

# Erste CO<sub>2</sub>-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung in einem Schweizer Hypermarkt

Siegfried Haaf, Bernd Heinbokel, Andreas Gernemann, Köln

Mit der Verabschiedung des Entwurfs einer europäischen F-Gase-Verordnung ist etwas mehr Ruhe und Sachlichkeit in die hektische Diskussion über Treibhausgase in Kälteanlagen eingekehrt. Dies ist für die Linde Kältetechnik GmbH & Co. KG, dem europäischen Marktführer bei Supermarktkälteanlagen, jedoch kein Anlass, alles beim Alten zu belassen. Vier Jahre nach der ersten Inbetriebnahme einer CO<sub>2</sub>-Tiefkühlanlage in einem Luxemburger Supermarkt wurde am 25. November 2004 in der Schweiz der erste Hypermarkt eröffnet, bei dem auch der Normalkühlbereich mit einer CO<sub>2</sub>-Direktverdampfungsanlage gekühlt wird.

## Technische Daten des Megastores COOP Wettingen

Die Neueröffnung des „Megastores Tägipark“ wurde zum oben genannten Zeitpunkt in Wettingen/Schweiz planmäßig durchgeführt. Der Betreiber des Marktes, das Unternehmen COOP mit Hauptsitz in Basel, bietet seinen Kunden auf einer Verkaufsfläche von ca. 12 500 m<sup>2</sup> hochwertige Waren und Dienstleistungen an. Die eigentliche Supermarktverkaufsfläche beträgt ca. 5000 m<sup>2</sup>.

Zur Kühlung der Produkte in der Normal- und Tiefkühlung lieferte die Linde Kältetechnik sämtliche kälte- und regelungstechnische Einrichtungen. Diese beinhalten 3 Verbundkältesätze, Kühlmöbel mit einer Gesamtverkaufslänge von 180 Metern, 9 Kühlräume (Grundfläche ca. 200 m<sup>2</sup>) und 5 Tiefkühlzellen (Grundfläche ca. 90 m<sup>2</sup>).

In der Normalkühlung kommen hier erstmals die von der Linde Kältetechnik neu entwickelten CO<sub>2</sub>-Verbundkälteanlagen zum Einsatz. Die Regelung und Überwachung der auch im transkritischen Betrieb arbeitenden NK-Verbundkältesätze übernimmt die ebenfalls neu entwickelte VS3000C. Alle Möbel- und Kühlraumverdampfer arbeiten mit elektronischen Expansionsventilen, die durch den Möbelregler UA300E angesteuert werden. Der Marktregler CI3000 dient als Anzeige-, Warn- und Bedienterminal und wird durch den Einsatz von LDS Win (Long Distance Service) fernüberwacht und -gesteuert.

Die geforderte Gesamtkälteleistung für den Normalkühlbereich von 322 kW ist auf 2 separate Verbundkälteanlagen mit jeweils identischer Kälteleistung aufgeteilt. Die Wärmeabfuhr der Tiefkühlstufe (Kälteleistung 58 kW) erfolgt durch direktverdampfendes Kältemittel aus den Normal-

|                        | Normalkühlanlage<br>(2 Kreisläufe)              | Tiefkühlanlage                                  |
|------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Verbundkältesatz       | 2 x VCP-650-4000S                               | VCM-550-4730                                    |
| Auslegungsbedingungen  | t <sub>0</sub> = -9°C<br>Lufttemperatur 34°C    | t <sub>c</sub> = -6°C<br>t <sub>0</sub> = -36°C |
| Kälteleistung          | 2 x 161 kW                                      | 58 kW                                           |
| Elektrische Leistung   | 2 x 75 kW                                       | 13 kW                                           |
| Kältemittelfüllmenge   | 2 x 400 kg                                      | 70 kg                                           |
| Verdichter             | 12 x Bitzer 4HC4-20K                            | 5 x Bitzer 2HC-3.2K                             |
| Gaskühler/Verflüssiger | Cu/Al<br>Lamellenrohrwärmeübertrager<br>472 kW  | Plattenwärmeübertrager<br>71 kW                 |
| Wärmerückgewinnung     | 90 kW Brauchwarmwasser<br>280 kW Heizungswasser |                                                 |

Tabelle 1 Kälte-technische Daten der Verbundkälteanlagen

### zu den Autoren

**Dipl.-Ing.  
Siegfried Haaf,**  
Leiter Entwicklung  
Kältesysteme,  
Linde Kältetechnik  
GmbH & Co. KG,  
Köln



**Dipl.-Ing.  
Bernd Heinbokel,**  
Leiter  
Vorentwicklung/  
Anlagentechnik  
Kältesysteme  
Gewerbe, Linde  
Kältetechnik  
GmbH & Co. KG,  
Köln



