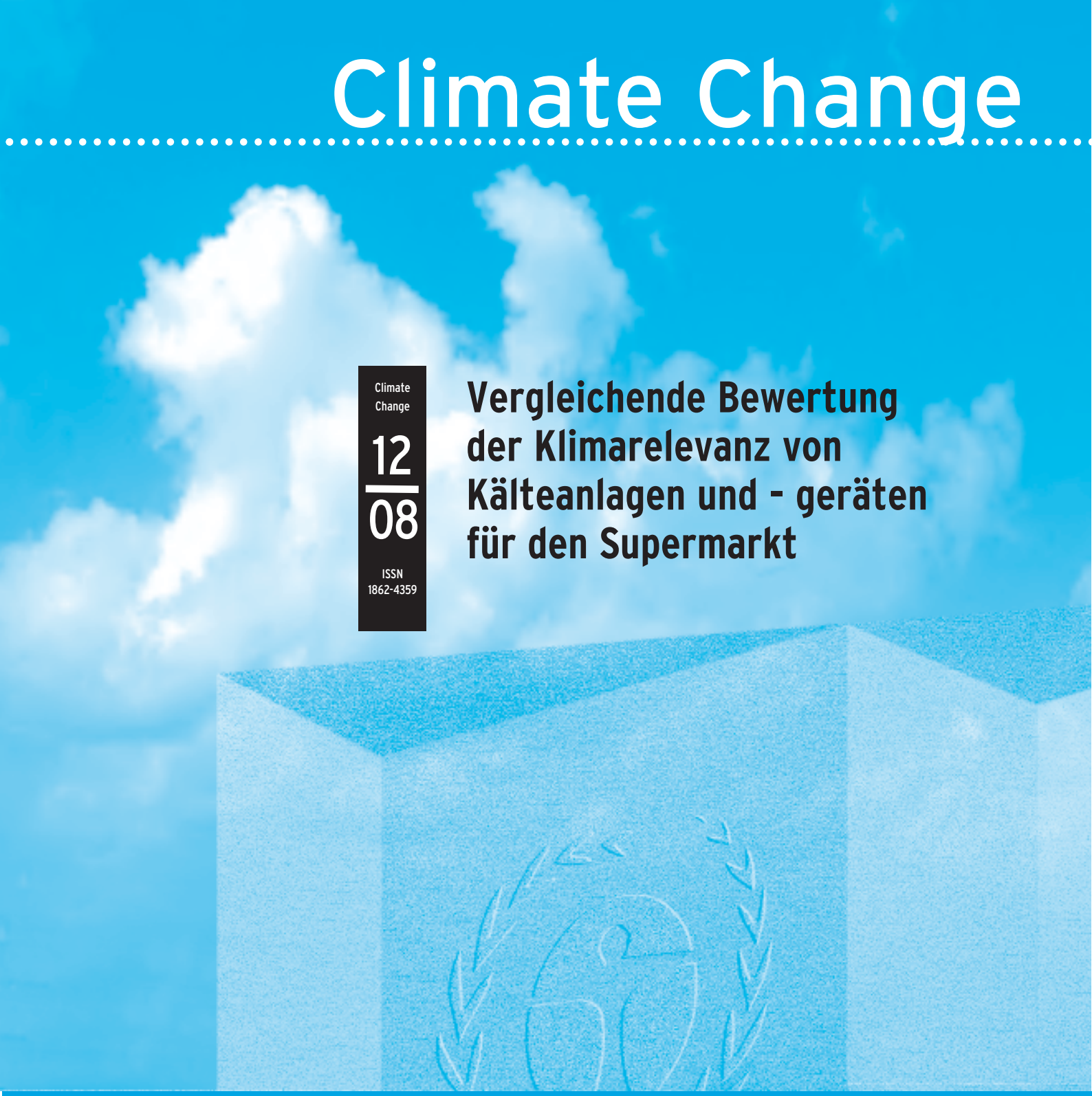
# Climate Change

Climate Change
12/08
ISSN 1862-4359

# Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und - geräten für den Supermarkt



Umwelt Bundes Amt
Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 206 44 300
UBA-FB 001180

Climate Change
12
08
ISSN
1862-4359

# Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und –geräten für den Supermarkt

von

**Jan-Martin Rhiemeier**

**Dr. Jochen Harnisch**

**Christian Ters**

Ecofys Germany GmbH

**Prof. Michael Kauffeld**

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

**Dr. André Leisewitz**

Ökorecherche GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
http://www.umweltbundesamt.de
verfügbar.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Internet: http://www.umweltbundesamt.de

Redaktion: Fachgebiet III 1.4
Katja Becken

Dessau-Roßlau, August 2008

Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Stoffbezogene Produktfragen

Förderkennzeichen (UFOPLAN) 206 44 300

# ABSCHLUSSBERICHT
# VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER KLIMARELEVANZ VON KÄLTEANLAGEN UND -GERÄTEN FÜR DEN SUPERMARKT

von
Jan-Martin Rhiemeier, Dr. Jochen Harnisch und Christian Ters
Ecofys Germany GmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Dr. André Leisewitz
Ökorecherche GmbH

