

**Umrüstung der Kälteversorgung eines Großtiefkühlagers
vom FCKW R 13 B1 auf natürliche Kältemittel**

Nestlé setzt auf NH₃ und den Kälte­träger CO₂

Holm Gebhardt, Schweiz

zum Autor

Dipl. Ing. Holm Gebhardt,
Nestec Ltd,
Vevey (CH),
Engineering
Department



Die Kältetechnik ist ein wichtiges Grundverfahren für die industrielle Nahrungs­mittelproduktion.

Sie spielt eine vitale Rolle für die Lagerung und Frischhaltung von Roh- und Fertigprodukten sowie als Verfahrensschritt im Produktionsprozeß für Eiskrem, Tiefkühlprodukte und gefriergetrockneten Kaffee. *Bild 1* gibt einen Überblick typischer Kälteanwendungen, Verdampfungstemperaturen und Kälteleistungen.

Großunternehmen der Nahrungsmittel­industrie haben nicht selten eine mehr als hundertjährige Tradition und sind heute weltweit tätig. Dabei wurden und werden alle Entwicklungen, Probleme und Trends der Kältetechnik aktiv und passiv durchlebt: vom Einsatz natürlicher Kältemittel (meist NH₃) zum gelegentlichen Einsatz von „Sicherheitskältemitteln“ (meist R 12 und R 22) und nun zurück zu natürlichen Kältemitteln. *Bild 2* illustriert die Situation, in der sich heutzutage ein verantwortlicher Kälteingenieur befindet.

Der Ausstieg aus den sogenannten Sicherheitskältemitteln aufgrund ihres Ozongefährdungs- bzw. Treibhauspotentials stellt viele Großkälteabnehmer vor die Frage der Alternative. Hiervon betroffen ist auch der weltweit tätige Nestlé-Konzern, denn zahlreiche Prozesse sind auf die Kältetechnik angewiesen. Auf der Suche nach technischen Lösungen hat Nestlé einen eigenen Kurs eingeschlagen, indem neben dem Kältemittel NH₃ auch CO₂ als Kälte­träger eingesetzt wird. Dies mit vielversprechenden Ergebnissen, die auch Argumente für den Einsatz von NH₃/CO₂ in anderen Bereichen der Kältetechnik liefern.

Typische Kälteanwendungen in der Nahrungsmittelindustrie

Anwendung	To (°C)	Qo (kW)
• Industrieklimatisierung	+/- 0	300 ... > 1000
• Milchverarbeitung	- 5	300 ... > 1000
• Süßwaren	- 5	300 ... > 1000
• Frischprodukte	- 25	500 ... >1000
• Tiefkühlkost	- 40	500 ... n x 1000
• Eiskrem	- 40	500 ... >1000
• Kaffee-Gefrier­trocknung	- 50	500 ... n x 1000

Quelle: für Bau & Betrieb von Kälteanlagen, Sicher - Zuverlässig - Wirtschaftlich
Alle To-Werte +/- 0,5

Bild 1



Bild 2

FCKW- und HFCKW-Problematik zwingt zu innovativen Lösungen

Die jüngste Vergangenheit und Gegenwart ist geprägt durch die Konsequenzen des umweltschädlichen Einflusses der FCKW- und HFCKW-Kältemittel. Bestehende Anlagen, die diese Kältemittel verwenden, mußten oder müssen auf andere umgerüstet werden.

Aus Schaden klug geworden, geben dabei viele Kälteanwender den traditionellen, natürlichen Kältemitteln *Wasser, Luft, Kohlenwasserstoffen, NH₃ oder CO₂* den Vorzug.

Für die industrielle Nahrungsmittelproduktion spielt zur Zeit NH₃ die größte Rolle als Ersatzkältemittel. In seiner über hundertjährigen Geschichte hat es sich als technisch bestes Kältemittel bewährt. Leider haben seine toxischen Eigenschaften unter gewissen Randbedingungen komplexe, zeitraubende und teure Genehmigungsverfahren sowie aufwendige Sicherheitsvorkehrungen zur Folge. Daher die berechtigte Suche nach Optionen. Und hier tritt das traditionelle Kältemittel CO₂ wieder auf den Plan.

