

Ein altes Kältemittel mit neuer Zukunft

CO₂ als Kältemittel

Lennart Rolfsman, Norrköping (Schweden)

Ein Kältemittel, das immer stärker in den Blickpunkt kälte- und klimatechnischer Diskussionen und Anwendungen rückt, ist CO₂. Nachdem die bisher eingesetzten Stoffe aufgrund ihrer ODP- und GWP-Potentiale weltweit heftig unter Beschuß geraten sind, wurde begonnen, nach Alternativen Ausschau zu halten – eine davon ist CO₂.

Die alte Art und Weise, eine CO₂-Kälteanlage zu konzipieren und zu erstellen, hat eine Renaissance erfahren. Unglücklicherweise ist es keine leichte Aufgabe, Ingenieure und Anlagenbauer mit dementsprechenden eigenen Erfahrungen ausfindig zu machen. Außerdem haben sich Ausrüstung und Handhabung von Anlagen seit der Zeit, in der CO₂ ein gebräuchliches Kältemittel war, verändert. Eine Menge Forschungsarbeit ist in den letzten 10 Jahren veröffentlicht worden, hauptsächlich superkritische Prozesse mit CO₂. In diesem Beitrag sollen Aspekte über die Anwendung von subkritischem „Standard“ diskutiert werden. Standard in „Gänsefüßchen“ aus dem Grunde, weil das System des sekundären Phasenwechsels außerhalb Schwedens kaum bekannt ist und ebenso auch nicht das Kaskadensystem außerhalb einer kleinen Gemeinschaft von Spezialisten

im Tieftemperaturbereich. Beide Systemarten werden jedoch aller Voraussicht nach in den kommenden Jahren in Gewerbe- und Industriekälte eine größere Verbreitung finden. Vergleichskriterien bei heutigen sich im Betrieb befindlichen Anlagen sind ein zentraler Maschinenraum und die Kälteverteilung in Form von trockener Verdampfung eines Kältemittels, eines sekundären Solesystems oder eines NH₃-Pumpensystems. All diese Systeme sind wohlbekannt, und im Industriekältebereich ist kaum eines mit besserer Leistung zu finden, als ein NH₃-Pumpensystem mit mechanischen Pumpen. Die zwei hauptsächlichen Gründe, ein solches System heute dennoch umzurüsten, sind Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz. Im Hinblick auf FCKW- und H-FCKW-Kältemittel ist der Grund der globale Umweltschutz. Bei den H-FCKWs wird dieser wahrscheinlich etwas später zum Tragen kommen, wobei auch hier die Wirtschaftlichkeit die Wahl beeinflussen wird.

Das globale Umfeld

Zunächst soll kurz die globale und lokale Umweltbeeinflussung betrachtet werden. Die bislang maßgebliche globale Frage war der Einfluß auf die Ozonschicht der Erde. Diese ist im Hinblick auf die derzeit zulässigen Medien bei Neuinstallationen nicht mehr aktuell. Die nächste sich stellende Frage betrifft die Klimabeeinflussung, genauer den Treibhauseffekt. Hier wird mit vollem Recht darauf hingewiesen, daß alle Beeinflussungen durch das Medium mitgerechnet werden müssen. Die Summe aller direkten und indirekten Beeinflussungen wird als TEWI-Wert bezeichnet. Die indirekte Beeinflussung ist in den Energiesystemen zu suchen, in denen fossile Brennstoffe zur Erzeugung von elektrischer Energie verwendet werden, und somit CO₂-Emission verursachen.

zum Autor

Lennart Rolfsman,
Applikations &
Systems, York
Refrigeration,
Norrköping



In Ländern mit viel Wasserkraft und/oder Kernkraft, wie etwa Schweden, ist das ein wesentlich kleinerer Teil als in vielen anderen Ländern. Das als Sekundärkältemittel eingesetzte Kohlendioxid wird aus der Atmosphäre erhalten. An dieser Stelle muß der Begriff des Global Warming Potential (GWP), also welchen Treibhauseffekt eine Substanz verursacht, erklärt werden. Für CO₂ ist das GWP 1 definiert und erreicht für R404A den Wert 3800. Als Vergleich dienen die Mengen CO₂, um die es sich bei der Produktion von elektrischem Strom handelt: Kohle über 1160 kg/MWh, Öl über 850 kg/MWh, der Durchschnitt für die Stromproduktion in Schweden 350 kg/MWh und der Durchschnitt für die Stromproduktion innerhalb der EU 600 kg/MWh.

Eine Frage, die sich an dieser Stelle aufwirft, ist, wieviel Strom beispielsweise in einem normalen Tiefkühlsystem eines Ladens pro Jahr verbraucht wird. Die „richtige“ Antwort gibt es darauf nicht, denn zu viele Faktoren beeinflussen das

Resultat. Eine Schätzung jedoch liegt in einer Größenordnung von 150 bis 400 MWh/Jahr, was in Schweden also rund $200 \times 350 \text{ kg CO}_2$ pro Jahr entspricht. Bei der für Schweden alten Leckagerate von 30 Prozent/Jahr ergibt sich daraus ein TEWI von $200 \times 0,3 \times 1 + 200 \times 350 = 70\ 060$ für CO_2 , und $200 \times 0,3 \times 3800 + 200 \times 350 = 298\ 000$ für R404A. Gerechterweise muß gesagt werden, daß mit einer richtigen Wartung (als ein Resultat der Arbeit von Naturschutzbehörden und der Branche) die Leckagemenge in Schweden eine Zehnerpotenz niedriger geworden ist. Der TEWI für R404A ändert sich somit auf 92800. Wenn man die entsprechenden Ziffern für Mitteleuropa mit schätzungsweise 20 % Leckage berechnet, würde das Resultat für CO_2 120 040 und für R404A 272 000 betragen.

