

Supermarktkälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln

Erfahrungsbericht

Siegfried Haaf und Bernd Heinbokel, Köln

Wegen des beträchtlichen Treibhauspotentials von HFKW-Kältemitteln werden seit Jahren Anstrengungen unternommen, um den von diesen Stoffen ausgehenden Treibhauseffekt zu reduzieren. Neben Maßnahmen zur Verminderung von Leckagen sowie zur Verringerung von Kältemittel-Füllmengen wurden im Laufe der letzten 10 Jahre von Linde auch zahlreiche Kälteanlagen mit den natürlichen Kältemitteln Ammoniak, Propen und Kohlendioxid in Supermärkten installiert. Auf Basis der gesammelten Erfahrungen wird eine Einschätzung der umweltspezifischen und wirtschaftlichen Aspekte im Vergleich zu Anlagen mit HFKW-Kältemitteln vorgenommen.

Tabelle 1 zeigt die umweltrelevanten Daten einer R 404A-Direktverdampfungsanlage für einen Supermarkt mittlerer Größe. In den letzten Jahren ist es gelungen, die durchschnittlichen Leckageraten von 10 % auf 5 % zu reduzieren, für zukünftige Anlagen erscheinen Werte von ca. 2 % erreichbar. Parallel hierzu erfolgte eine Füllmengenreduzierung um 15 %, weitere 15 % werden angestrebt. Der Anteil des vom Kältemittel ausgehenden direkten Treibhauseffekts vermindert sich hierdurch von ca. 50 % auf ca. 30 % bzw. 10 % des Gesamteffekts.

Neben den Maßnahmen zur Verminderung von Leckagen sowie zur Verringerung von Kältemittel-Füllmengen wurden im Laufe der letzten 10 Jahre von Linde auch zahlreiche Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln in Supermärkten in-

stalliert. Auf Basis der gesammelten Erfahrungen wird eine Einschätzung der umweltspezifischen und wirtschaftlichen Aspekte im Vergleich zu Anlagen mit HFKW-Kältemitteln vorgenommen.

Alternative Kältemittel

Tabelle 2 zeigt neben HFKW R 404A alternative natürliche Kältemittel für Supermärkte. Wegen der Toxizität von Ammoniak und der Brennbarkeit von Propen kommen für diese Kältemittel nur Anlagen mit indirekter Kühlung in Betracht. Mit Kohlendioxid wurden wegen der hohen Drucklage bisher nur Kaskadenanlagen für den Tiefkühlbereich realisiert.

Nachstehend wird über ausgeführte Anlagen mit den natürlichen Kältemitteln

Tabelle 1 Treibhauseffekt von R 404A-Verbundkälteanlagen für Supermärkte

Kältebedarf in kW ¹⁾	100		
Jahresenergieverbrauch in kWh/a ¹⁾	170 000		
Indirekter Treibhauseffekt in t CO ₂ /a ²⁾	102		
Kältemittelfüllmenge in kg ¹⁾	300	250	200
Leckagerate in %/a der Füllmenge	10	5	2
Direkter Treibhauseffekt in t CO ₂ /a ³⁾	98	41	13
Gesamter Treibhauseffekt TEWI in t CO ₂ /a	200	143	115
Anteil des direkten Treibhauseffekts in %	49	29	11

¹⁾ Verkaufsfläche 1000 bis 1500 m²

²⁾ 70 %-Anteil fossiler Brennstoffe bei der Stromerzeugung

³⁾ GWP = 3260 (bezogen auf CO₂ bei einem Zeithorizont von 100 Jahren)

zu den Autoren

Dipl.-Ing. Siegfried Haaf,
Leiter Entwicklung Kältesysteme, Linde AG, Geschäftsbereich Linde Kältetechnik, Köln



Dipl.-Ing. Bernd Heinbokel,
Vorentwicklung Kältesysteme, Linde AG, Geschäftsbereich Linde Kältetechnik, Köln



berichtet. Auf die neuere Technik mit CO₂ wird hier etwas ausführlicher eingegangen, da über Ammoniak- und Propenanlagen bereits mehrere Veröffentlichungen vorliegen [1–5].