CO₂ erfährt eine Renaissance

Schon vor hundert Jahren war CO₂ neben NH₃ das wichtigste Kältemittel. Dies bis zur Ära der sogenannten „Sicherheitskältemittel“, die ca. 1935 begann. Die Bedeutung von CO₂ für die Industriekälteerzeugung nahm dramatisch ab. CO₂ fand hingegen längere Verwendung als Kältemittel für Schiffskälteanlagen – das heißt entsprechendes technisches Know-how für Bau und Betrieb von CO₂-Kälteanlagen blieb bei traditionellen Kältefirmen erhalten.

Mit dem Aufkommen der ODP- und GWP-Problematik um 1990 wurden die Vorteile des Kältemittels CO₂ wiederentdeckt. Seine Anwendungsmöglichkeiten in der Kälte- und Wärmepumpentechnik wurden durch Weiterentwicklung der CO₂-Technologie den gegenwärtigen Marktanforderungen weitgehend angepaßt. Dabei lag der Schwerpunkt zunächst bei transkritischen Arbeitsprozessen für Wärmepumpen und Autoklimaanlagen relativ kleiner Leistung.

Um hohe Betriebsdrücke zu vermeiden und konkurrenzfähige Leistungsziffern (COP-Werte) zu erzielen, wurden in den letzten fünf Jahren auch zahlreiche subkritische CO₂-Prozesse mittels Kaskadenschaltung im Kälteleistungsbereich von 10 kW bis mehreren 100 kW realisiert.

Je nach Anwendungsfall (Supermarktkühlung, Eisbahnkühlung, Schockgefrieren, Kühlraumkühlung) und Auslegungsbedingungen (Kälteleistung, Nutz- und Verdampfungstemperatur) kommen zwei Kaskadenschaltungen in Frage.

Für die untere Temperaturstufe:

Verwendung von CO₂ als Kälte-träger mit Phasenwechsel (*Bild 3*).

Verwendung eines CO₂-Kompressionsprozesses, (*Bild 4*).

Für Anlagen großer Kälteleistung (z. B. > 500 kW) wird für die obere Temperaturstufe das natürliche Kältemittel NH₃ bevorzugt.

Im weiteren Verlauf des Beitrags erfolgt nun die Beschreibung eines Anwendungsfalles, der gemäß *Bild 3* realisiert wurde.