Leckageraten

Die zuvor genannten Leckageraten erfordern eine nähere Erläuterung. Sie stammen von wirklichen, nicht publizierten Untersuchungen von Verhältnissen in Stockholm, vor und gemäß dem zur Zeit geltenden Regelwerk. Dieses Regelwerk bedeutet in Kürze

- Regeln für Kältefirmen:
Akkreditierung der Firma und Zertifizierung der Monteure und Techniker.
- Regeln für den Anlagenbetreiber:
Leckagetests der Anlage in Abhängigkeit der Füllmenge von monatlich bis jährlich sowie ein jährlicher Bericht über durchgeführte Reparaturmaßnahmen und die eingefüllte Kältemittelmenge an die Behörde.

Das Resultat dieser Regeln ist unter anderem eine Senkung der Leckageraten.

Das lokale Umfeld

Beim Umgang mit Kohlendioxid gibt es ein Risiko, das beachtet werden muß. Der Atmungsapparat des Menschen wird durch Kohlendioxid-Detektierung in den Lungen gesteuert. Ein zu hoher Gehalt führt zur Auslösung des Atmungsreflexes. 2 bis 5 Prozent führen zu erhöhtem Atmungsrythmus, höhere Gehalte ergeben Kopfschmerzen und bei 20 Prozent tritt Bewußtlosigkeit ein. Um sicherzustellen, daß dergleichen in kleinen geschlossenen Räumen nicht auftritt, sollte dort ein CO_2 -Warnsystem installiert werden. Hier gilt

es zu beachten, daß die gesundheitlichen Grenzwerte in den USA für FCKW, H-FCKW und H-FKW bei 1000 ppm und niedriger liegen, wodurch ein Erstickungsrisiko bedingt durch Sauerstoffverdrängung eingegangen wird.

Was für den Einsatz der sogenannten natürlichen Medien (zu denen Kohlendioxid zählt) spricht, ist, daß es zur Zeit keine das globale wie auch lokale Umfeld betreffenden Probleme zu erwarten gibt, die spätere Maßnahmen erzwingen.

Wichtige Begriffsbestimmungen

Um mit einem zentralen Kälteaggregat dezentralen Kältebedarf zu decken, wird ein System benötigt, daß die verschiedenen Teile miteinander verbindet. Ein solches kann etwas untreffend als Kälte-distributionssystem bezeichnet werden, da es eigentlich ein Wärmefangsystem ist.

Mit einem zentralen Maschinenraum und dezentralen Kühltruhen im Verkaufsraum ist ein verbreiteter Fall im Lebensmittelgewerbe gegeben. Das zwischen Kühlaggregat und Verbraucherstelle zirkulierende Medium kann entweder die Wärme durch eine Temperatur- oder eine Phasenänderung aufnehmen. In einem temperaturändernden System nennt sich das Medium Kälte-träger. Bei einem phasenändernden System ist die Terminologie noch nicht ganz klargestellt. Ändert das Medium seine Phase zwischen flüssig und gasförmig und gibt es einen Verdichter im Kreislauf, so wird es normalerweise „Kältemittel“ genannt.

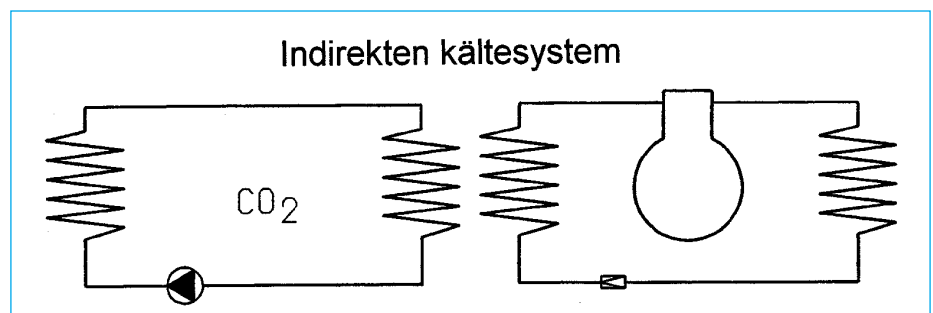
reerseits einen Verdichter passieren, so hat ein Kaskadensystem zwei primäre Kältemittel. Für das indirekte phasenwechselnde System hingegen gilt, daß CO_2 ein sekundäres Kältemittel, also ein Kälte-träger ist, wobei leicht ein Mißverständnis auftreten kann, da diese Ausdrücke einen Wärmetransport mit Temperaturänderung induzieren.