**Dr.-Ing.  
Andreas  
Gernemann,**  
Vorentwicklung  
Kältesysteme  
Gewerbe, Linde  
Kältetechnik GmbH  
& Co. KG,  
Köln



kühlanlagen (Kaskadenbetrieb). Die Versorgung der Verbraucher, sowohl in der Normal- als auch in der Tiefkühlstufe, wird ebenfalls durch direkt expandierendes Kohlendioxid sichergestellt. Zur Übertragung der abzuführenden Wärme von 2 x 236 kW an die Umgebungsluft dient ein CO<sub>2</sub>-Gaskühler in V-Block-Ausführung.

|                                | TK<br>Meter/Quadratmeter<br>Kälteleistung | NK1<br>Meter/Quadratmeter<br>Kälteleistung | NK 2<br>Meter/Quadratmeter<br>Kälteleistung |
|--------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Regale                         |                                           | 41,9m<br>59,4 kW                           | 56,90m<br>81,2 kW                           |
| Inseln                         | 5m<br>3,9 kW                              | 13,8m<br>6,3 kW                            | 5m<br>1,5 kW                                |
| Theken                         |                                           | 6,3m<br>1,95 kW                            | 18,1m<br>6,4 kW                             |
| Kombimodule<br>(Schränk+Insel) | 32,50m<br>23,8 kW                         |                                            |                                             |
| Kühlräume                      | 89 m <sup>2</sup><br>21,7 kW              | 159m <sup>2</sup><br>47,4 kW               | 40m <sup>2</sup><br>29 kW                   |
| TK-Verflüssigung               |                                           | 37,5 kW                                    | 37,5 kW                                     |
| Gesamtleistung                 | 49,4 kW                                   | 152,6 kW                                   | 155,6 kW                                    |

Tabelle 2 Übersicht der Kälteverbraucher

In das Gesamtanlagenkonzept ist zusätzlich eine Wärmerückgewinnung integriert. Neben der Bereitstellung von Heizungswarmwasser in der Heizperiode wird ganzjährig Brauchwarmwasser zur Verfügung gestellt.

In der Tabelle 1 sind die wichtigsten technischen Daten der Normal- und Tiefkühlanlage dargestellt.

Die Verbraucherseite umfasst eine Vielzahl von unterschiedlichen Kühlregalen, -theken, -inseln, Tiefkühlkombinationen sowie eine größere Anzahl von Kühl- und Tiefkühlräumen, deren genauere Aufschlüsselung der Tabelle 2 zu entnehmen ist.

Die Kälteleistung der einzelnen Verbundkälteanlagen (siehe Tabelle 1) liegt etwas über der notwendigerweise zu installierenden Kälteleistung (Tabelle 2). Dadurch wird dem Betreiber des Supermarkts der geforderte Spielraum zur Produkterweiterung eingeräumt.

Bild 1 zeigt den Verkaufsbereich für Normalkühlprodukte. Dargestellt sind Kühlregale und -inseln für den Verkauf von Frischfleisch und Wurstwaren, die durch direkt expandierendes CO<sub>2</sub> gekühlt werden.

### Der Gesamtanlagenaufbau

Bild 2 zeigt schematisch den Aufbau der Kälteanlage. Wie schon erwähnt wurde, ist die Gesamtkälteleistung der Normalkühlstufe auf zwei separate Kreisläufe aufgeteilt. Die Kondensation des Kältemittels im Tiefkühlverbundsatz wird durch verdamp-



Bild 1 Verkaufsbereich Normalkühlprodukte

fendes CO<sub>2</sub> aus den Normalkühlanlagen sichergestellt (Kaskadenbetrieb), wobei die Kondensationsleistung der Tiefkühlanlage über zwei autark arbeitende Wärmeübertrager abgeführt wird. Auch die Wärmeabfuhr der Normalkühlanlagen im so genannten CO<sub>2</sub>-Gaskühler erfolgt über zwei getrennte Apparate, die in einer V-Block-Anordnung ausgeführt sind.