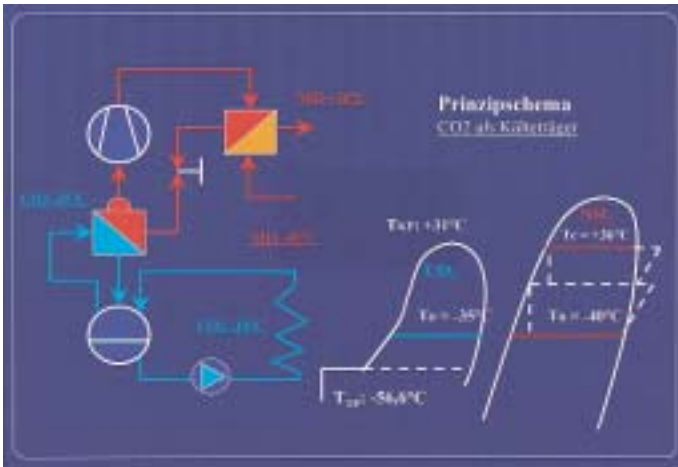


Bild 3

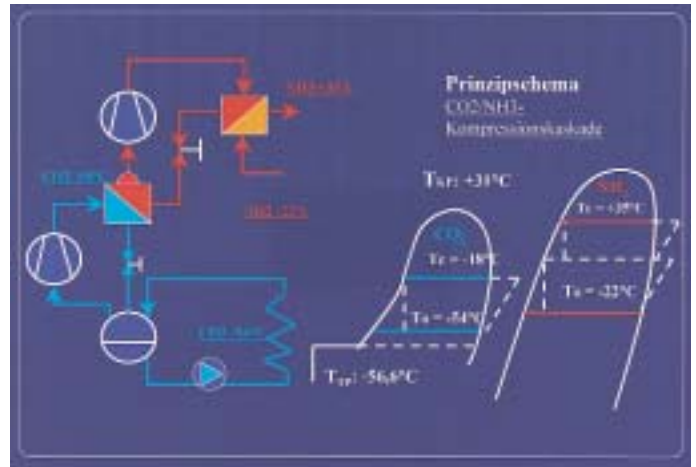


Bild 4

**„Tiefkühlager Beauvais, Frankreich“:
Kälteanlagensituation 1998**

Das Tiefkühlager Beauvais wurde in zwei Bauetappen 1971/1980 gebaut und mit einer R 13B1-Turbokälteanlage ausgerüstet. Bedingt durch das FCKW-Anwendungsverbot mußte das Ausstiegsprojekt in relativ kurzer Zeit durchgezogen werden: Es wurde Ende 1999/Anfang 2000 realisiert und beendete Nestlés systematisches FCKW-Ausstiegsprogramm für Großkälteanlagen.

Während bei vorausgegangenen Projekten R 12 oder R 13B1 durch NH₃ ersetzt wurden, ergab sich im Falle „Tiefkühlager Beauvais“ aufgrund spezifischer Randbedingungen (zeitraubendes Genehmigungsverfahren für NH₃, da NH₃-Füllmenge > 1,5 t!) die Notwendigkeit, eine technische Lösung für eine NH₃-Füllung (!) wesentlich unterhalb 1,5 t zu finden.

Die technischen Daten des Tiefkühlagers sind in Bild 5 wiedergegeben und geben eine Vorstellung von der Größenordnung des Objektes.

Bild 6 zeigt die Turbokompressoren, die zusammen mit allen anderen Komponenten des 27 Jahre alten R 13B1-Systems (Verflüssiger, Druckbehälter, Rohrleitungen, Luftkühler) demontiert und verschrottet wurden.

Kälteanlagenumbau 1999/2000

Untersuchte Alternativen

Drei verschiedene Lösungsmöglichkeiten wurden untersucht:

- NH₃-Direktverdampfung
- NH₃ & Sole (CaCl₂) (!)
- NH₃/CO₂-Kaskadenanlage (mit CO₂ als verdampfenden Kälteerzeuger)

Technische Daten des Tiefkühlagers

• Kühlraumvolumen	2 x 40.000 m ³
• Kühlraumlufttemperatur	-25/-30 °C
• Lagergut	Eiswolle, Tiefkühlkost
• Palettenanzahl	10.000 PALETTEN
• Installierte Kälteleistung*)	3 x 500 kW bei -45 °C / +32 °C, 1-Reserve
• Installierte Luftkühler*)	8 x 145 kW
• Kältemittelfüllung (R 13B1)†)	7,5 t

*) Vor Umrüstung auf CO₂/NH₃ †)

Bild 5



Bild 6

Wegen der örtlichen Randbedingungen war aufgrund behördlicher Auflagen und zeitlicher Begrenzung die Option „NH₃-Direktverdampfung“ nicht machbar, da die NH₃-Füllmenge das vierfache der

maximal zulässigen 1,5 t betragen hätte. Nach eingehender Studie wurde die kostengünstigere CO₂/NH₃-Version einem NH₃/CaCl₂-Solesystem vorgezogen.

Bei dieser Entscheidung spielte auch der Aspekt eine Rolle, daß Nestec aus verschiedenen Gründen daran interessiert war, eigene praktische Erfahrungen mit CO₂ als Kältemittel zu sammeln.

Bild 7 faßt die wichtigsten Argumente und Gesichtspunkte zusammen, die für die Entscheidung erörtert und in Betracht gezogen wurden.