IM AUFTRAG DES UMWELTBUNDESAMTES

August 2008

Berichts-Kennblatt

| | | |
|---|---|---|
| 1. Berichtsnummer<br>UBA-FB 206 44 300 | 2. | 3. |
| 4. Titel des Berichts | | |
| Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und –geräten für den Supermarkt | | |
| 5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) | | |
| Jan-Martin Rhiemeier, Dr. Jochen Harnisch,<br>Christian Ters<br>Ecofys Germany GmbH | 8. Abschlussdatum<br>30.08.2008 | |
| Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld<br>Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft | 9.Veröffentlichungsdatum<br>05.09.2008 | |
| Dr. André, Leisewitz<br>Öko-Recherche GmbH | 10. UFOPLAN-Nr.<br>206 44 300 | |
| 6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) | 11. Seitenzahl<br>475 | |
| Ecofys Germany GmbH<br>Landgrabenstraße 94<br>90461 Nürnberg | 12. Literaturangaben<br>zahlreiche | |
| Hochschule für Technik und Wirtschaft Karlsruhe<br>Moltkestr. 30<br>76133 Karlsruhe | 13. Tabellen und Diagramme | |
| Öko-Recherche GmbH<br>Münchener Str. 23<br>60329 Frankfurt am Main | 14. Abbildungen | |
| 7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) | | |
| Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau | | |
| 15. Zusätzliche Angaben | | |
| 16. Zusammenfassung | | |

Die vorliegende Studie bietet im ersten Teil umfassenden Überblick der deutschland- und europaweit für Supermarktanwendungen angebotenen und eingesetzten Kälteanlagen und -geräte ohne halogenhaltige Kältemittel. Der zweite Teil „Bilanzierung und Bewertung“ bietet Informationen über die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Systeme im Vergleich zu konventionellen Systemen auf Basis der Methodik zur Berechnung des Total Equivalent Warming Impacts (TEWI). Im dritten Teil „Verbesserungpotentiale und Lösungsansätze werden technische, wirtschaftliche und strukturelle Hemmnisse für die Ausweitung des zukünftigen Einsatzes natürlicher Kältemittel identifiziert. Weiterhin werden Schritte zu kurz- und mittelfristig geeigneten Optionen zur Überwindung von Markteinführungs-Hemmnissen beschrieben und Empfehlungen für die Umsetzung mit Kooperationspartnern unter Nutzung geeigneter Förderprogramme entwickelt.

| | | |
|---|---|---|
| | | |
| 17. Schlagwörter<br>Fluorierte Treibhausgase, Gewerbekäte, Klimarelevanz, Lebensmitteleinzelhandel, Natürliche Kältemittel, TEWI-Analyse, Vermeidungskosten, | | |
| 18. Preis | 19. | 20. |

# Inhaltsverzeichnis

**Marktübersicht - Modelltechnologien 21**

1. Einleitung 27
2. Beschreibung der relevanten Märkte 35
3. Vorkommen der einzelnen Marktformen 36
4. Gesetzgebungen zu F-Gasen 43
5. Darstellung der Kältemittel und Technologien 48
6. Möglichkeiten der Energieeinsparung 95
7. Kältemittelverluste 120
8. Umbau bestehender Anlagen 126
9. Initiativen von Supermarktketten 127
10. Zusammenfassung 133
11. Literatur 136

**Bilanzierung und Bewertung 151**

1. Einleitung 155
2. Formate und Vorgehensweise 156
3. Datenbasis 166
4. Kostendaten 180
5. Ergebnisse 185
6. Zusammenfassung 229
7. Literaturverzeichnis 232

**Verbesserungspotentiale und Lösungsansätze 235**

1. Stand der Technik - Übersicht 237
2. Hemmnisse für die Ausweitung des Einsatzes von R744-Verbundanlagen für Supermärkte (Stand: Mitte 2007) 245
3. Weitergehende Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz/Klimabilanz im Supermarkt: Sonderbetrachtung Energieeinsparpotential Kühlmöbelabdeckung 261
4. Mögliche und erforderliche Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes von natürlichen Kältemitteln im LEH 270
5. Literatur zu 1. Stand der Technik und 2. Hemmnisse 281

**ANNEX 1 - Technologiedatenblätter 287**

Kurzfassung des Abschlussberichts:

**VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER KLIMARELEVANZ VON KÄLTEANLAGEN UND -GERÄTEN FÜR DEN SUPERMARKT**
**(FKZ 206 44 300)**

Nach dem Inkrafttreten der EU-Verordnung 842/2006 und der EU-Richtlinie 2006/40/EG bleiben Kälteanlagen und Kühlgeräte in Supermärkten mittel- bis langfristig in Deutschland das letzte große Einsatzfeld und die stärkste Emissionsquelle der klimaschädlichen teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) im Bereich der stationären Kältetechnik.
Im EU-politischen Prozess wurde mit Rücksicht auf bestehende Verbesserungsmöglichkeiten für die bislang eingesetzten Komponenten, Technologien und ihre Handhabungspraktiken durch Handwerk und Anwender zunächst von Verwendungsverboten von HFKW in diesen und anderen stationären Anwendungen abgesehen. Von zentraler Bedeutung für diese Entscheidung war auch, dass für mehrere wichtige Anwendungen nach damaligem Kenntnisstand nicht sicher feststand, dass mit halogenfreien Technologien eine vergleichbare Zuverlässigkeit, Energieeffizienz und Sicherheit zu angemessenen Kosten erreicht werden konnte.

Allerdings wurde in der EU-Verordnung 842/2006 ein differenziertes Auflagenbündel für das Inverkehrbringen, den Betrieb, die Wartung sowie die Stilllegung und Demontage aller größeren Anlagen festgelegt. Mit Blick auf die in den kommenden Jahren anstehende Überprüfung der EU-Verordnung 842/2006 stellt sich die Frage, ob diese Vorgehensweise des so genannten „Containments“, also der Einfassung der HFKW, weiterhin als alleinige Stütze der Bemühungen zur Reduktion von HFKW-Emissionen ausreicht, oder ob Verwendungsverbote dann auf Basis der bis dahin angesammelten Betriebserfahrung mit Alternativtechnologien gerechtfertigt erscheinen.