Phasenwechselnde Kälte-träger

Zur weiteren Erläuterung soll als Beispiel ein Tieftemperatursystem in einem Supermarkt dienen. Im Maschinenraum befindet sich ein Kaltwassersatz, also ein vollständiger Kühlkreis. Aber anstelle eines „normalen“ Verdampfers zur Kühlung des Kälte-trägers befindet sich ein Übertrager mit Verdampfung auf der einen, und Verflüssigung von Kohlendioxid auf der anderen Seite. Der Rest des Systems ist ein Pumpenkreislauf. Von der Flüssigkeitsseite des Verdampfer-Kondensators wird der flüssige Kälte-träger hinaus zu den Kühlstellen gepumpt, wo die größte Menge verdampft. Die Gas-Flüssigkeitsmischung strömt dann zurück zum Verflüssiger im Maschinenraum. In den Verdampfern wird die abkochende Menge nur durch ein Magnetventil, geschaltet über einen Raumthermostat, gesteuert.

Die Betrachtung eines solchen Systems führt oft zu Fragen betreffend:

- Entfrostung
- Druckniveau
- Stillstand
- Wirtschaftlichkeit



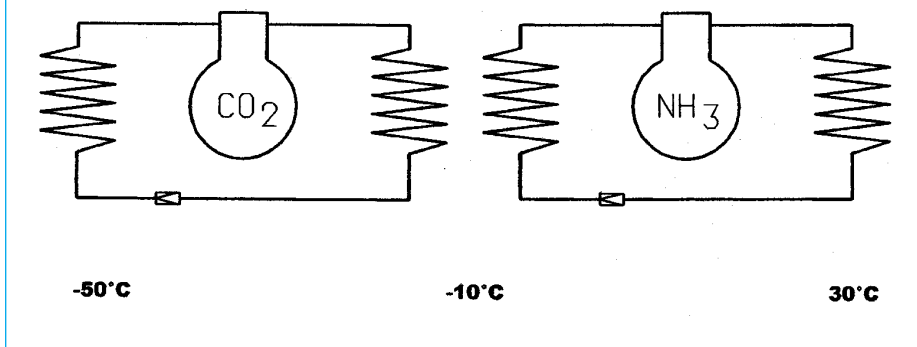
Skizze eines indirekten Kältesystems

Ein weiterer verwendeter Begriff ist der des „sekundären Kältemittels“ oder im englischen „secondary refrigerant“. Die im weiteren Verlauf des Beitrags beschriebenen Systeme eines indirekten Zweiphasen- und eines Kaskadensystems machen jedoch Probleme mit diesen Definitionen. Soll nämlich das (primäre) Kältemittel einerseits die Phase wechseln und andererseits einen Verdichter passieren, so hat ein Kaskadensystem zwei primäre Kältemittel. Für das indirekte phasenwechselnde System hingegen gilt, daß CO_2 ein sekundäres Kältemittel, also ein Kälte-träger ist, wobei leicht ein Mißverständnis auftreten kann, da diese Ausdrücke einen Wärmetransport mit Temperaturänderung induzieren.

Die Entfrostung

In der Praxis geschieht die Entfrostung bislang meist auf elektrischem Weg. Somit entstehen keine Probleme mit steigenden Anforderungen in bezug auf den Arbeitsdruck, da in diesem System kein steigen-

Cascade system



Skizze eines Kaskadensystems mit CO_2 und NH_3

der Druck auftritt. Zuerst kocht der Verdampfer leer. Erst danach steigt die Temperatur. Es ist äußerst wichtig, daß beim Entfrostern keine Flüssigkeit durch Ventile im Verdampfer eingeschlossen ist, da dies zu einem zu hohen Druckniveau führen kann.

Das Druckniveau

In einem bei Gefriertemperatur arbeitenden System ist das Druckniveau normalerweise niemals höher als in einem kältetechnischen System, also unter 25 bar. Für Kohlendioxyd entspricht dies ungefähr $-13\text{ }^\circ\text{C}$. Die heute erstellten CO_2 -Systeme sind (mit einigen Ausnahmen) mit handelsüblichen kältetechnischen Komponenten ausgeführt. Wird das ganze System abgeschaltet, gibt es Möglichkeiten, Druckerhöhungen in Abhängigkeit von Temperaturerhöhungen zu vermindern bzw. ganz zu verhindern.

In großen Tiefkühlslagern oder Tiefkühlräumen ist die Kälteleistung genügend groß, um die gesamte Flüssigkeitsfüllung zu kondensieren und sie abgekühlt zu halten, bis der Fehler oder die Ursache der Abschaltung beseitigt ist. Wenn dies trotzdem nicht möglich ist, gibt es weitere Methoden.

So beispielsweise einen Kältespeicher, wie etwa ein Tank mit Sole oder einer anderen Füllung, der auf der normalen Arbeitstemperatur des strömenden Mediums abgekühlt gehalten wird. In diesem Fall wird nur die Energie benötigt, die zum Aufladen eines solchen Akkumulators erforderlich ist.

Eine weitere Methode ist, ein presostatgesteuertes Magnetventil genügend abblasen zu lassen, um den Rest abgekühlt zu halten. Dies ist unbedenklich, denn CO_2 ist verfügbar und billig.

Die „alte“ Methode in der Tieftemperaturtechnik, nämlich einen Sammler zu haben, der groß genug ist, die gesamte Füllmenge bei einem zulässigen Druck in Gasphase zu halten, wird in diesen Systemen zu teuer. Mit einer oder mehrerer dieser Möglichkeiten wird man bei einem Betriebsstopp in der Lage sein, die Füllung abgekühlt zu halten.