Realisierte CO₂/NH₃-Kälteanlage

Die neue Anlage wurde für eine Nennkälteleistung von 1200 kW bei -36 °C CO₂-Verdampfungstemperatur bemessen. Die NH₃-Füllmenge blieb planmäßig unter 1,5 t. Bild 8 und Bild 9 liefert weitere interessante technische Daten und Merkmale. Bild 10 zeigt eine Außenansicht des Tiefkühlagers und des neuen Maschinenraumes während der Montagezeit im Frühjahr 2000.

Das Schema des NH₃-Kreislaufes (Bild 11) illustriert den prinzipiellen Aufbau: 3 Kompressoren (1 × Reserve), 1 Economiser, 1 Verdunstungsverflüssiger, 2 Kaskaden-Wärmeaustauscher CO₂/NH₃.

Argumente "FürGegen" bezüglich NH₃/CO₂-Kaskadenanlage

(+) Argumente

- Kältemittelfüllung (NH₃)
 - ~ 1,5 t. Schwere Baugemeinschaft!
 - NH₃ nur im Maschinenraum!
- CO₂-ist
 - Altbekanntes Kältemittel
 - natürliches & umweltfreundliches Kältemittel
 - Kältemittelcharge 1 d.h. nicht toxisch
 - Kein Risiko bezüglich Produktkontamination
 - Effizient als verdampfender Kältebringer
 - Preiswert

(-) Argumente

- Höherer Betriebsdruck
- Komplexer, teurer, niedriger COP (Vergleich: NH₃)
- "Heliumgasproblematik" bezüglich Luftkühler-Abstrahlung

Bild 7

Technische Daten der neuen CO₂/NH₃-Kälteanlage

Typ	NH ₃ /CO ₂ -Kaskade
NH ₃ -Füllung	1300 kg
CO ₂ -Füllung	6000 kg
NH ₃ -Kompressoren	3 x AERZEN WMY 346 NR je 600 kW bei -40 / +35 °C (1 x Reserve); Motor 450 kW mit Frequenzumwandler
Kaskaden-Wärmeaustauscher	2 Röhrenkessel-WT: 650x5600; 800 kW, -40/-56°C
Kühlraumluftkühler	11 x 150 kW; -25/-20°C, Incol/Aluminium CO ₂ -Pumpenbetrieb n = 3 CO ₂ -Druckgasabtauung +5°C/42 bar

Bild 8

Letztere sind als Röhrenbündel-Wärmeübertrager mit einfachen Rohrböden ausgeführt. Besondere Aufmerksamkeit galt dem Leckagerisiko CO₂ → NH₃. Dabei kamen in der Kohlen-säurerückgewinnungsindustrie hundertfach erprobte Konstruktions- und Qualitätskontrollprinzipien zur Anwendung. In Anbetracht des Wertes der gelagerten Fertigprodukte (Eiskrem



Bild 9

Bild 10

und Tiefkühlkost) wurden aus zusätzlichen Sicherheitserwägungen 2 Apparate installiert.

Das Schema des CO₂-Kreislaufes (Bild 12) zeigt die wesentlichen Systemkomponenten: Den CO₂-Pumpenbehälter/Flüssigkeitsabscheider, 3 CO₂-Rezirkulationspumpen, 8 Luftkühler mit individuellen CO₂-Druckgaserzeugern (dampfbeheizte Wärmeübertrager). Dazu die oben erwähnten Kaskaden-Wärmeaustauscher und das CO₂-Rückverflüssigungsaggregat zur Druckbegrenzung bei Stillstand der Hauptanlage.

Das Abtauen von Verdampfern mit CO₂ als Kältemittel war und ist ein besonderes Thema, da aufgrund des gewählten Kälteprozesses kein „Heißgas“ zum Abtauen zur Verfügung steht. Es bestehen zwei Möglichkeiten:

- Elektrisch oder mittels Wasser
- CO₂-Druckgas für e. g. +5/+10 °C Kondensationstemperatur d. h. 40/45 bar. Druckgas dieser Qualität kann entweder mechanisch (CO₂-Kompressor) oder thermisch (CO₂-Verdampfer) erzeugt werden.