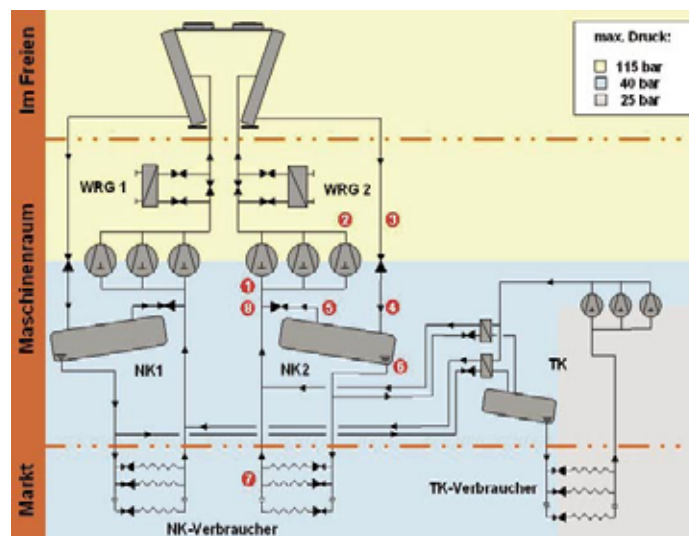


Bild 2 Prinzipschema der NK- und TK-Anlage

Durch diesen Anlagenaufbau ergeben sich drei „unabhängige“ Kältemittelkreisläufe (kein Stoffaustausch) was sowohl das Handling erleichtert als auch die Betriebssicherheit wesentlich erhöht. Zudem kann durch dieses Anlagenkonzept die bewährte CO<sub>2</sub>-Tiefkühlverbundanlagen-technik nahtlos übernommen werden, was in den letzten 2 Jahren eine deutliche Fokussierung auf die neu zu entwickelnde Normalkühlanlage und deren Komponenten ermöglichte.

Dieser Bericht beleuchtet daher schwerpunktmäßig die Linde-Entwicklungsarbeiten in der transkritischen CO<sub>2</sub>-Verbundanlagen-technik. Der interessierte Leser kann sich in weiteren Artikeln [L1, L2] über die Vorzüge der Tiefkühlung mit CO<sub>2</sub> informieren. An dieser Stelle soll für

die Tiefkühlanwendung ein kurzes Fazit gezogen werden, um im Anschluss detailliert auf die Situation in der Normalkühlung einzugehen.

### Die Tiefkühlanlage

Vor vier Jahren wurde von Linde der erste Supermarkt mit einer CO<sub>2</sub>-Direktverdampfungsanlage in der Tiefkühlung in Betrieb genommen. Zum jetzigen Zeitpunkt steht im Kälteleistungsbereich von 10–100 kW eine komplette Baureihe von kompakten Verbundkältesätzen zur Verfügung. Heute besitzt die Linde Kältetechnik mit 47 projektierten Tiefkühlanlagen mit einer Gesamtkälteleistung von 2000 kW weit reichende und zugleich positive Erfahrungen. Diese erstrecken sich auf die Montage, die Inbetriebnahme, den Betrieb sowie den Service der Kälteanlagen in sieben europäischen Ländern. In Luxemburg und Dänemark werden seit 2002 alle von Linde

projektierten Tiefkühlanlagen mit CO<sub>2</sub>-Direktverdampfung ausgeführt.

Auch die Wirtschaftlichkeit bezüglich der Investitions- und Betriebskosten konnte durch diese Vielzahl von ausgeführten Anlagen nachgewiesen werden. Gerade im Vergleich zu indirekten Systemen (Solekreisläufe) ist eine erhebliche Kostenreduzierung möglich.

Die Tiefkühlanlagen werden in der Standardanwendung als Kaskade ausgeführt. Der Kondensationsdruck der Tiefkühlanlage liegt bei maximal 36 bar (Auslegungsdruck 40 bar) und ermöglicht somit Verflüssigungstemperaturen bis +1°C. So kann bei der Normalkühlanlage die Verdampfungstemperatur bei Bedarf auf ca. -5°C angehoben werden, um z.B. bei Nacht- oder Wochenendbetrieb den Ener-



Bild 3 Maschinensätze für Normal- und Tiefkühlung

giebedarf deutlich zu reduzieren. Das Bild 3 zeigt eine Photoaufnahme der Verbundkälteanlagen in Wettingen/Schweiz. Im Hintergrund ist die CO<sub>2</sub>-Tiefkühlanlage zu erkennen, die Normalkühlanlagen stehen „Face to Face“.