Anlagen mit Kältemittel Ammoniak

Seit 1994 wurden von Linde in verschiedenen europäischen Ländern in ca. 60 Supermärkten Ammoniak-Kälteanlagen installiert. Die Kälteleistungen betragen im Normalkühlbereich 80–400 kW und im Tiefkühlbereich 20–80 kW. Überwiegend

Kältemittelbezeichnung	ODP	GWP ¹⁾	Toxizität	Brennbarkeit	Druck bei Siedetemperatur von			Bemerkung
					-35 °C	-10 °C	+45 °C	
HFKW R404A	0	3260	nein	nein	1,7	4,4	20,5	Standard in EU
Ammoniak (NH ₃)	0	0	ja	ja ³⁾	0,9	2,9	17,8	nur mit Kälte­träger
Propen (C ₃ H ₆)	0	3	nein	ja	1,7	4,3	18,4	nur mit Kälte­träger
Kohlendioxid (CO ₂)	0	1	nein ²⁾	nein	12,0	26,5	⁴⁾	für TK als Kaskade

¹⁾ Bezogen auf CO₂ bei einem Zeithorizont von 100 Jahren

²⁾ Erst über 3–5 Vol.-% gesundheitsschädigend

³⁾ Brennbarkeit gering, keine Maßnahmen für Explosionsschutz erforderlich

⁴⁾ Überkritisch

Tabelle 2 Alternative Kältemittel für Supermarkt-Kälteanlagen

sind die Anlagen entsprechend dem im Bild 1 dargestellten Prinzipschema ausgeführt. Wegen der hohen Verdichtungstemperaturen von Ammoniak ist für die Tiefkühlung eine 2stufige Verdichtung erforderlich.

Als Verdichter werden offene Hubkolben- und Schraubenverdichter, als Verdampfer Bündelrohrapparate mit Trockenexpansion und überflutet betriebene Shell und Plate-Wärmetauscher verwendet. Der Kälte­transport zu den Kühlstellen erfolgt im Normalkühlbereich mit Glykol-Wassergemischen oder Lösungen organischer Salze, im Tiefkühlbereich ebenfalls mit Lösungen organischer Salze sowie mit Kohlendioxid.

Erfahrungen mit Ammoniak-Kälteanlagen:

- Erfahrungszeitraum: 8 Jahre.
- Betriebssicherheit zufriedenstellend, anfänglich Probleme bei Anlagen mit NH₃-löslichem Schmieröl.

- Keine sicherheitstechnischen Probleme.
- Investkosten: 20 bis 35 % höher als bei R 404A-Direktverdampfung wegen teuren NH₃-Komponenten, zusätzlichem Aufwand für Kälte- und Wärmeträgerkreislauf und für sicherheitstechnische Maßnahmen.
- Energieverbrauch: 10 bis 20 % höher als bei R 404A-Direktverdampfung durch Pumpen im Kälte- und Wärmeträgerkreislauf und ungünstigere Bedingungen für Verdampfungs- und Kondensationstemperatur.

Anlagen mit Kältemittel Propen

In 4 verschiedenen Ländern sind seit 1996 17 Supermärkte mit Propen-Kälteanlagen von Linde in Betrieb genommen worden. Die Kälteleistungen dieser Anlagen sind mit 20–190 kW im Normal- und mit 10–50 kW im Tiefkühlbereich meist kleiner als die mit Ammoniak betriebenen Anlagen. Dies ist auf die im Vergleich zu Ammoniak bessere Verfügbarkeit von

Komponenten für kleine Leistungen zurückzuführen, da für Propen weitgehend Komponenten für HFKW-Kältemittel eingesetzt werden können.

Wie aus dem in Bild 3 gezeigten Schema erkennbar, ist bei Propen auch für die Tiefkühlung eine 1stufige Verdichtung mit halbhermetischen Hubkolbenverdichtern möglich. Die Verdampfer sind mit Trockenexpansion in Bündelrohr- oder Plattenbauweise ausgeführt. Es werden dieselben Kälte­träger wie bei den Ammoniak-Anlagen eingesetzt.

Von besonderer Bedeutung bei Kohlenwasserstoff-Kälteanlagen sind die sicherheitstechnischen Maßnahmen. Diese sind entsprechend dem DIN-Entwurf 7003 ausgeführt, insbesondere sind folgende Punkte wesentlich:

- Elektrische Komponenten mit Mindestschutzart IP54 und funkenfrei schaltende Geräte.
- Bei Maschinenraum-Aufstellung gute mechanische Belüftung und Überwachung mit Gassensor.
- Spezifisch geschulte Kundendiensttechniker.