Wie in den „alten“ Direktexpansionssystemen soll aber auch die Wärmemenge, die durch die Verdampferventilatoren entsteht, bei einem Betriebsstopp nicht zugeführt werden, was zu verkürzten Auftauzeiten in den Tiefkühltruhen führt.

Wenn Kohlendioxyd bei einem Kälteniveau von rund $0\text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt wird, muß das Druckniveau des Systems über das heute für normale Kühlsysteme übliche Maß hinaus erhöht werden. Der Vergleich zwischen einem solchen Hochdruck- und einem Kälte-trägersystem bedeutet die gleichen Installations- aber niedrigeren Betriebskosten für das CO_2 -System.

Installationskosten

Für die Kälteverteilung bei Tiefkühltemperaturen gibt es verschiedene Varianten. Die derzeit gebräuchlichste ist die Direktexpansion mit R404A. Eine weitere, die derzeit immer größere Verbreitung findet, ist das indirekte System mit Kälte-träger. Aufgrund der größeren Durchflußmenge wird dieses immer teurer ausfallen, da die Rohre dicker, die Pumpen größer und der Wärmetauscher im Maschinenraum wegen der schlechteren Wärmeübertragung größer werden. Außerdem ist die Wärmeübertragung in den Truhen schlechter als bei kochendem Kohlendioxyd. Vergleicht man also die Direktverdampfung mit indirekten Systemen, be-

deutet dies, daß die Füllungskosten des direktverdampfenden Mediums gegen die Kosten des Pumpenaggregats und des Verdampfer-Kondensators im CO_2 -System aufgewogen werden müssen. Daraus folgt, daß ab einer bestimmten Systemgröße Kohlendioxyd billiger ist. Ob die alten Rohre bei einer Umrüstung von FCKW und H-FCKW auf neue Medien angewendet werden können, muß von Fall zu Fall entschieden werden, allerdings ist die Isolierung oftmals in einem schlechten Zustand. Die Flüssigkeitsleitung im CO_2 -System ist kalt und sollte isoliert werden. Dies kann für die Flüssigkeits- und die Rückleitungen gemeinsam geschehen, da sie bei CO_2 dieselbe Temperatur haben.

Betriebskosten

Beim Betriebskostenvergleich werden die gleichen Systeme wie bei den Investitionen herangezogen. Hier schneiden indirekte Systeme ungünstiger ab. Der Grund dafür liegt bei dem wesentlich höheren Durchflußbedarf ohne Phasenwechsel und bei der höheren Viskosität, die bei $-30\text{ }^\circ\text{C}$ hundert mal höher ist, als für andere handelsübliche Sole. Direktexpansion oder Trockenkochen ergeben erstaunlicherweise keine niedrigeren Betriebskosten. Das Interessante dabei ist der Unterschied zwischen der Lufttemperatur im Verdampfer und dem Verdampfungsdruck am Verdichter. Beim Direktexpansions-System liegen die großen Differenzen beim Saugleitungs-Druckabfall und der Marginalie für das Steuern des Expansionsventils. Die Temperaturmarginalie ist oft unnötig groß auf Grund der Schwierigkeit, das Ventil richtig auszuliegen. Die Wahl des Ventils ist aber durch die Existenz von pulsweitenmodulierenden Ventilen erleichtert worden. Dem Druckabfall und der Temperaturmarginalie beim Direktexpansions-System kann der kleine Druckabfall des sekundären Systems (gerechnet als Temperatur) entgegengehalten werden.

Ein höherer Systemdruck bedeutet, daß derselbe absolute Druckabfall an der Sättigungskurve ganz verschiedene Ziffern in $^\circ\text{C}$ ergibt. Typisch sind $0,5\text{ }^\circ\text{C}$, verglichen mit 3 bis $4\text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Unterschied kann den Temperaturabfall in einem Verdampfer-Kondensator ganz ausgleichen. Schlecht gewählte Expansionsventile können einen niedrigeren Verdampfungsdruck im Falle der Direktexpansion ergeben.

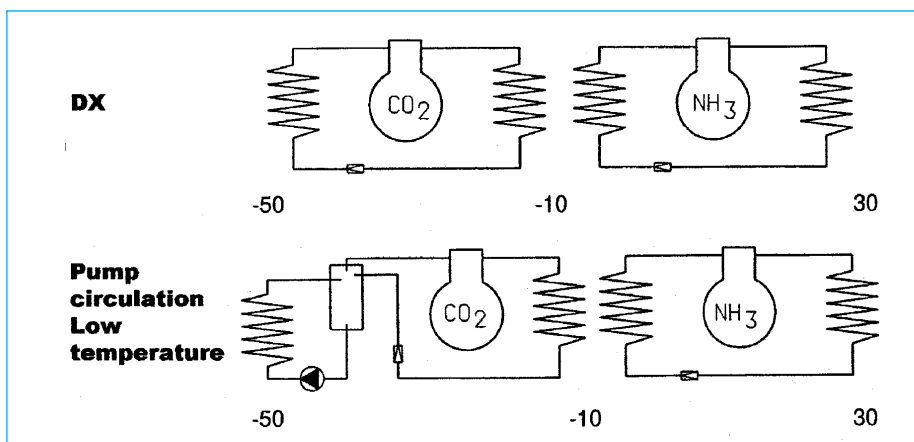
CO₂ Kaskaden-Systeme

Ein Kaskadensystem ist ein Zweistufensystem, in dem zwei verschiedene Kältemittel eingesetzt werden. Bei der Zwischentemperatur wird der Kondensator im niedrigeren Temperatursystem durch das verdampfende Kältemittel des wärmeren Kreises gekühlt. Von der Tieftemperatur-Technik her ist dies ein wohlbekanntes System, beispielsweise mit den Kältemitteln R13 und R22. Mit CO₂ im niedrigeren Temperatursystem und einem Medium nach Wahl im höheren Temperaturkreis, ergibt sich eine weitere interessante Systemlösung.