## Die Normalkühlanlage

### Anlagenaufbau und Prozessführung

In der Normalkühlung wird bei der Dimensionierung der Komponenten eine Unterteilung der Verbundanlage in zwei Druckbereiche vorgenommen (siehe Bild 2). So gibt es einen Hochdruckbereich (gelber Bereich), der auf einen maximalen Betriebsdruck von 115 bar ausgelegt ist. Dieser Bereich umfasst die Druckseite der Verdichter, das Wärmerückgewinnungssystem, die Vor- und Rücklaufrohrleitungen zum Gaskühler, Absperr- und Servicekomponenten sowie ein spezielles Hochdruckventil, auf das im weiteren Verlauf noch eingegangen wird. Alle Hochdruckbauteile befinden sich entweder im Maschinenraum oder im Freien und somit außerhalb des eigentlichen Supermarkts, was den Aufwand für die Sicherheitstechnik reduziert.

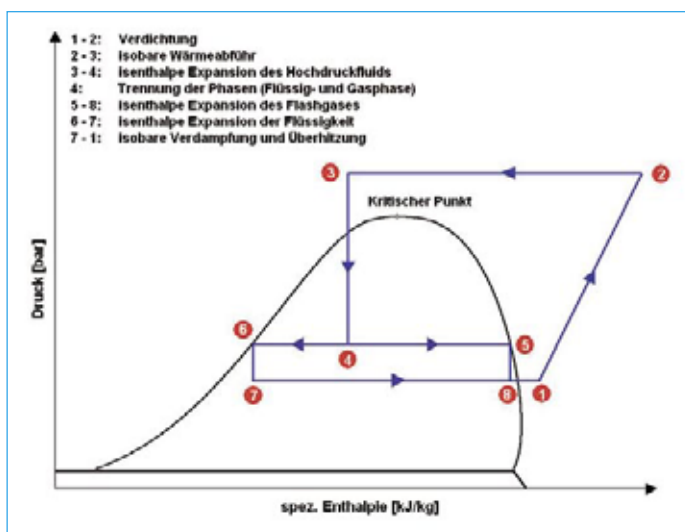


Bild 4 Darstellung der Prozessführung im Druck-, Enthalpie-Diagramm

Bei den anderen Anlagenkomponenten, wie Sammler, Flüssigkeits- und Saugleitung, liegt der maximale Betriebsdruck bei 40 bar (blauer Bereich). Die Verdampfer in der Normalkühlung sind auf der Kältemittel-seite für den Arbeitsstoff CO<sub>2</sub> strömungstechnisch optimiert und auf die höheren Druckbelastungen ausgelegt. Somit kann für den überwiegenden Anlagenteil auf standardisierte Komponenten aus der Gewerbekälte zurückgegriffen werden, die unter anderem auch in der CO<sub>2</sub>-Tiefkühlung zum Einsatz kommen.

Weitere Vorteile gegenüber anderen transkritischen CO<sub>2</sub>-Systemen ergeben sich aus der Art der CO<sub>2</sub>-Prozessführung. Ausgehend vom Punkt 1 (siehe Bild 2, rot gekennzeichnet) wird das CO<sub>2</sub> auf einen höheren Druck verdichtet. Dieser liegt je nach Außenlufttemperatur zwischen 45 und 85 bar (Punkt 2). Anschließend durchläuft das CO<sub>2</sub> entweder zunächst die Wärmerückgewinnung oder es wird direkt zum Gaskühler gefördert und dort kondensiert (unterkritischer Betrieb) bzw. enthitzt (transkritischer Betrieb). Danach gelangt das Kältemittel an die Hochdruckdrossel (Punkt 3), welche ganzjährig einen energetisch optimalen Hochdruck ausregelt. Durch die Expansion des Kältemittels entsteht ein Zweiphasengemisch (Punkt 4), eine Flüssigkeits- und eine Dampfphase.

Die Flüssigkeit wird im Sammler abgetrennt (Punkt 6), während die Dampfphase (Punkt 5) über eine weitere Drossel auf Saugdruck entspannt wird (Punkt 8). Die Flüssigkeit fließt, bedingt durch den Differenzdruck zwischen dem Sammler und der Saugleitung, zu den Verbrauchern. Nach der Entspannung (Punkt 7) und der Verdampfung strömt das Kältemittel im überhitzten Zustand zu den Verdichtern zurück und der Kreislauf ist geschlossen

(Punkt 1). In Bild 4 wird die Prozessführung anhand eines Druck, Enthalpie-Diagramms veranschaulicht.