Einige Anlagen konnten in luftgekühlter Kompaktbauweise mit Aufstellung im Freien realisiert werden (Bild 4). Diese Bauart ist die wirtschaftlich günstigste Ausführung, da der gesamte Wärmeträgerkreislauf entfällt. Neben einer Verringerung der Investkosten wirkt sich dies auch auf die Betriebskosten günstig aus, da der Energiebedarf der Wärmeträgerpumpe entfällt und die Kondensationstemperatur gesenkt wird.

Erfahrungen mit Propen-Kälteanlagen:

- Erfahrungszeitraum: 6 Jahre.
- Gute Betriebssicherheit.
- Keine sicherheitstechnischen Probleme, Ausführung nach DIN-Entwurf 7003 hat sich bewährt.
- Aus sicherheitstechnischen Gründen ist die Akzeptanz in vielen Ländern gering (Unsicherheit bei Genehmigungsverfahren).
- Investkosten: 15 bis 25 % höher als bei R 404-Direktverdampfung wegen zusätzlichem Aufwand für Kälte- und Wärmeträgerkreislauf und für sicherheitstechnische Maßnahmen.

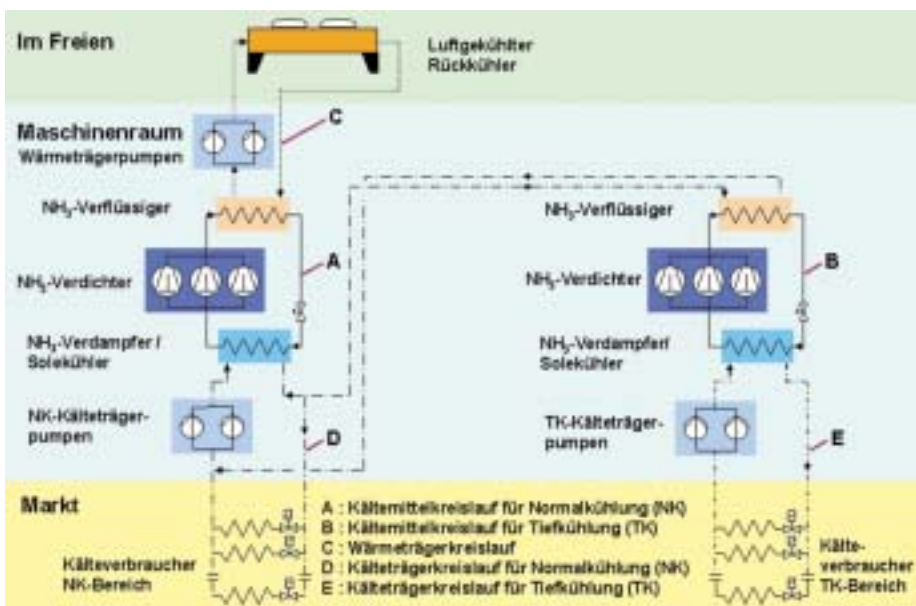


Bild 1 Prinzipschema einer Ammoniak-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung

Bild 2 NH₃-Solekühlanlage mit Hubkolbenverdichtern



- Energieverbrauch: 5 bis 20 % höher als bei R 404A-Direktverdampfung durch Pumpen im Kälte- und Wärmeträgerkreislauf und ungünstigere Betriebsbedingungen für Verdampfungs- und Kondensationstemperatur.
- Die günstigsten Werte für Investkosten und Energieverbrauch weist die luftgekühlte Ausführung ohne Wärmeträgerkreislauf auf.

Tiefkühlkälteanlagen mit dem Kältemittel CO₂

Mit dem Einsatz von CO₂ als Kältemittel wurde von Linde ein weiterer Schritt in Richtung umweltfreundliche Kältetechnik für Lebensmittelmärkte unternommen. Ziel dieser Ende 1998 begonnenen Ent-

wicklung mit CO₂-Direktverdampfung in der Tiefkühlung ist ein umweltfreundliches Kühlkonzept ohne die für indirekte Systeme typischen wirtschaftlichen Nachteile, wie sie bei Ammoniak und Propen unvermeidbar sind.

Seit Ende 2000 wurden von Linde in 10 Supermärkten Tiefkühlkälteanlagen in Kaskadenausführung mit CO₂ als Kältemittel realisiert. In Bild 5 ist eine Ausführung mit einer R 404A-Verbundkälteanlage für den NK-Bereich dargestellt. Einige Anlagen werden im NK-Bereich auch indirekt mit NH₃-Kälteanlagen betrieben. Es liegen nun praktische Betriebserfahrungen im Leistungsbereich zwischen 15 kW und 80 kW vor.