In weiten Teilen Europas und auch in Deutschland ergibt sich allerdings hier für die Mehrzahl der Arten relevanter Kälteanlagen und -geräte folgende Problematik: Aufgrund bislang weitestgehend fehlender gesetzlicher Vorgaben existiert im stark kostenbewussten Einzelhandel eine oft nur sehr eingeschränkte Erfahrung mit dem Einsatz halogenfreier Kältemittel, sodass eine umfassende und zweifelsfreie

Datenbasis zur Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit für Systeme ohne fluorierte Treibhausgase oft nicht besteht. Diese ist aber wiederum erforderlich, um ggf. eine weitere Verschärfung der Einsatzmöglichkeiten von HFKW politisch zu begründen.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Studie mit ihren vier Teilberichten an. Im ersten Teil bietet sie einen umfassenden Überblick der deutschland- und europaweit für Supermarktanwendungen angebotenen und eingesetzten Kälteanlagen und -geräte ohne halogenhaltige Kältemittel. Der zweite Teil „Bilanzierung und Bewertung" bietet Informationen über die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Systeme im Vergleich zu konventionellen Systemen auf Basis der Methodik zur Berechnung des Total Equivalent Warming Impacts (TEWI). Im dritten Teil „Verbesserungpotentiale und Lösungsansätze werden technische, wirtschaftliche und strukturelle Hemmnisse für die Ausweitung des zukünftigen Einsatzes natürlicher Kältemittel identifiziert. Weiterhin werden Schritte zu kurz- und mittelfristig geeigneten Optionen zur Überwindung von Markteinführungs-Hemmnissen beschrieben und Empfehlungen für die Umsetzung mit Kooperationspartnern unter Nutzung geeigneter Förderprogramme entwickelt.

Der vierte Teil dieses Projektes bestand in der Ausrichtung einer internationalen Konferenz mit dem Namen „$CO_2$ol Food - Klimafreundlich Kühlen im Supermarkt" am 22. und 23. Mai 2007 in Berlin. Diese Veranstaltung mit über 140 Teilnehmern und Teilnehmerinnen und ihre Ergebnisse sind nicht Gegenstand dieses Endberichtes. Wichtiges Ergebnis der Konferenz war der deutlich zu erkennende Trend im Einzelhandel und bei Kälteanlagenbauern hin zu klimafreundlichen Kühlsystemen. Weitere Ergebnisse und Vorträge der Konferenz stehen unter http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/co2ol.htm zum Download zur Verfügung.

**Marktübersicht**

Der erste Berichtsteil enthält eine Marktübersicht zu vollständig oder teilweise mit halogenfreien Kältemitteln betriebenen Supermarktkälteanlagen und -geräten, inklusive Informationen zu deren aktueller Marktdurchdringung in der EU. Neben der jeweiligen Relevanz der Technologie am Markt wird auch dargestellt, inwieweit mit ihnen einschlägige Betriebserfahrungen vorliegen. In einer detaillierten Datensammlung, den sogenannten Technologiedatenblättern, werden für Modelltechnologien der Kategorien

*dezentrale steckerfertige Kühlmöbel*, *Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz* und für *zentrale Verbundanlagen* jeweils 30 Kenndaten angeführt, die Auskunft über Anlagendaten, Kältemittelverlust, Energieverbrauch, Lebenszykluskosten, Marktanteil, Betriebserfahrungen und Bezugsquellen geben
Ferner werden alle gängigen Kältemittel bezüglich Ihrer physikalischen Eigenschaften, mit besonderem Blick auf deren Wrtschaftlichkeit und Klimarelevanz für den Lebensmitteleinzelhandel, beschrieben.
Der Datensammlung liegen sowohl eine umfassende Literaturrecherche von wissenschaftlicher Fachliteratur als auch zahlreiche Interviews mit Herstellern und Lieferanten sowie Einzelhandelsvertretern zu Grunde.

Neben der Beschreibung der Anlagentechnologie selbst bietet das Arbeitspaket 1 auch eine Übersicht über die relevanten Marktformen im Lebensmitteleinzelhandel, in welchen die jeweilige Anlagentechnologie zum Einsatz kommt, umfangreiche Ausführungen zu Energiesparmaßnahmen, eine Zusammenstellung über Leckagen an Supermarktkälteanlagen sowie Beispiele von F-Gas Regelungen in ausgewählten europäischen Ländern.

**Bilanzierung und Bewertung**
Dieser Teil bietet einen Überblick über die Emissionen kältetechnischer Einrichtungen im Supermarkt und zeigt Vermeidungskosten auf, die bei Umstellung herkömmlicher Anlagen auf neue Anlagen mit natürlichen Kältemitteln auf den Einzelhandel zukommen.

Die Emissionen einer Kälteanlage werden durch den sogenannten Total Equivalent Warming Impact (TEWI) ausgedrückt. Der TEWI-Wert einer Kälteanlage beschreibt gemäß DIN 378-1 die Summe von indirekten Emissionen der Anlage aus ihrem Energieverbrauch und direkten, durch Kältemittelverlust verursachten Emissionen.
Aufgrund der Vielzahl von technischen Möglichkeiten und der heterogenen deutschen Marktlandschaft wurden während zwei Expertentreffen gemeinsam mit Kälteanlagenbauern und Einzelhandelsvertretern die zu untersuchenden Modelltechnologien für die Ladenformate Discounter, Verbrauchermarkt und SB-Warenhaus ausgewählt.

Großer Wert wurde bei der Berechnung der TEWI-Analysen auf eine gesicherte robuste empirische Datenbasis gelegt. Daher wurden Kältemittelbestände und Energieverbräuche der untersuchten Referenztechnologie in Zusammenarbeit mit mehreren deutschen Einzelhandelsketten ermittelt. Als Referenztechnologie wird für alle drei Ladenformate eine Verbundanlage auf Basis von R 404A definiert, da diese Technologie die momentan am häufigsten eingesetzte im deutschen Lebensmitteleinzelhandel ist.