Im Gegensatz zu konventionellen Kälteanlagen liegen bei dieser Prozessführung drei Druckbereiche vor, der Hoch-, Mittel- und Niederdruck. Der optimale Hochdruck ist dabei ganzjährig eine Funktion der Gaskühleraustrittstemperatur, während der Sammlerdruck konstant gehalten wird. Aus der Art der gewählten Prozessführung und der Aufteilung in einen Hoch- und Mitteldruckbereich ergeben sich gegenüber einem transkritischen CO<sub>2</sub>-Konzept ohne Mitteldruckbereich folgende Vorteile:

- Vereinfachung der Sicherheitstechnik, da sich keine Hochdruckkomponenten (p<sub>max</sub> >40 bar) im Markt befinden
- Einsatz von standardisierten und damit erprobten Komponenten für den überwiegenden Teil der Anlage
- Konstanter Ventilvordruck an den Verdampfern
- Reduzierung des Kältemittelmassenstroms zu den Verbrauchern und damit kleinere Flüssigkeits- und Saugleitungen durch Abtrennung des Flashgases im Maschinenraum
- Verbesserte Wärmeübergänge und geringere Druckabfälle durch einen reduzierten Dampfanteil bei Eintritt des Zweiphasengemisches in den Verdampfer.

Durch die hohe Drucklage einer solchen transkritischen CO<sub>2</sub>-Verbundkälteanlage wurde eine Reihe von Neuentwicklungen notwendig. Diese betreffen das Hochdruckregelventil, das Mitteldruckregelventil, den CO<sub>2</sub>-Gaskühler, die Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung, die Verdampfer, das Schmieröl und insbesondere die Hochdruckverdichter. Letztere sind Neuentwicklungen aus dem Hause Bitzer. Dabei handelt



Bild 6 CO<sub>2</sub>-Gaskühler auf dem Dach des Megastores

es sich um eine 4-Zylinder-Maschine, deren grundsätzliche Konstruktion auf der Octagon C4-Baureihe basiert.

An allen Komponenten wurden im Vorfeld intensive Labortests durchgeführt. Diese erstreckten sich über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren und beinhalteten Untersuchungen zum Leistungs- und Verschleißverhalten. Ziel dieser Anstrengungen vor der ersten Installation in einem Markt war es, eine maximale Betriebssicherheit aller Komponenten zu gewährleisten.

### Sicherheitsaspekte

Die höchste Priorität bei der Konzeption dieser transkritischen CO<sub>2</sub>-Verbundkälteanlage hatte die „Anlagensicherheit“. Dabei stellt die hohe Drucklage (Auslegungsdruck 115 bar) auf den ersten Blick zwar eine Herausforderung dar, sie ist aber aus sicherheitstechnischer Sicht relativ einfach zu handhaben. So besitzt jeder Verdichter auf der Hochdruckseite einen elektronischen Druckschalter, der in Verbindung mit einem separaten Sicherheitsventil pro Verdichter gegen einen unzulässig hohen Betriebsdruck schützt. Zusätzlich zu diesem Schutzmechanismus überwacht die neu entwickelte VS3000C den Hochdruck und kann bei Bedarf in die Regelung eingreifen.

Alle Komponenten, die mit einem Druck von 40 bar belastet werden, sind vor Überschreiten dieses Drucks, z.B. durch ungewolltes Absperren von Behältern oder Rohrleitungsabschnitten, über Sicherheitsventile geschützt. Alle notwendigen Sicherheitsventile befinden sich außerhalb des Verkaufsraums und nicht in unmittelbarer Nähe von Personen.

Falls es zu einer schleichenden CO<sub>2</sub>-Leckage in einem Anlagenabschnitt kommt, der aufgrund des geringen Rauminhalts überwachungspflichtig ist, melden Sensoren den Austritt von Kohlendio-

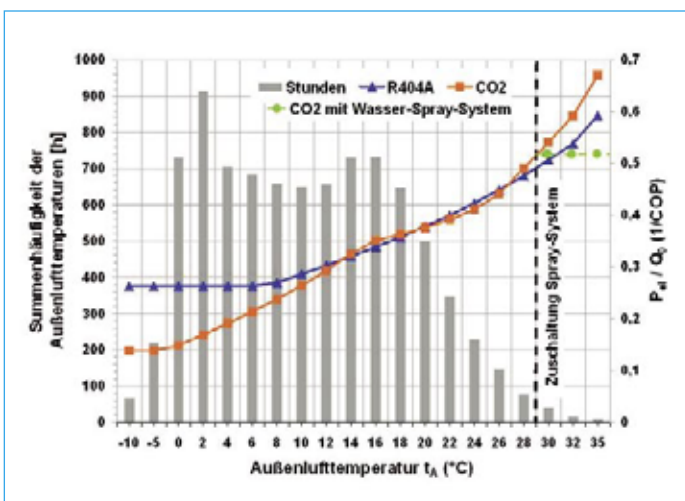


Bild 5 Vergleich des energetischen Verhaltens zwischen R404A und CO<sub>2</sub> (Normalkühlung, jeweils einstufige Verdichtung, Direktverdampfung, ohne WRG)