CO₂ zeichnet sich durch eine gute Materialverträglichkeit aus, so daß buntmetallhaltige Komponenten und halbherme-

tische Verdichter eingesetzt werden können. Die Verdichter sind für den Einsatz bei der höheren Drucklage (25/40 bar), z. B. durch die Anpassung des Hubvolumens auf die Motorleistung, überarbeitet worden. Die Schmierung der Gleitlager im Verdichter wurde modifiziert, da die höhere Drucklage eine relativ hohe Löslichkeit von CO₂ im POE-Öl bedingt. Auf der anderen Seite unterstützt die gute Löslichkeit den Rücktransport des Öles aus dem verzweigten Rohrleitungsnetz im Markt.



Bild 4 Im Freien aufgestellte luftgekühlte Propen-Kälteanlage für einen Discountmarkt

Der hohe maximale Betriebsüberdruck von 40 bar ermöglicht die sichere Handhabung von Verflüssigungstemperaturen bis 0 °C, welche im Gewerbebereich für die Ausführung einer TK-Kälteanlage in Kaskade zu einer NK-Kälteanlage notwendig sind. So kann bei der NK-Kälteanlage sogar die energieeffiziente Nachtanhebung der Verdampfungstemperatur ohne Probleme ausgeführt werden.

Der Feuchtegehalt im CO₂ wird zuverlässig mit Filtertrocknern begrenzt und mittels eines Indikatorschauglases überwacht. Für die Einspritzregelung an den

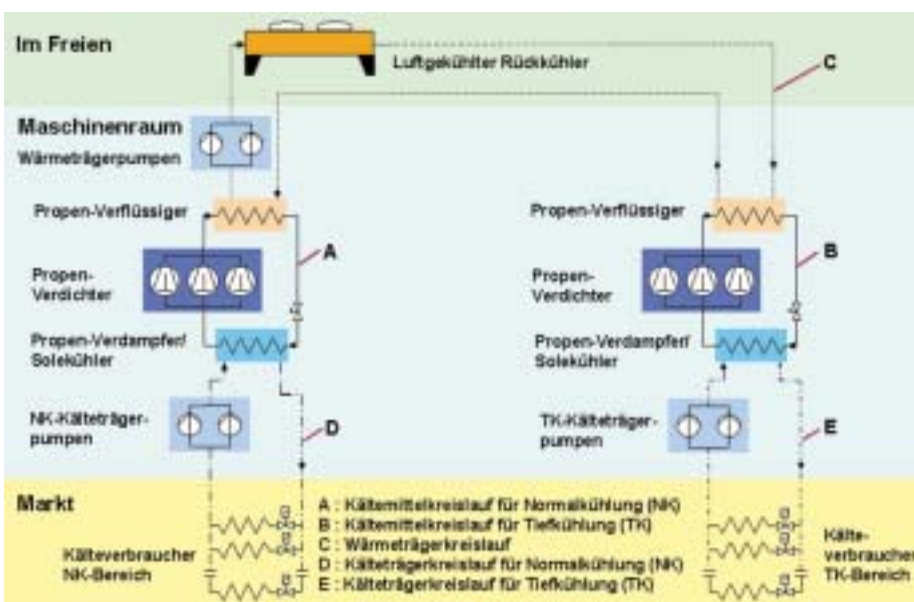


Bild 3 Prinzipschema einer Propen-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung

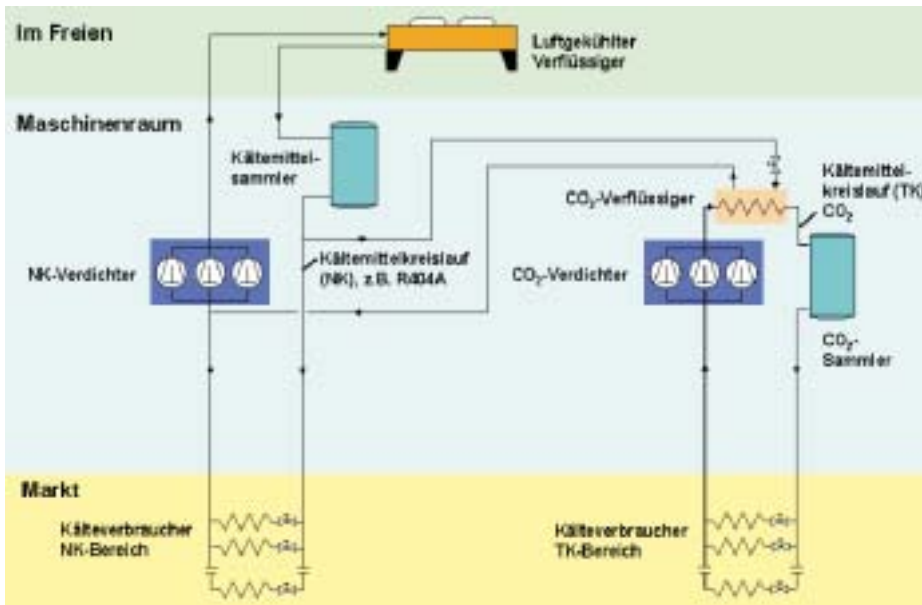


Bild 5 Prinzipschema einer CO₂-Tiefkühlanlage in Kaskadenschaltung mit einer NK-Verbundkälteanlage

Kälteverbraucher stehen für CO₂ elektronische Expansionsventile zur Verfügung.

Der TK-Verbundkältesatz wird auf Grund der im Vergleich zu R 404A ca. 6fach höheren volumetrischen Kälteleistung von CO₂ außerordentlich kompakt (Bild 6). Des Weiteren kann die Saugleitung 3–4 Nennweiten und die Flüssigkeitsleitung 1–2 Nennweiten kleiner als der R 404A-Standard dimensioniert werden. Dies spiegelt sich auch in einer deutlichen Füllmengenreduzierung, in einer Vereinfachung der Isolierung und in einer problemlosen Verlegung von Leitungen in



Bild 6 CO₂-Tiefkühlverbundsatz

Schächten und unterhalb von Kühlmöbelgruppen wider.

Anlagensicherheit

Das Kältemittel CO₂ ist wie R 404A nach der DIN EN 378 in der Gruppe 1, die für nicht brennbare und mindergiftige Stoffe gilt, klassifiziert. Da CO₂ in einer Konzentration von über 3–5 % in der Raumluft als gesundheitsschädigend gilt, wird jeder Kühlraum und der Maschinenraum mit CO₂-Sensoren zur Überwachung der CO₂-Konzentration ausgestattet. Jede absperrbare Möbel-/Verbrauchergruppe wird gegen Überdruck abgesichert.

Bei eventuellem Totalausfall der NK-Anlage wird der Druckanstieg im CO₂-Kreislauf durch ins Freie abblasende Sicherheitsventile begrenzt. Das Abblasen des Kältemittels ist aus Umweltsichtpunkten unkritisch, da 100 kg CO₂ das gleiche Treibhauspotential wie 30 g des üblicherweise eingesetzten Kältemittels R 404A haben (Tabelle 2). Das Wiederbefüllen ist auf Grund der kleinen Füllmengen und dem niedrigen CO₂-Preis schnell und kostengünstig durchzuführen.

Investitionskosten

Die Technologie mit CO₂-Direktverdampfung weist Kostenvorteile durch kleinere CO₂-Verdichter und durch den deutlich geringeren Aufwand für Verrohrung und Isolierung auf. Diese Einsparungen kompensieren die Aufwendungen für die CO₂-Sicherheitstechnik und die notwendigen Modifikationen von Komponenten auf Grund der höheren Drucklage. Hierdurch gelingt es mit dieser umweltfreundlichen Technik nahezu auf das Investitionsniveau von R 404A-Direktverdampfungsanlagen zu kommen.

Energetische Betrachtungen

Mit dem Kältemittel CO₂ und Direktverdampfung ist ein Kältesystem realisierbar, welches praktisch keine erhöhten Betriebskosten gegenüber R 404A-Direktverdampfung aufweist. Dies wird unter anderem mit den folgenden Maßnahmen erreicht:

Im Vergleich zu R 404A kann mit CO₂ am Möbel- bzw. Kühlraumverdampfer mit einer um 2 K höheren Verdampfungstemperatur gearbeitet werden. Hier wirken sich die günstigen Wärmeübertragungseigenschaften von CO₂ in den Kühlmöbelverdampfern aus. Zusätzlich ist es durch die höhere Drucklage des CO₂ im Vergleich zu R 404A möglich, den Druckverlust in der Saugleitung, bei sichergestelltem Rücktransport des POE-Öles, entsprechend ca. 1 K zu reduzieren. So lässt sich der CO₂-Verdichter mit einem entsprechend ca. 3 K höheren Saugdruck betreiben, wodurch sich der energetische Nachteil der Kaskadenschaltung ausgleicht.