Aufgrund mehrerer Faktoren, wie beispielsweise Witterung, Anlagenstandort, Anlagenalter und Verbraucherverhalten unterliegen vor allem die Energieverbräuche der Anlagen großen Schwankungen. Ebenfalls kann man nicht von der gleichen charakteristischen Füllmenge in jeder Anlage ausgehen. Auch diese unterliegen teilweise erheblichen Schwankungen. Aufgrund dieser Problematik wurde bei der Berechnung der TEWI-Analysen eine detaillierte Unsicherheitsbetrachtung mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Deren Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Emissionen der untersuchten Anlagentypen trotz der Unsicherheiten nur in gewissen Bandbreiten variieren, was robuste Vergleiche der jeweiligen Klimabilanzen ermöglicht.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Berechnung von TEWI-Analysen sind Kältemittelleckagen und -verluste. Kältemittelverluste treten an allen Kälteanlagen auf. Der Umfang der durch Leckagen hervorgerufenen Verluste hängt von der Komplexität der Kälteanlage, den Betriebsbedingungen, der Wartung und vielen weiteren Faktoren ab. Entsprechend groß sind die Unterschiede über berichtete Leckageraten in der Literatur. Um Kältemittelverluste adäquat abzubilden werden die TEWI-Analysen für drei verschiedene Politikszenarien gerechnet. In den Politikszenarien werden feste Kältemittelverlustraten angenommen, die je nach politischen Dichtigkeitsvorgaben variieren. In der Praxis können teilweise weit höhere Kältemittelverlustraten auftreten, da es immer wieder zu Havarien kommen kann, bei denen erhebliche Mengen Kältemittel entweichen. Dieser Fall wird in einer Sensitivitätsanalyse gesondert betrachtet.

Anhand der Ergebnisse aus den TEWI-Analysen werden in einem nächsten Schritt spezifische Vermeidungskosten für die ausgewählten Modelltechnologien berechnet. Die berechneten Vermeidungskosten geben die Kosten pro Tonne vermiedenem $CO_2$ -Äquivalent bezogen auf die Referenztechnologie an. Vermeidungskosten werden

ebenfalls für die verschiedenen Politikszenarien gerechnet, da sowohl Kosten als auch Emissionen für HFKW-haltige Anlagen je nach Dichtigkeitsvorgaben variieren.

Als Ergebnis der TEWI-Analysen wird deutlich, dass neuartige $CO_2$-Anlagen in ihrer Klimabilanz der R404A-Referenztechnologie im Rahmen aller berücksichtigten Unsicherheiten für Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser signifikant überlegen sind. Bei Discountern besteht die Signifikanz bei hoher Dichtigkeit (jährlicher Kältemittelverlust von 2,65 %) nicht mehr. Die Vermeidungskostenberechnung zeigt ferner, dass deren Einsatz zur Zeit noch mit teilweise hohen spezifischen Vermeidungskosten realisiert werden kann, diese aber mit zunehmend strengeren Dichtigkeitsvorgaben für herkömmliche Anlagen mit HFKW und Kostendegressionen für Anlagen mit natürlichen Kältemitteln in naher Zukunft deutlich sinken werden. Tabelle 1 fasst die quantitativen Ergebnisse aus TEWI-Analysen und Vermeidungskostenberechnung für alle untersuchten Technologien in übersichtlicher Form zusammen.
Besonders soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass im Falle höherer Kältemittelverluste als hier angenommen HFKW-freie Technologien erheblich größere Emissionseinsparungen bieten. In dieser Situation sinken auch die Vermeidungskosten für alternative Technologie deutlich. Der Einfluss der realen Kältemittelverluste auf Emissionen und Vermeidungskosten wurde daher in einer Sensitivitätsanalyse gesondert betrachtet.

**Tabelle 1: Kombinierte Übersicht zu TEWI-Ergebnissen und Vermeidungskosten für verschiedene Dichtigkeitsszenarien und Modelltechnologien**

| | | **Dichtigkeits-szenario 1** (11,65 %) | **Dichtigkeits-szenario 2** (6,15 %) | **Dichtigkeits-szenario 3** (2,65 %) |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage*)** | B- | B- | B- |
| **II** | R134a dir. NK | A+ | A+ | B+ |
| **III** | ind. R290 NK | A- | A- | B++ |
| **IV** | dir. 744 NK | A- | A- | B++ |
| **Verbrauchermarkt** | | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage*)** | B- | B- | B- |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | A- | A- | A- |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | B- | B- | B- |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | A- | A- | A- |
| **III** | ind. R717 | A- | A- | B- |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | A- | A- | A++ |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | A- | A- | A++ |
| **V** | dir. R744 | A- | A- | A+ |
| **SB-Warenhaus** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage*)** | B- | B- | B- |
| **III** | ind. R717 | A- | A- | B- |
| **V** | dir. R744 | A- | A- | A++ |

***)** einstufige R404A Direktverdampfungsanlage

**Kodierung der Bewertungen**

**Klimabilanz:** **A**:Signifikant der Referenzanlage überlegen

**B**: Kein signifikanter Unterschied zur Referenzanlage

**C**: Signifikant der Referenzanlage unterlegen

**Kostenwirksamkeit:** **++**Negative Vermeidungskosten

**+** : Vermeidungskosten <=50 Euro pro Tonne $CO_2$ Äquivalent

**-** : Vermeidungskosten >50 Euro pro Tonne bzw. Referenz.

Hier wird deutlich, dass bei der Investition in neue Kälteanlagen für den deutschen Lebensmitteleinzelhandel (LEH) neben der Kostenfrage in Zukunft auch die Frage nach der Wahl des Kältemittels vermehrt von Bedeutung sein wird. Die aktuelle öffentliche Diskussion um den Klimawandel zeigt, dass nachhaltiges und

umweltfreundliches Wirtschaften immer wichtiger wird und auch zunehmend als Verkaufsargument an Bedeutung gewinnt.
Mit dem Einsatz von natürlichen Kältemitteln in neuen Anlagen entscheiden sich schon heute einzelne Einzelhandelsunternehmen für eine umweltfreundliche Kälteerzeugung, weil dadurch doppelte Investitionen, zunächst zur Erfüllung höherer Dichtigkeitsanforderungen und später zur Installation neuer Technologie mit natürlichen Kältemitteln vermieden werden können.