xid schon bei sehr geringen und für den Menschen völlig ungefährlichen Konzentrationen.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Verwendung von CO<sub>2</sub> als Kältemittel sowohl in der Normal- als auch in der Tiefkühlung kein sicherheitstechnisches Problem darstellt. Eine eingehende Schulung des Servicepersonals ist aber aufgrund des Umfangs und der Neuheit dieser Technik unerlässlich.

## Energieverbrauch

Betrachtet man die Aufwendungen für den Betrieb einer Verbundkälteanlage, so sind in erster Linie die Ausgaben für den elektrischen Energieverbrauch zu nennen. Ein oberflächlicher Vergleich der erzielbaren Leistungszahlen mit R404A und CO<sub>2</sub> ergibt bei hohen Außenlufttemperaturen deutliche Vorteile zu Gunsten des Standardkältemittels R404A. Zieht man die günstigen thermodynamischen und wärmetechnischen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> mit in die Betrachtung ein, so ergibt sich jedoch ein anderes Bild:

- Durch die bessere Wärmeübertragung mit CO<sub>2</sub> besteht die Möglichkeit am Möbel- bzw. Kühlraumverdampfer mit einer um 2 Kelvin erhöhten Verdampfungstemperatur im Vergleich zu R404A zu arbeiten.
- Durch die hohe Drucklage von CO<sub>2</sub> ergibt sich in der Saugleitung ein um 1 Kelvin reduzierter Sättigungstemperaturverlust im Vergleich zu R404A. Der Rücktransport des Öls zu den Verdichtern ist dabei weiterhin gewährleistet. Somit können die CO<sub>2</sub>-Verdichter in der Normalkühlung mit einem Saugdruck betrieben werden, der in der Summe einer um 3 Kelvin erhöhten Sättigungstemperatur gegenüber R404A entspricht.
- Die Besonderheiten der transkritischen Prozessführung und die guten Wärmeübertragungseigenschaften von CO<sub>2</sub> im Gaskühler ermöglichen eine Abkühlung des Druckgases bis nahe an die Lufttemperatur.
- Bei niedrigen Lufttemperaturen ist bei CO<sub>2</sub> eine Absenkung der Verflüssigungstemperatur bis auf ca. +5°C möglich, da durch das höhere Druckniveau von CO<sub>2</sub> auch bei diesen niedrigen Temperaturen noch ein ausreichend großer Differenzdruck zum Verdampfungsdruck besteht.

Bild 5 zeigt das Verhältnis der elektrischen Leistungsaufnahme zur Kälteleistung für die Kältemittel R404A und CO<sub>2</sub>. Weiterhin ist die Summenhäufigkeit der Außenluft-

temperaturen in Stunden für mitteleuropäische Verhältnisse angegeben. Die Berechnungen basieren auf realen Verdichterdaten und unter der Annahme der vorher beschriebenen Vorteile von CO<sub>2</sub>.

Für den unteren Außenlufttemperaturbereich sind deutliche energetische Vorteile für den Betrieb mit CO<sub>2</sub> zu erkennen, während im mittleren Temperaturbereich bis zu einer Außenlufttemperatur von +26°C die betrachteten Kältemittel die gleiche energetische Effizienz aufweisen. Ab einer Außenlufttemperatur von +28°C (überkritischer Betrieb) drehen sich die Verhältnisse, und die Kälteanlagen mit R404A arbeiten energetisch effizienter. Bei einer Außenlufttemperatur von +35°C beträgt der Unterschied im Energiebedarf 13%. Um diesen energetischen Nachteil bei hohen Außenlufttemperaturen zu vermeiden, ist ein CO<sub>2</sub>-Gaskühler mit einem Wasser-Spray-System aus dem Hause LUVE installiert (siehe Bild 6). Durch die Verdüsung des Wassers kann die Gaskühleraustrittstemperatur des CO<sub>2</sub>-Prozesses deutlich unter die Lufttemperatur abgesenkt werden, was den Energiebedarf während des Sommers erheblich reduziert und einen Anstieg des elektrischen Leistungsbedarfs bei Temperaturen oberhalb von +29°C vermeidet (siehe Bild 5). Eine solche kostengünstige Maßnahme führt bei anderen Kältemitteln, die einen Kondensationsprozess durchlaufen, zu einem geringeren Erfolg.