Dafür stellt man CO₂-Druckgas von genügend hohem Druck bereit: Für +5/+10 °C Kondensationstemperatur sind 40/45 bar erforderlich. Das Druckgas kann entweder mechanisch (CO₂-Kompressor) oder thermisch (CO₂-Verdampfer) erzeugt werden.

Im Falle Beauvais wird CO₂-Druckgas zur Luftkühlerabtauung verwendet. Bild 13 und Bild 14 zeigen das Prinzip der Verdampferabtauung sowie Diagramme

Bild 12

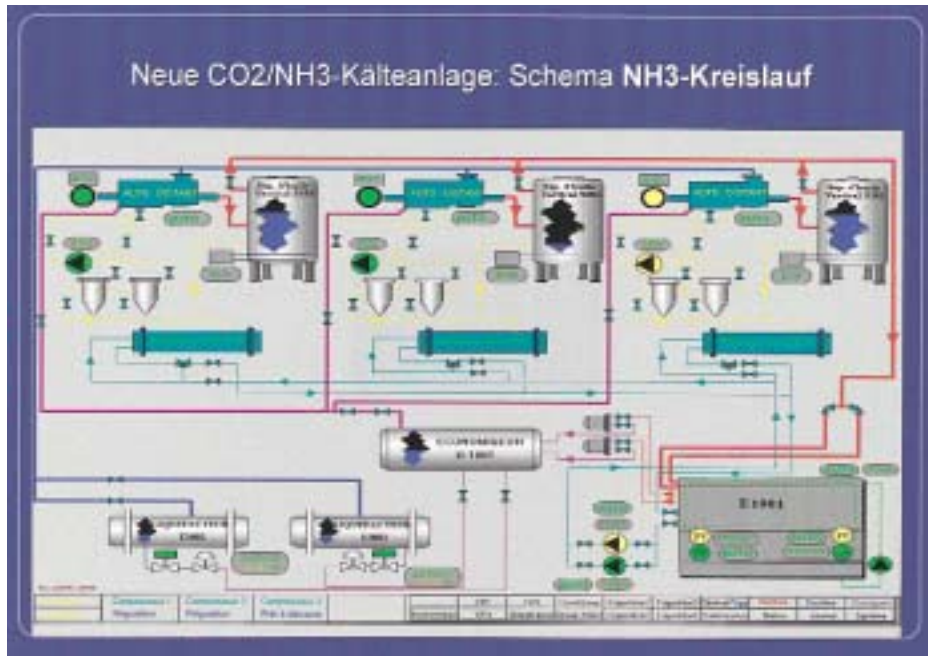
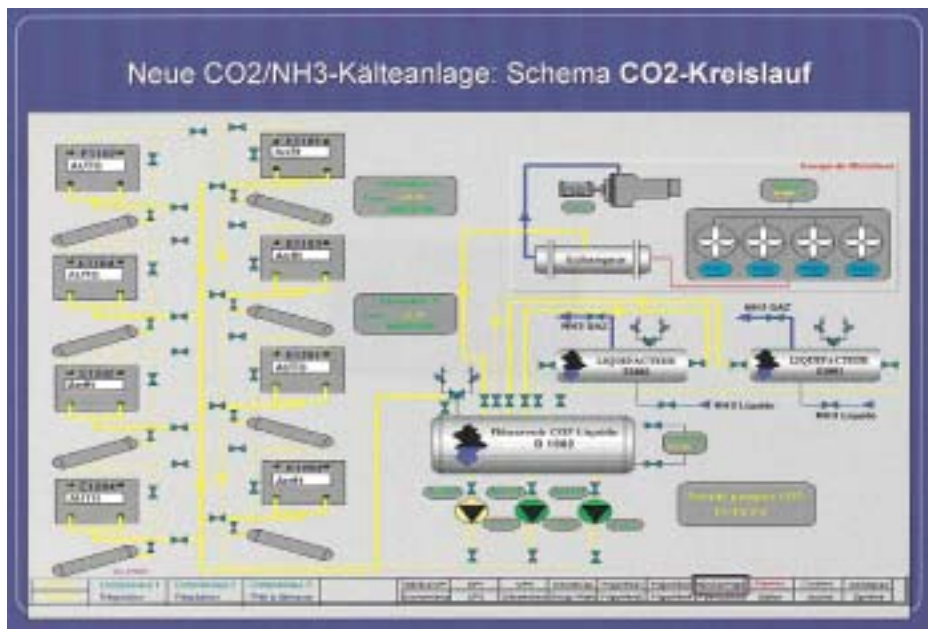