Eine weitere Verschärfung der Auflagen für den Umgang mit fluorierten Treibhausgasen ist deutschland- wie auch europaweit in den nächsten Jahren zu erwarten. Dies spiegelt sich u.a. in dem von der deutschen Bundesregierung im August 2007 in Meseberg beschlossenen Klima- und Energieprogramm wie auch in den Überprüfungsklauseln des Artikels 10 der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase wider.

**Verbesserungspotentiale und Lösungsansätze**

Hier wird zunächst der Stand der Technik der am Markt verfügbaren Kälteanlagen und Komponenten mit natürlichen Kältemitteln analysiert. Ein besonderer Schwerpunkt ist hier die Entwicklung der $CO_2$-Technologie, da Anlagenbauer und Komponentenhersteller bei der Neuentwicklung verstärkt an deren Einführung und Verbesserung arbeiten. Des Weiteren werden wesentliche Hemmnisse aufgezeigt, die den Einsatz neuer HFKW-freier Anlagentechnologie behindern und deren Ausbreitung im Lebensmitteleinzelhandel erschweren. Hier ist zwischen technischen und wirtschaftlichen Hemmnissen zu unterscheiden. Große technische Hemmnisse sind die Verfügbarkeit und der Entwicklungsstand wichtiger Komponenten, vor allem für Anlagen mit Kohlendioxid. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften von $CO_2$ müssen beispielsweise Verdichter, Ventile und Wärmeübertrager neu konzipiert werden. Derzeit ist ein großer Teil notwendiger Komponenten noch nicht endgültig ausgereift und nicht in der erforderlichen Breite verfügbar, um eine schnelle Einführung der neuen Technologie im gesamten deutschen Lebensmitteleinzelhandel (LEH) zu vollziehen. Hieraus ergeben sich wiederum wirtschaftliche Hemmnisse, da aufgrund der fehlenden Marktreife einiger Komponenten noch keine Serienproduktion erreicht werden konnte, wodurch der Preis für diese Anlagenteile entsprechend hoch ist. In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie durch eine Steigerung der Nachfrage seitens des LEH sowohl wirtschaftliche als auch technische Hemmnisse in den kommenden Jahren überwunden werden können.

Zur Förderung des Einsatzes natürlicher Kältemittel im LEH werden zwei mögliche Fördermaßnahmen vorgeschlagen. Zur Förderung der Nachfrage neuer Anlagen mit natürlichen Kältemitteln wird eine finanzielle Fördermaßnahme im Rahmen des integrierten Energie- und Klimaprogramms, dem so genannten Meseberg-Papier, der deutschen Bundesregierung vorgeschlagen. Dieses fordert unter Punkt 23 eine Reduktion der fluorierten Treibhausgasemissionen der Bundesrepublik um ca. 8 Mio. t $CO_2$-Äquivalente. Zur Umsetzung wird eine Zuschusszahlung zu den Zusatzkosten für kältetechnische Anlagen im Lebensmitteleinzelhandel vorgesehen: Dieser Zuschuss soll nur unter ausschließlicher Verwendung von natürlichen Kältemitteln gezahlt werden und sollte eine Staffelung für Neuanlagen in neuen oder bestehenden Märkten oder den Ersatz einer R22-Altanlage vorsehen. Mit einem entsprechenden Fördervolumen kann mit dem Übergang zur Serienfertigung die Markteinführung von $CO_2$-Anlagen wesentlich erleichtert werden.

Bei der zweiten Fördermaßnahme handelt es sich um einen Wettbewerb, der Deutschlands klimafreundlichsten Supermarkt prämieren soll. Im Rahmen des Wettbewerbs sollen neue Kälteanlagen für den Supermarktbereich mit natürlichen Kältemitteln und einem niedrigen TEWI-Wert ausgezeichnet werden. Die Prämierung im Rahmen des Wettbewerbs kann eine Kombination von öffentlichkeitswirksamer Symbolik als Hauptaspekt und (begrenztem) finanziellem Anreiz sein. Dafür sind eine Auszeichnung oder ein Qualitätssiegel, die auch für PR- und Marketingzwecke eingesetzt werden können, und eine Anerkennungsprämie denkbar.
Die Dimension des vorgeschlagenen Förderprogramms ist geeignet, Bewegung in einen Markt zu bringen, dessen Dynamik gegenwärtig noch durch die bei den verschiedenen Akteuren (Komponentenhersteller, Anlagenbau, LEH) bestehenden Kostenschwellen gebremst wird. Der Wettbewerb wiederum schafft es, die Aufmerksamkeit für die Klimarelevanz von Kälteanlagen im LEH zu erhöhen, und die Stärkung der öffentlichen Akzeptanz und „Nachfrage“ nach klimafreundlichen Kälteanlagen sowie deren „Imagefaktor“ zu verbessern.