Bislang befinden sich noch wenige derartige Anlagen im Betrieb. Dies liegt auch an Unsicherheiten beim Anlagenbau, beispielsweise im Hinblick auf Druck, Schmierung und Entfrostung. Ein weiteres Problem stellt die theoretisch mögliche Vermischung von Ammoniak und CO₂ dar. Nicht zu vergessen ist außerdem die Frage nach der Wirtschaftlichkeit (also des COP) bei verschiedenen Betriebsfällen.

Im Hinblick auf den Druck sind an ein Kaskadensystem ähnliche Forderungen zu stellen, wie beim Kältemittel R410A. Von einer begrenzten Anzahl von Herstellern sind heute entsprechende Verdichter erhältlich. Ein Beispiel dafür ist die 40 bar Kolbenverdichterserie von Sabroe, die mit Ammoniak eingesetzt wurde. Diese Verdichter sind auch umfassend mit CO₂ getestet worden. Die Ventile sowie die Rohrverlegung stellen kein Problem dar, lediglich die Kosten könnten beim Flüssigkeitsansaugen sehr hoch sein. Des Weiteren können Standard-Ammoniak-Luftkühler verwendet werden. Aus ökonomischen Gründen wird allerdings vielfach Kupfer-Aluminium mit dickeren Rohrkrümmern bevorzugt. Es ist aber zu erwarten, daß in Zukunft dünnere CO₂-Rohrschlangen entwickelt werden.

In den Druckbehälternormen vieler Länder wird betreffend dem Druckniveau ein Unterschied zwischen warmer und kalter Seite gemacht. Ist dies der Fall, ist der Vergleich zu einem Ammoniaksystem (mit Ausnahme des Entfrostens mit Heißgas) noch eine ökonomische Frage.



Zwei Beispiele für mögliche Kaskadensysteme

Druck

Für welchen Druck sollte ein Kaskadensystem ausgelegt sein? Viele zweistufige Ammoniakanlagen haben einen Zwischendruck von -10 °C. Ob dies auch das Optimum für eine Kaskadenanlage ist, ist noch zu untersuchen. Bei der Umstellung einer existierenden Anlage wird der Zwischendruck nicht verändert. Als Daumenregel gilt, daß 5 °C Temperaturdifferenz am Kaskaden-Wärmetauscher den Kondensationsdruck des CO₂-Verdichters auf -5 °C Zwischendruck anhebt. Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Frage, ob Heißgas zum Entfrostern angewendet werden soll. Das würde den Druck besonders für gewisse Teile des Systems auf +5 °C erhöhen.

Schmiermittel

Wie auch in anderen Kompressionsystemen mit geschmierten Verdichtern wird das Schmiermittel innerhalb des Verdichters (und nicht im System) gebraucht. Grundsätzlich gibt es zwei Wege bei der Wahl des Schmiermittels:

- Frühere Lösungen bei Ammoniak waren und sind, Schmiermittel zu verwenden, die sich nicht ins Kältemittel mischen. Das gibt im Verdichter eine hohe Sicherheitsmarge, da die Viskosität für alle Betriebszustände leicht vorzuberechnen ist. Dagegen ist in einem Niederdrucksystem die Viskosität des Schmiermittels sehr hoch. Dies muß bei der Konstruktion und beim Betrieb der Anlage berücksichtigt werden, hat aber seit vielen Jahren in Anlagen der ganzen Welt bestens funktioniert.
- Die andere Möglichkeit ist, mischbare Schmier- und Kältemittel einzusetzen. In diesem Fall müssen alle Betriebszustände des Verdichters im Hinblick auf die Viskosität kontrolliert werden. Dies ist besonders bei Verdichtern wichtig, die ihre Ölvorlage auf der Hochdruckseite haben (Schraubenverdichter), während dessen es bei Verdichtern, die sich ihr Öl von der Niederdruckseite holen (Kolbenverdichter), etwas einfacher ist.

Die mischbare Alternative fordert ein Ölrückführsystem vom Flüssigkeitsabscheider, der, verglichen mit der nicht mischbaren Alternative, unterschiedlich konstruiert ist.

Beide Möglichkeiten gelten auch für CO₂. Es laufen Schraubenverdichter sowohl mit Polyglykolen als auch mit Polyalphaolefinen, beides Schmiermittel mit sehr niedrigem Mischungsvermögen. Versuche mit Kolbenverdichtern sind mit

einem Spezial-Polyolester durchgeführt worden, was ein hohes Mischungsvermögen im System ergab. Die Handhabung eines solchen Schmiermittels sollte heutzutage als Routine betrachtet werden. Es scheint, daß alle Ester stärker hygroskopisch sind als andere bekannten Schmiermittel.

