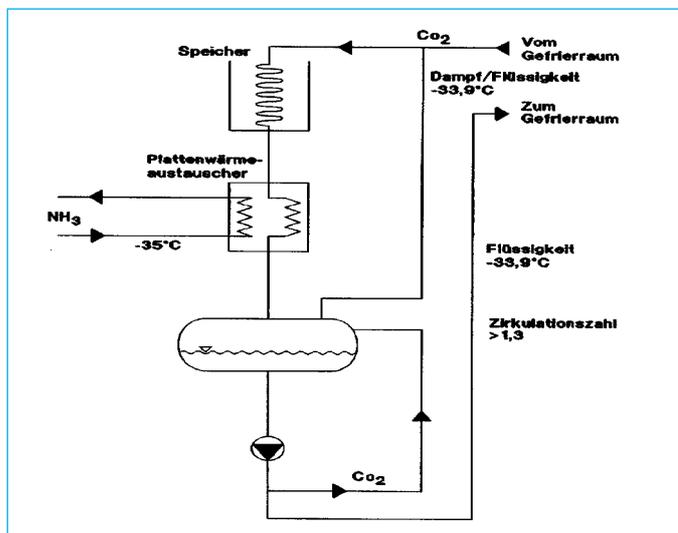


Abb. 6 Skizze einer schwedischen Supermarktkälteanlage mit CO₂ als verdampfendes, sekundäres Kältemittel [4]

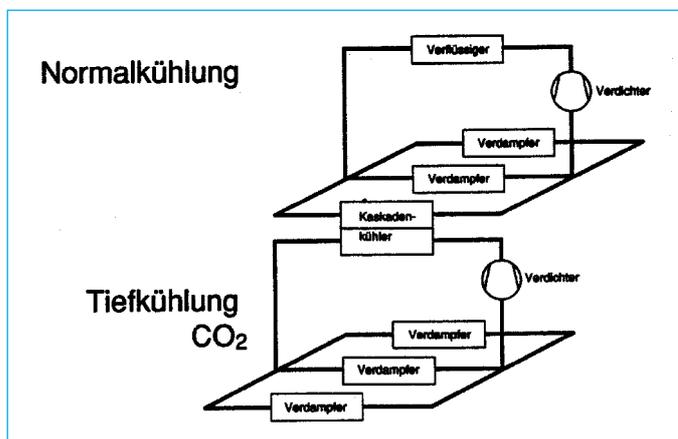
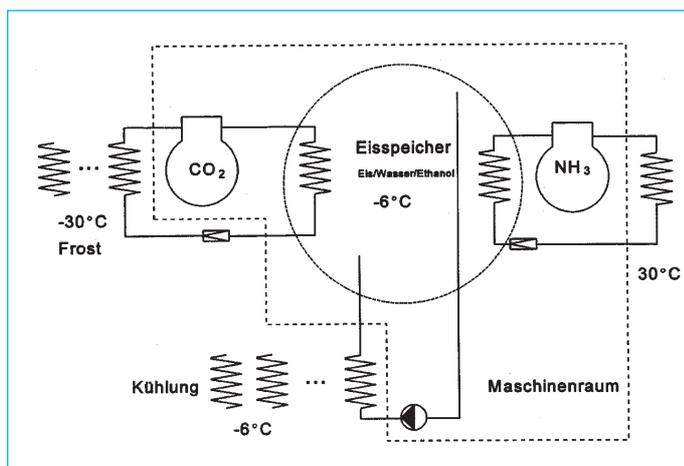
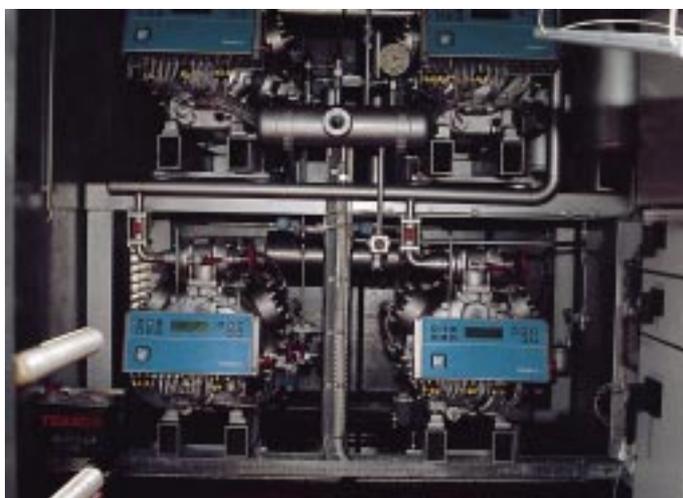