Nun gibt die Betrachtung der Leistungszahlen allein noch keinen genauen Aufschluss über den wirklichen jährlichen Energiebedarf. Zusätzlich muss der Einfluss der Summenhäufigkeit der Außenlufttemperaturen Berücksichtigung finden. Wie aus Bild 5 zu erkennen ist, wird die Kälteanlage in der überwiegenden Zeit des Jahres bei Außenlufttemperaturen unter +28°C betrieben. Nur an wenigen Stunden des Jahres treten Lufttemperaturen oberhalb von +30°C auf.

Jedoch haben noch weitere Einflussgrößen Auswirkungen auf den jährlichen Energieverbrauch:

- Die Lufttemperatur und die Luftfeuchte steigen in den Sommermonaten im Verkaufsraum an. Daraus ergibt sich ein höherer Kälteleistungsbedarf.
  - Die Lastanforderungen im Tagbetrieb sind höher als in der Nacht. Der Kälteleistungsbedarf ist bei höheren Außenlufttemperaturen somit größer.
  - Die Bausubstanz des Supermarkts und eine mögliche Klimatisierung beeinflussen die Luftfeuchte und -temperatur.
- Um eine genaue Aussage über den wirk-

lichen Jahresenergiebedarf machen zu können, werden in einem Zeitraum von drei Jahren sehr detaillierte Messungen durchgeführt. Ziel ist es, eine Reihe von CO<sub>2</sub>-Normalkühlanlagen an verschiedenen Standorten in Europa zu installieren, um auch den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen Rechnung zu tragen. Aufgrund der bereits vorliegenden Messdaten kann an dieser Stelle gesagt werden, dass es durchaus realistisch erscheint, eine CO<sub>2</sub>-Direktverdampfungsanlage in der Normalkühlung im Vergleich zu R 404A mit einem vergleichbaren energetischen Aufwand zu betreiben.

**Tabelle 3 Vergleich der Rohrleitungs-durchmesser mit Isolierung für unterschiedliche Kältesysteme (Kälteleistung 100 kW)**

| Art des Kältesystems                                  | Saugleitung/<br>Rücklauf                                                                        | Flüssigkeits-<br>leitung/<br>Vorlauf                                                            | Flächen-<br>verhältnis |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Direktverdampfung mit R404A als Kältemittel           | <br>76/102mm | <br>35mm     | 100%                   |
| Indirekt mit Sole als Kälte­träger                    | <br>76/140mm | <br>76/140mm | 337%                   |
| Indirekt mit CO <sub>2</sub> als Kälte­träger         | <br>54/118mm | <br>35/73mm  | 166%                   |
| Direktverdampfung mit CO <sub>2</sub> als Kältemittel | <br>42/68mm  | <br>22/48mm  | 60%                    |

### Investitionskosten

Wirft man einen Blick auf die momentanen Gesamtinvestitionskosten dieser CO<sub>2</sub>-Kälteanlage (Verbundanlage, Rückkühlsystem, Kälteverbraucher, Rohrleitungssystem), so ist aufgrund der Vielzahl von neu entwickelten Komponenten eine Kostenneutralität im Vergleich zu einem R 404A-Direktverdampfungssystem noch nicht zu erzielen.

Bei allen Hochdruckkomponenten handelt es sich um Prototypen, deren Kosten bei einer Marktreife dieser neuen Technik – und das ist gleichbedeutend mit hohen Stückzahlen – deutlich sinken werden. Somit liegen die Investitionskosten derzeit eher auf dem Niveau eines indirekten R 404A-Solesystems.

Neben einer zukünftigen Kostenreduzierung der neu entwickelten Komponenten durch höhere Stückzahlen, bietet das CO<sub>2</sub> durch die hohe Drucklage einen wesentlichen Vorteil bei der Installation des weit verzweigten Rohrleitungsnetzes im Supermarkt. In Tabelle 3 ist ein Größenvergleich der Rohrleitungen mit Isolierung für unterschiedliche Anlagensysteme dargestellt (bezogen auf eine Kälteleistung von 100 kW). Dabei wird die benötigte Querschnittsfläche der Flüssigkeits- und Saugleitung inklusive der Isolierung bei einer R 404A-Direktverdampfungsanlage als 100% gesetzt. Deutlich zu erkennen ist, dass die indirekten Systeme wesentlich mehr Querschnittsfläche benötigen als die Direktverdampfungssysteme, was sich nachteilig bei der Verlegung von Rohrleitungen in Kanälen, Schächten und unter

Kühlmöbelbaugruppen auswirkt. Gegenüber einer R 404A-Direktverdampfungsanlage reduziert sich die benötigte Querschnittsfläche bei einer CO<sub>2</sub>-Direktverdampfungsanlage nochmals um 40%. Somit können die Kosten für die Installation des Rohrleitungssystems bei einer CO<sub>2</sub>-Direktverdampfungsanlage im Vergleich zu anderen Systemen gesenkt werden.