In einem Exkurs wird zudem eine Betrachtung zum Energieeinsparpotential von Kälteanlagen durch Kühlmöbelabdeckung. Die durchgehende Abdeckung von Kühlmöbeln mit Schiebedeckeln (Truhen) bzw. Türen (Regale) gilt als bedeutende Energieeinsparquelle. Das Einsparpotential wird im Allgemeinen auf bis zu 40 Prozent des Energieverbrauchs der jeweiligen offenen Verbrauchsstelle eingeschätzt. Die Aus- und Nachrüstung von Kühlmöbeln, zuerst von Kühltruhen, mit durchgehender Abdeckung setzte vor etwa zehn Jahren ein. Neben der Energieeinsparung ist die bessere Temperaturgewährleistung für das Kühlgut ein entscheidendes Motiv für die Abdeckung von Kühlmöbeln. Um die Bedeutung dieses Potentials besser einschätzen zu können, wurde in AP3 der Stand der Kühlmöbelabdeckung in Deutschland (Mitte 2007) durch Befragung der relevanten Lebensmitteleinzelhändler des Supermarktbereichs erhoben. Durch die Erhebung wird deutlich, dass im Bereich des Tiefkühl (TK)-Mobiliars schon ein recht hoher Grad an Abdeckung erreicht ist (85 %), während bei Truhen für die Normalkühlung (NK) (50 %) und insbesondere bei Kühlregalen (0,2 %) Energieeinsparung durch Verglasung nur eine sehr geringe Rolle spielt. Bei den normalerweise offenen Kühlmöbeln verfügten nach Auskunft des befragten LEH Mitte 2007 etwa 87% zumindest über eine Nachtabdeckung.

Vom Handwerk und dem Nachrüstgewerbe wird die durch Abdeckelung erreichbare Energieeinsparung mit etwa 40% bei TK-Truhen und ca. 10-15% bei NK-Truhen angegeben (Vergleich offener Truhen ohne Nachtabdeckung gegen geschlossene Truhen). Die Energieeinsparung durch die Ausrüstung von NK-Regalen für Fleisch, Milchprodukte und Gemüse mit Glastüren beträgt etwa 50% (Vergleich Regal mit Türen gegen Regal mit Nachtabdeckung), wobei der Einspareffekt durch Nachtrollos allein (gegenüber Regalen ohne Nachtabdeckung) auf 20-25% veranschlagt wird.

**COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE CLIMATE RELEVANCE OF SUPERMARKET REFRIGERATION SYSTEMS AND EQUIPMENT**
**(FKZ 206 44 300)**

After the entering into force of EU regulation (EC) No. 842/2006 and the EU directive 2006/40/EC, refrigeration systems in supermarkets remain the last big subsector and the strongest emission source of fluorinated hydrocarbons (HFC) in Germany.

With regard to existing improvement possibilities for components, technologies and their application, the EU-political process up to now refrained from a use ban of HFCs in refrigeration systems and other applications. A central point for this decision was that it was not clear for certain important applications if comparable reliability, energy efficiency and safety standards could be provided with HFC free technologies at adequate costs.

Though, a differentiated bundle of obligations for the operation, the maintenance and the disposal of all bigger refrigeration systems was included into Regulation (EC) No 842/2006. With regard to the ongoing review of the regulation the question positions itself whether this approach of the so-called "refrigerant containment" is sufficient as a sole measure for the reduction of HFC emissions, or whether use bans on the basis of further experience with alternative technologies seem more appropriate.

However, in wide parts of Europe and Germany the following problems arise for the majority of relevant refrigeration systems: Due to missing legal obligations to date, only limited experience with the use of HFC free refrigerants exists in the very cost-conscious retail market, so that a comprehensive and accurate data basis of energy efficiency and economics for systems operating without fluorinated greenhouse gases often does not exist. However, this is again necessary to justify further restrictions for the use of HFCs if necessary.

At this point the present survey starts. In the first part the survey offers a comprehensive overview of HFC free refrigeration systems for supermarkets offered and applied in Europe. The second part offers information about the energy efficiency

and economics of the HFC free systems in comparison to conventional systems on the basis of the Total Equivalent Warming Impact (TEWI). In the third part technical, economic and structural barriers for the expansion of the future insertion of natural refrigerants are identified. Furthermore steps are described for near- and mid-term options for overcoming market launch barriers. Additionally recommendations for potential subsidies for the promotion of HFC free refrigeration systems are developed.

The fourth part of the project consisted in the hosting of an international conference named "$CO_2$OL-Food-Climate Friendly Cooling in Supermarkets" on the 22nd and 23rd of May, 2007 in Berlin. The event with more than 140 participants is not an object of this final report. The most important result of the conference was the clear trend in the retail sectors as well as technology suppliers towards environmentally friendly refrigeration concepts. Further results and presentations of the conference are available for download at: http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/co2ol.htm.

**Market survey**

The first part of the report contains a market survey of supermarket refrigeration systems that are completely or partially operated with HFC free refrigerants, including information on their actual market penetration in the EU. Beside the respective relevance of the technology in the market, it is also displayed to what extent appropriate operational experiences exist. In a detailed data compilation, the so-called technology data sheets, 30 main characteristics for *decentralised plug-in units*, *condensing units* and for *central multiplex systems* are given. These characteristics provide information on equipment data, refrigerant losses, energy consumption, life cycle costs, market share, operational experiences and suppliers. Furthermore all currently relevant refrigerants are described with regard to their physical properties, with an in depth look at their cost effectiveness and climate relevance for the food retail sector. The data compilation is based on an extensive literature research of scientific technical literature as well as on numerous interviews with manufacturers, suppliers and retail representatives.

Beside the description of the equipment technology itself the market survey also offers an overview of the relevant shop formats in which the respective technology is used, substantial details on energy saving measures, a compilation of leakage rates of

supermarket refrigeration systems, as well as examples of already existing F-Gas laws in selected European countries.