Abgesehen von der Schmiermittel-Philosophie ist keine neue Technologie aus Sicht des Systems notwendig. Dennoch haben eventuelle Zweifel hier oft ihren Ursprung. Der Konstrukteur will sehen, wie das Schmiermittel tatsächlich in einem Niederdrucksystem funktioniert. Wahrscheinlich ist dies noch eines der Haupthindernisse, die es zu überwinden gilt, bevor es bei CO₂ zu einem kommerziellen Durchbruch kommen kann. Die Lösung ist, ein Vollskalensystem zu erstellen (sofern es zu einer Nachfrage des Marktes kommt) und dieses für einige Zeit zu betreiben.

Verdichter

Die Spezifikation des Verdichters bedeutet einen Arbeitsbereich von mindestens 35 bar Kondensationsdruck und einen Drucktest für einen zulässigen Druck von 40 bar während der Stillstandszeit. Die Eintrittstemperatur sollte bis zum korrespondierenden Eintritts-Sättigungsdruck abgesenkt werden können. Ist dies nicht möglich, muß aus Sicherheits- bzw. Normvorschriftsgründen saugseitig ein kleiner Wärmetauscher mit Sauggas vom Flüssigkeitsabscheider eingebaut werden.

Alle Verdichter, die zukünftig für das Kältemittel R410A entwickelt werden, stehen auch für die CO₂-Anwendung zu Verfügung. Ein Druckniveau von 35 bar für Verdichter kleiner Leistung (700 bis 800 kW mit 3 Verdichtern) wird derzeit angestrebt, vorteilhafter wären sogar 45 bar. Schon heute werden einige Geräte auf dem Markt angeboten.

Entfrostsyste

Wie zuvor bereits erwähnt, geschieht die Entfrostung standardmäßig mit elektrischen Heizungen. Bei einem größeren System in Kaskade ist das elektrische Entfrostern jedoch keine Alternative. Die Standardlösung ist hier, die Rohrschlangen intern mit einem warmen Medium zu heizen. Es gibt zwei Wege, nämlich die Heißgasentfrostung oder mittels einer warmen Sole. Eine andere Variante, wie zum Beispiel die Wasserentfrostung, kommt nicht in Betracht. Es ist wichtig zu erwähnen, daß bei der Beantwortung von Fragen bezüglich dem Druck in den Rohrschlangen bei einer elektrischen Heizung flüssiges CO₂ niemals in den Rohrschlan-

gen eingeschlossen sein darf. In Abhängigkeit von der hohen latenten Wärme – verglichen mit synthetischen Kälte-träger – besteht die Entfrostssteuerung aus zwei ungefähr gleichen Perioden. Die erste wird mit dem Eintritt geschlossen, Heizung und Ventilatoren sind abgeschaltet, und der zweiten, nur mit gestoppten Ventilatoren und Heizung. Ohne der erste Periode würde eine Menge Elektrizität als latente Wärme vergeudet werden an flüssigem CO₂.

Eine Heißgasentfrostung erfordert zumindest Gas, das über dem Gefrierpunkt in den Rohrschlangen kondensiert. Für die Rohrschlangen bedeutet dies 40 bar Betriebsdruck und einen erheblichen „Druckschock“ mit einem schnellen Wechsel von rund 8 bar. Welche Auswirkungen dies für das Material in den Rohrschlangen hat, ist noch nicht vollständig untersucht. Die Wärme für die Heißgasproduktion aus der Hochtemperaturstufe des Kaskadensystems zu bekommen ist unproblematisch. Die Spezifikation wäre ein 40 bar System, bestehend aus einem Verdampfer, beheizt beispielsweise mit Öl oder Wasser vom Ölkühler, bzw. Wasser von einem verdampfenden Kondensator (oder einer anderen zur Verfügung stehenden Wärmequelle) sowie einer Verrohrung zu den Rohrschlangen mit einem Standardpaket eines Heißgas-Entfrostsventils. Die Rohrschlangen müssen für den Druck und die Drucksteigerung ausgelegt sein.

Eine Alternative ist das Kontrollieren der Drucksteigerung. In diesem Fall sind allerdings die erhöhten Sicherheitsanforderungen zu beachten. Auch die Ventile sind nicht in derselben Weise ausgelegt wie heute für Ammoniak. Ein häufig auftretendes Mißverständnis bei der Heißgasentfrostung mit Ammoniak ist, daß sehr hohe Temperaturen erforderlich sind, um ein gut arbeitendes System zu gewährleisten. Viel bedeutender ist jedoch eine hohe Druckdifferenz durch kleine Dimensionen der Rohre und Ventile.

Ein System zur Entfrostung mit warmer Sole besteht aus Heizung, Pumpe, Verteilerröhren und Soleleitungen in den Rohrschlangen.