Erfahrungen mit CO₂-Kälteanlagen

- Erfahrungszeitraum: ca. 2 Jahre.
- Gute Betriebssicherheit.
- Gute Akzeptanz bereits in mehreren Ländern.
- Investkosten: Nahezu wie bei R 404A, da die Mehraufwendungen für die NK-Anlage, die höhere Drucklage, modifizierte Verdichter und zusätzliche Sicherheitstechnik den Kostenreduzierungen durch erhebliche Verkleinerung von Verdichtern und Rohrleitungen gegenüberstehen.
- Energieverbrauch: Wie bei R 404A, da der Mehrverbrauch wegen des Kaskadenbetriebs durch die höhere Verdampfungstemperatur kompensiert wird.

Zusammenfassung

Aus den mit zahlreichen Anlagen gewonnenen Erfahrungen kann geschlossen werden, daß mit natürlichen Kältemitteln umweltfreundliche und betriebssichere Kälteanlagen in Supermärkten installiert werden können. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, müssen bei Verwendung der Kältemittel Ammoniak und Propen jedoch erhebliche wirtschaftliche Nachteile in Form höherer Invest- und Betriebskosten in Kauf genommen werden.

Für den Tiefkühlbereich bietet CO₂ zukünftig gute Chancen für eine umweltfreundliche und wirtschaftlich akzeptable Lösung. Die Entwicklungsarbeiten werden hier intensiv weitergeführt. Im Normalkühlbereich ist wegen der sehr hohen Arbeitsdrücke von CO₂ mit über 100 bar und der überkritischen Betriebsweise ein wirtschaftlicher Einsatz dieses natürlichen Kältemittels in näherer Zukunft nicht zu erwarten. Die Anstrengungen zur Steigerung der Umweltfreundlichkeit müssen sich hier hauptsächlich auf die Reduzierung der HFKW-Füllmengen und auf Verringerung von Leckagen konzentrieren (Tabelle 1 und 3). □



Bild 7 CO₂-gekühlte Tiefkühlinseln vor Sole-gekühlten Regalen mit Molkereiprodukten

Literatur

- [1] Haaf, S., Mall, K. und Rinne, F.: Natürliche Stoffe in der Kältetechnik, Die Kälte- und Klimatechnik 49, 2/1996.
- [2] Haaf, S.: Erster Supermarkt mit Propen-Kälteanlage eröffnet, Die Kälte- und Klimatechnik 49, 9/1996.
- [3] Haaf, S.: Umweltfreundliche Kälteanlagen mit Kältemittel NH₃, Linde Berichte aus Technik und Wissenschaft 74, 1996.
- [4] Haaf, S.: Propen-Kälteanlagen – umweltfreundliche Kältesysteme für kleine und mittlere Supermärkte, Linde Berichte aus Technik und Wissenschaft 77, 1998.
- [5] Helmke, Th.: NH₃-Verbundanlagen mit Schraubenverdichtern kleiner Leistung, Die Kälte- und Klimatechnik 53, 5/2000.
- [6] Heinbokel, B.: CO₂ als Kälte-träger und Kältemittel in der Supermarkt-Tiefkühlung, KI Luft- und Kältetechnik 37, 10/2001.

Nr.	Kältemittel/Anlagenart		Gesamter Treibhauseffekt TEWI	Energieverbrauch	Investkosten
	NK	TK			
1 ¹⁾	R404A direkt	R404A direkt	●●	●	●
2 ²⁾	R404A direkt	R404A direkt	●	●	●
3 ³⁾	R404A direkt	R404A direkt		●	●
4 ³⁾	R404A direkt	CO ₂ direkt	●	●	●
5	NH ₃ /Sole	NH ₃ /Sole	●	●	●●
6	NH ₃ /Sole	CO ₂ direkt	●		
7	Propen/Sole	Propen/Sole	●	●	●
8	Propen/Sole	CO ₂ direkt	●		

¹⁾ Leckagerate 10 %

²⁾ Leckagerate 5 %

³⁾ Leckagerate 2 %

Tabelle 3 Alternative Kältemittel und Anlagenarten für Supermärkte im Vergleich