Zusammenfassend wird eine generelle Bewertung verschiedener Anlagensysteme vorgenommen (Tabelle 4). Bei der Beurteilung bestehen bei den CO<sub>2</sub>-Direktverdampfungsanlagen hinsichtlich der Investitionskosten und bei den R 404A-Direktverdampfungsanlagen bezüglich des TEWI-Wertes noch Verbesserungspotenziale, wobei aus ökologischer Sicht das Kältemittel CO<sub>2</sub> immer Vorteile gegenüber R 404A aufweisen wird. Die indirekten Systeme bieten eine Möglichkeit, die Anlagenfüllmenge deutlich zu reduzieren, die Investitions- und Betriebskosten liegen aber deutlich über denen von Direktverdampfungsanlagen. Auch weisen diese Systeme in allen Bewertungspunkten kein wesentliches Potenzial zur Verbesserung auf.

### Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Projekt COOP Wettingen in der Schweiz ist ein erster Einstieg für die CO<sub>2</sub>-Technologie im Bereich der Normal- und Tiefkühlung in einem großen Lebensmittelmarkt erfolgt.

Die bei der Konzipierung der CO<sub>2</sub>-Kälteanlage durchgeführten energiespezifischen Berechnungen sowie erste vorlie-

gende Messdaten lassen erwarten, dass – im Unterschied zu indirekten Systemen mit Sekundärkühlmedien – mit der gewählten CO<sub>2</sub>-Technologie kein höherer Energiebedarf im Vergleich zu R 404A-Direktverdampfungsanlagen in Kauf genommen werden muss. Weitere Messdaten, die über den gesamten Jahresverlauf aufzunehmen sind, werden hierüber sowie über die betriebliche Zuverlässigkeit der Anlage weiteren Aufschluss erbringen.

Die Investitionskosten dieser überkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlage für die Normalkühlung liegen noch deutlich über denen von vergleichbaren R 404A-Direktverdampfungsanlagen, sie bewegen sich eher auf dem Niveau von Anlagen mit Sekundärkühlmedien. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass wesentliche Komponenten Neuentwicklungen darstellen, die nur in geringen Stückzahlen hergestellt werden. Zwar erfordern die wesentlich höheren Drücke in der CO<sub>2</sub>-Anlage einen höheren Aufwand für die Festigkeit von Komponenten und die Anlagensicherheit, sie beinhalten jedoch auch ein Potenzial zur Kostendegression durch die starke Reduzierung des Bauvolumens von Komponenten und insbesondere des in Supermärkten weit verzweigten Rohrsystems.

Die geplante Weiterführung dieser Entwicklung in Verbindung mit weiteren Installationen in Lebensmittelmärkten wird zeigen, ob und wie schnell das gesteckte Ziel, wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der CO<sub>2</sub>-Technologie mit R 404A-Direktverdampfungsanlagen in Supermärkten, erreicht wird. ■

| Art des Kältesystems                       | TEWI | Energiebedarf | Investitionskosten |
|--------------------------------------------|------|---------------|--------------------|
| R404A Direktverdampfung                    | +    | -             | +                  |
| CO <sub>2</sub> Direktverdampfung          | -    | +             | ○                  |
| R404A Indirektes System mit Sole           | ○    | -             | ○                  |
| NH <sub>3</sub> Indirektes System mit Sole | ○    | ○             | -                  |

+ gut ○ zufriedenstellend - unbefriedigend \* Verbesserungspotenzial

**Tabelle 4 Gesamtbewertung Umwelt/Energiebedarf/ Investitionskosten**

[L1] Haaf, S., Heinbokel, B.: Supermarktkälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln, Die Kälte- und Klimatechnik 55, 9/2002, S. 32–39

[L2] Haaf, S., Heinbokel, B.: Kälteanlagen für Supermärkte mit alternativen Kältemitteln, KI Luft- und Kältetechnik 39, 11/2003, S. 508–512