Flüssigkeitsspeisung zu den Rohrschlangen

Aus Sicht des Wärmeaustausches sollte die Speisung immer die gesamten Flächen der Kältemittelseite befeuchten. Um Pumpen und Flüssigkeitsabscheider nicht gebrauchen zu müssen, wird oft eine kontrollierte Speisung, die für einen trockenen Austritt sorgt, eingesetzt, dies beson-

ders bei synthetischen Kältemitteln. Der Grund dafür ist die Anforderung an den Verdichter im Hinblick auf einen trockenen Einlaß. Auch eine sehr genau ausgelegte Rohrschlange braucht einige °C Temperaturdifferenz, um die nötige Überhitzung zu bringen. Der Nachteil eines mechanischen thermostatischen Expansionsventils ist, daß es für jedes Medium die korrekte Füllung im Bulbensystem braucht. Pulsweitenmodulierende Magnetventile hingegen haben diese Probleme nicht. Für diese Art der Steuerung muß das Verteilersystem zu den Rohrschlangen exakt ausgelegt werden.

Komponenten

CO₂ ist als chemische Mischung gegenüber den meisten anderen Materialien, mit denen es in Berührung kommt, nicht aggressiv. Für kältetechnische Anwendungen sind die Anforderung an die Reinheit nicht größer, als beispielsweise für Ammoniak. Die Komponenten sollten die nationalen Sicherheitsnormen im Hinblick auf die Drücke erfüllen. Wird dies bedacht, können durchaus Standardkomponenten für Kältemittel angewendet werden. In Kaskadensystemen werden für Ventilsysteme (die eine Schmierung erfordern) Schmiermittel vorhanden sein, wohin gegen dies in sekundären Systemen nicht der Fall ist.

Des Weiteren muß berücksichtigt werden, daß flüssiges CO₂ niemals in einem geschlossenen Raum mit warmer Umgebung eingeschlossen werden darf. Um auf der sicheren Seite zu liegen, sollten keine Ventilkonstruktionen eingesetzt werden, die flüssiges CO₂ einschließen können.

Der Umgang mit CO₂

Für einen Kältefachmann stellt der Umgang mit CO₂ kein Problem dar. Wichtig ist, daß flüssiges CO₂ nie entweder in Ventilen oder zwischen Ventilen eingeschlossen werden darf. Muß ein Filter geöffnet werden, wird zuerst das Ventil auf der Eintrittsseite geschlossen und die Flüssigkeit abgelassen. Ist das Ventil auf der Austrittsseite geschlossen, bedeutet der nächste Schritt ein kontrolliertes Öffnen. Falls immer noch Flüssigkeit im Filter ist, sinkt der Druck bei schnellem Öffnen unter 5 bar und der Filter füllt sich mit reinem CO₂, was unweigerlich eine Vereisung zur Folge hat. Aus diesem Grund werden Serviceventile vorzugsweise an den Niedrigpunkten installiert.

Von Vorteil für den Einsatz von CO₂ ist, daß es billig und unschädlich für die Umwelt ist. Beim Service kann es direkt

in die Atmosphäre entweichen. Feuchtes CO₂ führt zu Säurebildung, weshalb das System trocken sein muß. Für Anlagenbauer, die den Umgang mit Ammoniak gewohnt sind und ohne Evakuierungspumpen arbeiten, gilt es neuen Verfahrensweisen zu erlernen und diese anzuwenden. Eine Vermischung von Ammoniak und CO₂, was zur Bildung von reinem Karbonat (Backpulver) führt, das in Wasser löslich ist, muß auf jeden Fall ausgeschlossen werden. Kommt es beispielsweise durch zu hohen Druck dennoch zu einer Leckage in einem Kaskadenwärmeaustauscher, tendiert das CO₂ dazu in das Ammoniaksystem einzutreten. In diesem Fall muß mit Wasser gespült und anschließend mit Hilfe einer Evakuierungspumpe die Feuchtigkeit über einen Wärmetauscher aufgefangen werden – bei einer großen zentralisierten Ammoniakanlage kein einfaches Unterfangen.

Umrüstung von Anlagen

In manchen Fällen ist es durchaus sinnvoll, eine bestehende Anlage auf ein CO₂-Kaskaden- oder Sekundärsystem umzustellen. Ein Vorgang, der wegen den unterschiedlichen Anlagenkonstruktionen, den eingesetzten Komponenten bzw. deren Zustände, den Drücken oder den nationalen Regelwerken von Fall zu Fall individuell gehandhabt werden muß. Zwei Beispiele für umgerüstete Anlagen aus eigener Erfahrung sind eine Eisbahn, die von Ammoniak auf einen sekundären CO₂-Kreis und ein Gefrierlager, das von R502 auf Ammoniak als primäres Kältemittel und ebenfalls einem sekundären CO₂-Kreis umgestellt wurden.

Nachteile

Welche Nachteile gibt es bei einem CO₂-System? Das Systemprinzip (übernommen aus der Großkälte mit Pumpenzirkulation von Ammoniak) erfordert Kenntnisse, die es bei Konstrukteuren von Kleinkälteanlagen nicht gibt. Allerdings ist es nicht sehr viel schwieriger, als eine gut funktionierende Direktexpansionsanlage zu konstruieren. Die Gründe dafür, daß CO₂ in der Großkälte interessant geworden ist, sind Betriebssicherheit und Betriebswirtschaftlichkeit, was allerdings ebenso für den Bereich der Gewerbekälte gilt. Durch den Bau neuer Anlagen wird sich dieses Wissen aber verbreiten.