**TEWI Analysis & Validation**

This part of the report gives an overview of the emissions from refrigeration systems used in supermarkets and indicates abatement costs which arise by conversion of conventional systems to new systems with natural refrigerants.

The effect of a refrigeration system on global warming is described by the Total Equivalent Warming Impact (TEWI). The TEWI value of a refrigeration system describes according to DIN ISO 378-1 the sum of indirect emissions of the equipment from its energy consumption and direct emissions caused by refrigerant losses.
Due to the high amount of technical possibilities and the heterogeneous German market scenery, the model technologies to be examined were selected during two expert's meetings together with system providers and retail representatives for the following three shop formats: discounter, supermarkets and hypermarkets.
Great emphasis was put on a trusted empiric data base for the calculation of the TEWI analysis. Hence, refrigerants supplies and energy consumptions of the examined reference technology were determined in cooperation with several German retail chains. As reference technology a central multiplex system on the basis of R404A is defined for all three shop formats. R404A is currently most often used in the German food retail sector.
Due to several factors, as for example weather conditions, equipment age and consumer behaviour, the energy consumption of refrigeration systems tend to considerable variability. Also one cannot extinguish the same typical refrigerant charge in every single system. Therefore a detailed uncertainty analysis was carried out with the help of Monte Carlo simulations. The Monte Carlo results clearly show that emissions of the examined model technologies in spite of high uncertainties vary only in a certain bandwidth, what allows robust comparisons of the respective climate impact of each model technology.

Another important input factor for the calculation of a TEWI analysis are refrigerant leakages and losses. Refrigerant losses appear at all refrigeration systems. The extents of the losses caused by leakages depend on the complexity of the refrigeration

system, the operating conditions, the quality of maintenance and many other factors. The differences of reported leakage rates are accordingly high. To illustrate refrigerant losses adequately, the TEWI analyses are calculated for three different policy scenarios. In each policy scenario fix leakage rates according to political tightness restrictions are assumed. In practice higher leakage rates can appear because of unforeseen system damages through which considerable amounts of refrigerants escape. This case is examined in a sensitivity analysis separately.
On the basis of the TEWI results specific abatement costs are calculated for all selected model technologies. The calculated abatement costs show the costs per tonne of avoided $CO_2$ equivalent relating to the reference technology. Abatement costs are also calculated for each different policy scenario, because costs as well as emissions vary according to tightness obligations.

As a result of the TEWI analyses it becomes clear that new $CO_2$ systems within the scope of all considered uncertainties significantly provide the environmentally superior solution compared to systems using R404A. For discount markets the significance does not persist for high leak tight systems (annual refrigerants loss of 2.65%) any more. The abatement cost calculation also shows, that the placing on the market can be realised at the moment still at rather high specific abatement costs, however, these will clearly decrease with increasingly stricter tightness obligations for conventional systems with HFCs and cost degression for systems with natural refrigerants in the near future. Table 1 summarises the quantitative results from TEWI analyses and the abatement cost calculations for all examined technologies in a transparent way.

Particularly should be pointed out that in case of higher refrigerants losses as assumed in the policy scenarios, HFC free technologies offer considerably higher emission reduction potentials. In that case also abatement costs will decrease clearly for alternative HFC free technologies. Therefore the influence of refrigerant losses on emissions and abatement costs is analysed in a separate sensitivity analysis.

**Table 1: Combined overview to TEWI results and abatement costs for different tightness scenarios and model technologies**

| | | **Tightness scenario 1** (11.65%) | **Tightness scenario 2** (6.15%) | **Tightness scenario 3** (2.65%) |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Reference system *)** | B- | B- | B- |
| **II** | R134adir. MT | A + | A + | B + |
| **III** | ind. R290 MT | A- | A- | B ++ |
| **IV** | dir. 744 MT | A- | A- | B ++ |
| **Supermarkett** | | | | |
| **Ia** | **Reference system *)** | B- | B- | B- |
| **Ib** | R134a MT+R404A LT | A- | A- | A- |
| **IIa** | R404A MT+R744 LT | B- | B- | B- |
| **IIb** | R134a MT+R744 LT | A- | A- | A- |
| **III** | ind. R717 | A- | A- | B- |
| **IVa** | R717 / R744 MT+LT | A- | A- | A ++ |
| **IVb** | R290 / R744 MT+LT | A- | A- | A ++ |
| **V** | dir. R744 | A- | A- | A + |
| **Hypermarket** | | | | |
| **I** | **Reference system *)** | B- | B- | B- |
| **III** | ind. R717 | A- | A- | B- |
| **V** | tdir. R744 | A- | A- | A ++ |

***)** R404A direct evaporation system

**Coding of the evaluation**

**Climate balance:**
**A**: Significantly superior to the reference system
**B**: No significant difference to the reference system
**C**: Significantly inferior to the reference system

**Cost-effectiveness:**
**++** negative abatement costs
**+** : abatement costs <=50 Euros per tonne $CO_2$ equivalent
**-** : abatement costs > 50 Euros per tonne $CO_2$ equivalent

The results show hat with regard to future investments in new refrigeration systems beside the cost question also the right choice of refrigerant will increasingly matter. The actual public discussion about men made climate change shows that sustainable and environmentally friendly management becomes more and more important and also increasingly becomes a strong sales argument.

By applying the use of natural refrigerants in new systems certain retailers step towards environmentally friendly refrigeration already today, because thereby they can avoid double investments initially for compliance with higher tightness standards and then later for the installation of new technology with natural refrigerants.

A further strengthenig for the use of fluorinated greenhouse gases is to be expected in Germany as well as throughout Europe during the next years. This is reflected for example by the in August 2007 published “integrated energy and climate program” of the German Federal Government, as well as in article 10 of regulation (EC) No 842/2006 about certain fluorinated greenhouse gas, which forsees a review of the regulation by July 2011.