Bild 11



für Temperatur- und Druckverlauf bei einem typischen Abtauzyklus.

CO₂-Druckgas wird mittels Frischdampf von 4 bar erzeugt. Der Abtauvorgang wird CO₂seitig im obengenannten Temperatur- und Druckbereich gefahren und beträgt maximal eine Stunde pro Luftkühler.

Schlußfolgerungen und Ausblick

Die beschriebene Anlage wird seit 12 Monaten erfolgreich betrieben. Das gewählte Konzept CO₂/NH₃ stellt einen Meilenstein in der Geschichte der Kältetechnik dar und ist der Vorläufer zu weiteren ähnlichen und größeren Installationen. Weitere Projekte gemäß der Schaltung in Bild 4 sind bereits in der Ausführung. Die Vorteile und Herausforderungen dieser CO₂/NH₃-Technologie sind in Bild 15 noch einmal gegenübergestellt.

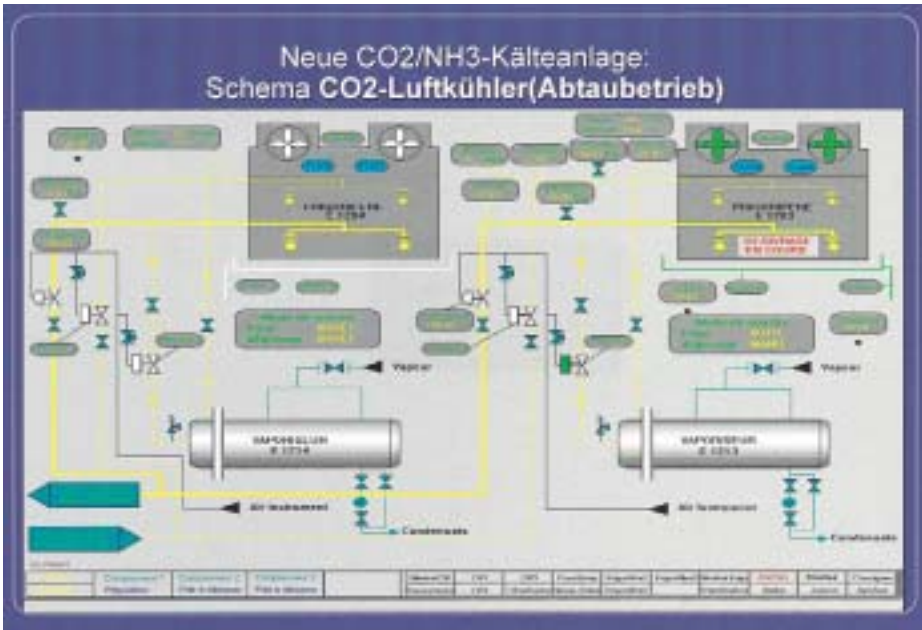


Bild 13

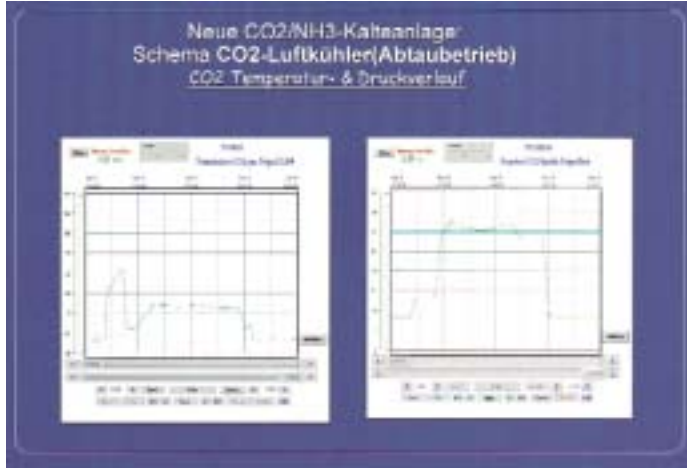


Bild 14

CO₂(R-744) als Kältemittel in NH₃/CO₂-Kaskadensystem

Hauptvorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Po → Patmos !! + q_{vol} (kJ/m³) ca. 8x höher als für NH₃ !! + Ermöglicht geringere NH₃-Füllmenge Ziel: < 3(1,5) t + Kleinere Sicherheitsrisiko weniger NH₃ und nur in MR + Erleichtert Genehmigungsverfahren (USA, F, D, Japan, ... !!) + Kostenkompositiv: Investitions- & Betriebskosten! 	<ul style="list-style-type: none"> + Hoherer Konstruktionsdruck als für NH₃: z.B. 30(>40) anstatt 16 bar + Niedriger Krit. Pkt. → Kaskadenschaltung (z.B. NH₃/CO₂) nötig + Mit NH₃ als Hochtemper. Kältemittel Kaskaden-WT muss leak-proof sein → chem. Reaktion CO₂ / NH₃ !! + Problem: Öl/LCO₂ bei CO₂-Kompressionskaskade mit To<-40 / -50 °C + CO₂ Tripelpunkt -56,6 °C begrenzt untere Nutz-To auf ca. -64 °C