Ein anderer Nachteil verglichen mit indirekten Systemen ist, daß die Montage lötkundiges Personal, also traditionelle Kältemonteuere, erfordert.

Diese beiden Nachteile sind aber eher organisatorischer Natur und werden höchstens die Dauer der Verbreitung von CO₂ verzögern.

Wirtschaftlichkeit

Eine ökonomische Diskussion bedeutet immer auch den Vergleich von Systemen. Die Praxis zeigt, daß es an diesem Punkt in vielen Fällen zu Differenzen kommt. Als Beispiel soll eine CO₂-Kaskade mit einer Trockenexpansion und synthetischen Kältemitteln verglichen werden. Die Verrohrungen sind dieselben, wobei möglicherweise bei CO₂ die Saugleitung, bedingt durch den höheren Druck (und somit weniger °C pro bar Druckabfall) kleiner dimensioniert ist. Die Pumpeneinheit und der Kaskaden-Kondensator werden durch den kleineren Verdichter und die niedrigeren Kältemittelkosten aufgewogen. Persönliche Erfahrungen führen zu der Einschätzung, daß bei elektrischer Entfrosthung beider Systemarten im Bereich von kleinen und mittleren Systemen die CO₂-Lösung die billigere Variante ist. Andere Entfrosthungssysteme verschieben den Schnittpunkt hin zu größeren Anlagen.

Vergleiche mit Ammoniak im überfluteten System haben gezeigt, daß die feuchte Rückleitung im Falle von CO₂ kleiner ausfällt und dieser Unterschied beim Absenken der Verdampfungstemperatur noch größer wird. Gleiches gilt auch für die Dimensionierung der Verdichter. Als größere Kostenfaktoren sind bei CO₂ hingegen der Kaskadenkondensator und das Entfrosthungssystem zu nennen. In einer verfeinerten Kalkulation spielt außerdem der bessere Wärmetransport des kochenden CO₂ bei höherem Druck eine Rolle.

Des Weiteren gibt es Vergleiche von 2-Stufen-Ammoniak- mit CO₂-Kaskadensystemen bei unterschiedlichen Druckniveaus. Die Erfahrung zeigte, daß bei Tieftemperaturen von – 50 °C CO₂ die günstigere Variante ist.

Ein Vergleich zwischen einem sekundären CO₂- und einem Kaskadensystem führte zu dem Ergebnis, daß in Abhängigkeit von der Verdichtergöße das Kaskadensystem und im Falle einer Druckabhängigkeit das sekundäre System die günstigere Variante ist.

Die Betriebskosten stellen bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einen weiteren bedeutenden Faktor dar. Ist beispielsweise im Anwendungsfall die zweistufige Ammoniakanlage das bessere System, werden die Betriebskosten einen großen Teil der Gesamtkosten ausmachen. Dies führt aber zu dem Umkehrschluß, daß ab einer Verdampfung-

stemperatur von – 35 °C die Betriebskosten für Ammoniak soweit ansteigen werden, daß ab dieser Temperatur eine Gesamtkostenbetrachtung zugunsten von CO₂ ausfällt.

Erfahrungen

In Schweden sind derzeit mehr als 30 Systeme mit CO₂ als Kälte-träger in Geschäften und Tiefkühl-lagern im Einsatz, bei denen erste Erfahrungen gemacht werden konnten. Typisch ist, daß von Anfang an zweifelnde Techniker vollständig überzeugt wurden, nachdem sie an einem Projekt teilgenommen hatten. Weitere Erfahrungen:

- Luftkühler, wie zum Beispiel für R502, können eingesetzt werden, allerdings ohne Thermoventil.

Da die Verflüssigerseite die normalerweise wichtigere ist, ist der Gewinn durch eine bessere Wärmeübertragung auf der Verdampferseite unwesentlich. Dagegen ist die Anwendung einer Überhitzungszone auch für das Verdampfen von Bedeutung.

- Einsätze in den Rohren des Verdampfers zur Reduzierung der CO₂-Füllmenge, können wirtschaftlich sein. Dies hängt davon ab, ob bei einem Betriebsstopp in dem System eine Möglichkeit der Füllmengenbegrenzung existiert oder ob die gesamte Füllmenge in einem Behälter gespeichert werden soll.

- Der Einsatz von CO₂ ist, verglichen mit Forderungen an die Leckdichtigkeit von Anlagen, um eine Umweltbeeinflussung zu verhindern, günstig.

Schlußfolgerungen

Es gibt keinen Grund, den Bau von neuen Anlagen mit CO₂-Kaskadensystemen zu verzögern. Das technische Know-how ist vorhanden. Es gibt Verdichter auf dem Markt und für die weiteren Komponenten gilt, daß Standardprodukte für jedes andere Kältemittel, mit Rücksicht auf geltende Druckvorschriften, eingesetzt werden können. Auch der Transport von CO₂ mit einer Pumpe ist erprobt. Entfrosthungssysteme wurden eingehend getestet und für das Kaskadenprinzip gibt es viele Beispiele. Wie auch die Systemvariante als sekundäres Kältemittel ist für viele Ingenieure außerhalb Schwedens vor allem der Umgang mit dieser „fremden“ Technologie“ eines der großen Hindernisse. Dennoch hat das alte Kältemittel CO₂ gute Chancen, wieder zu einem gebräuchlichen Kältemittel werden. □