Abb. 7 Kaskaden-Kälteanlage

Abb. 8 Künftige Supermarktkälteanlage, die sowohl schmelzendes als auch verdampfendes, sekundäres Kältemittel benutzt



Der Maschinenraum der Schou-Epa-Anlage in Roskilde, Dänemark



Zusammenfassung

Derzeit können verdampfendes CO₂ für Niedertemperatur, z. B. in den Gefrierabschnitten in Supermarktkälteanlagen und schmelzender Eisbrei für Normalkälteanwendungen, z. B. -2 bis -8 °C, als die besten Kälte-träger/sekundären Kältemittel bezeichnet werden. Das für die Supermarktkälte daraus resultierende System ist in Abb. 8 dargestellt. Ein entsprechendes Demonstrationsprojekt wird derzeit von DTI Energie bearbeitet.

Danksagungen

Die in diesem Aufsatz beschriebenen Erkenntnisse sind in verschiedenen vom dänischen Umwelt- und Energieministerium unterstützten Forschungsvorhaben erarbeitet worden. Die derzeitigen Arbeiten werden vom dänischen Energieministerium und vom Wirtschaftsministerium geför-

dert. Darüber hinaus sei die großzügige Unterstützung durch alle beteiligten Firmen dankend erwähnt. □

Literatur

- [1] Melinder, Åke: Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants. IIR, Paris, 1997.
- [2] Hegglin, Andreas: Supermarkt-Kühlung – in welche Technologie investieren? Ki-Luft- und Kältetechnik Nr. 5, 1997, Seite 221–225.
- [3] Fischer, Thomas: Kohlendioxid als Tieftemperatur-Kälte-träger. Die Kälte- und Klimatechnik Nr. 11, 1997, Seite 896–897.
- [4] Kauffeld, M.: Neue NH₃-Technologie – NH₃ mit CO₂ als Kälte-träger. Die Kälte- und Klimatechnik Nr. 11, 1995, Seite 931–932.

Eisbreizentrum in Dänemark gegründet

Für die Entwicklung von Komponenten für Eisbreisysteme ist in Dänemark ein internationales Eisbreizentrum gegründet worden. In den nächsten 4 Jahren will das Konsortium bestehend aus Sabroe Refrigeration, Grundfos, tt-coil, Swep, Texaco, Georg Fischer, Hans Buch, Sunwell, Institut für Angewandte Chemie der Technischen Universität Dänemarks und DTI Energie neben den entsprechenden Komponenten auch die thermodynamischen Eigenschaften verschiedener Eisbreimischungen untersuchen.

Dem jeweiligen Interesse der Industriepartner entsprechend, sollen in erster Linie Eisbreierzeuger, Zentrifugalpumpen, Rohr-Lamellen-Wärmeaustauscher, Plattenwärmeaustauscher, Korrosionsschutzmittel und Zusatzstoffe, Kunststoffrohrsysteme und Meßgeräte entwickelt werden.

Neben den obengenannten Herstellern ist dem Eisbreizentrum auch eine Gruppe von potentiellen Verbrauchern angegliedert. Dieser sogenannte Benutzerkreis besteht aus der Zentralgenossenschaft der Dänischen Konsumvereine (FDB), dem dänischen Forschungsinstitut für Fleischwirtschaft und dem Dänischen Fischereiverband.

Zur weiteren produktspezifischen Unterstützung kann sich das Eisbreizentrum einer Folgegruppe bestehend aus Danisco Ingredients (Lebensmittelzusätze), Danisco Destillers (Alkohol), LR Industrie (Schaumstoffisolierungen), Tyfo-rop Chemie (Kälte-träger) und dem Verband der dänischen Kälteanlagenbauer bedienen. Für die fachliche Unterstützung ist dem Eisbreizentrum ein wissenschaftliches Netzwerk angeschlossen. Hierin sind namhafte internationale Forschungsinstitute wie das Institut für Energietechnik der dänischen technischen Universität, der kanadische Research Council und das amerikanische Thermal Storage Applications Research Center vertreten.

Die vertragliche Bestandzeit des Eisbreizentrums beträgt 4 Jahre, in denen 24 Mio. DKK, d. h. rund 6 Mio. DM umgesetzt werden sollen. 44 % dieser Mittel stammen vom dänischen Wirtschaftsförderungsmministerium (Erhvervsfremme Styrelsen). Leiter des internationalen Eisbreizentrums ist Dr.-Ing. Michael Kauffeld.