Bild 15

Zusammenfassung

Viele Kälteanlagenbetreiber waren und sind aufgrund der FCKW- und HFCKW- Problematik dazu gezwungen, bestehende Anlagen auf andere Kältemittel umzurüsten. In der Nahrungsmittelindustrie betrifft dies vor allem Industriekälteanlagen großer Leistung und Kältemittelfüllung: Anlagen für die Fabrikation von Tiefkühlkost, Eiskrem und Kaffeefriertrocknung sowie für Tiefkühlager sind typische Beispiele. Solche Anlagen haben häufig Kältemittelfüllungen von mehr als 5 t und nicht selten von sogar mehr als 50 t.

Für die Umstellung derartiger Anlagen sowie für Neuanlagen ähnlicher Größenordnung kommen gemäß der Nestlé-Konzernstrategie nur natürliche Kältemittel in Frage. Für obengenannte Anwendungsfälle sind dies NH₃ und, seit 1999, CO₂. □

Literatur:

- [1] W. R. Kitzmiller: „Advantages of CO₂-Ammonia System for Low-Temperature Refrigeration“, Power, January 19, 1938, 92-95
- [2] C. Svarregaard: „CO₂ as a refrigerant – Status as well as future Perspectives within Industry and Commerce“, Sabroe Refrigeration A/S, September 1996
- [3] International Institute of Refrigeration: 15th Informatory Note on Refrigerants – „Carbon Dioxide as a Refrigerant“, February 2000
- [4] H. Renz: „Halbhermetische Hubkolben- und Schraubenverdichter für CO₂-Kaskadensysteme“, KI Luft- und Kältetechnik 9/2000, S. 409/412
- [5] T. M. Hansen, K. G. Christensen, G. Minds, S. Tanderup: „CO₂ as Refrigerant in new and existing Plate Freezers“, IIF-IIR-Commission C2-Bristol, UK-2001
- [6] H. König: „CO₂ als Kältemittel – erste Erfahrungen bei tiefen Temperaturen“, FKW-Seminar, 21. Juni 2001