**Barriers and Improvements**

This chapter analyses the state-of-the-art of refrigeration systems with natural refrigerants available in the market. A special focus is put on the further development of the $CO_2$ technology, because equipment and component manufacturer increasingly work on the market introduction and the improvement of the systems. Besides essential barriers are indicated which prevent the use of new HFC free systems and complicate their expansion in the food retail sector. Here is to be distinguished between technical and economic barriers. Big technical barriers are the availability and the level of development of important components, above all for equipments with carbon dioxide. Due to the thermodynamic properties of $CO_2$, i.e. compressors, valves and heat exchangers have to be entirely new designed. Currently a large part of necessary components has not yet matured finally and is not available in the necessary width to carry out a quick introduction of the new technology in the market. As a consequence also economic barriers arise, because due to the missing readiness for the market of some components still no serial production could be reached so that prices for certain components stay high. This chapter indicates how economic and technical barriers can be overcome by a growing demand for $CO_2$ systems from the retail sector in the coming years.

For the support of an increased future use of natural refrigerants in the retail sector two possible measures for public funding are suggested. A financial supporting measure is suggested for the promotion of the demand for new systems with natural refrigerants

within the scope of the “integrated energy and climate programme” of the German Federal Government. This demands a reduction of the German fluorinated greenhouse gas emissions of about 8 million tonnes of $CO_2$ equivalents under article 23. For the implementation a subsidy payment is planned to cover the extra costs for refrigeration systems in the food retail sector: This subsidy should be paid only under exclusive use of natural refrigerants and should intend a progressive rate for new systems in new or existing markets or for the substitution of an old R22 system. With a suitable subsidy volume and a change over to batch production of $CO_2$ systems the market launch can be made substantially easier

The second funding measure is a competition. It should award a prize to the environmentally friendliest German supermarket. Within the scope of the competition new refrigeration systems with natural refrigerants and a low TEWI value should be awarded. The award of the competition can be a combination of public-relations symbolism as a main aspect and a (limited) financial incentive. Therefore an award in the form of a quality label, which can be also used for PR and marketing purposes, and a financial bonus should be assigned to the winner.

The dimension of the suggested subsidy programme is likely to bring movement in a market whose dynamics is presently still limited by the existing cost thresholds of different actors (component manufacturers, system manufacturers, retailers). The competition additionally raises the attention for the climate relevance of refrigeration systems in the food retail sector, and helps to improve the public acceptance and demand for climate friendly refrigeration systems as well as their "image factor".

Additionally the energy saving potential of refrigeration systems through the implementation of cover sheets is analysed. The continuous covering of refrigeration units with sliding lids (chests) or doors (shelves) is considered as an important energy saving measure. The reduction potential is estimated up to 40 percent of the energy consumption compared to an open refrigeration unit. The fitting and retrofitting of refrigeration units, with continuous covers started about ten years ago. Beside the energy savings the better temperature guarantee for the chilled goods is a determining motive for the covering of refrigeration units. To be able to better estimate the meaning

of this potential, the status of the current coverage quota in Germany was assessed by questioning relevant food retailers.

# „VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER KLIMARELEVANZ VON KÄLTEANLAGEN UND -GERÄTEN FÜR DEN SUPERMARKT“ (FKZ 206 44 300)

## Marktübersicht - Modelltechnologien

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

# Inhalt


| | |
|---|---|
| 1. Einleitung | 27 |
| 1.1 Statistisch abgesicherte Betreiberdaten | 29 |
| 1.2 Wissenschaftliche Fachliteratur | 30 |
| 1.3 Einschlägige Datenbanken z. B. FRIDOC (IIR), SCOPUS | 31 |
| 1.4 Daten von Herstellern und Lieferanten | 32 |
| 1.5 Interviews | 32 |
| 2. Beschreibung der relevanten Märkte | 35 |
| 3. Vorkommen der einzelnen Marktformen | 36 |
| 3.1 Deutschland | 36 |
| 3.2 Sonstiges Europa | 38 |
| 3.3 USA | 40 |
| 3.4 Marktentwicklung | 42 |
| 4. Gesetzgebungen zu F-Gasen | 43 |
| 4.1 EU F-Gas Verordnung | 43 |
| 4.2 Dänemark | 44 |
| 4.3 Niederlande | 46 |
| 4.4 Norwegen | 46 |
| 4.5 Österreich | 47 |
| 4.6 Schweden | 47 |
| 4.7 Schweiz | 48 |
| 5. Darstellung der Kältemittel und Technologien | 48 |
| 5.1 Einleitung | 48 |
| 5.2 Kältemittel für Supermarktkälteanlagen | 52 |
| 5.3 Halogenierte Kohlenwasserstoffe | 57 |
| 5.4 Kohlenwasserstoffe | 60 |
| 5.5 Ammoniak – R717 | 63 |

5.6 Kohlendioxid – R744 64
5.7 Kälteträger und sekundäre Kältemittel 70
5.8 Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel 74
5.9 Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz 78
5.10 Zentrale Verbundanlagen 81
5.11 Alternative Technologien 93
6. Möglichkeiten der Energieeinsparung 95
7. Kältemittelverluste 120
8. Umbau bestehender Anlagen 126
9. Initiativen von Supermarktketten 127
10. Zusammenfassung 133
11. Literatur 136

# Abkürzungen

| | |
|---|---|
| BVL | Bundesverband des Deutschen Lebensmittelhandels e. V. |
| CFD | Computerized Fluid Dynamics – Computergestützte Strömungssimulation |
| $CO_2$ | Kohlendioxid (R744), bei Verwendung als Kälteträger wird in diesem Dokument in der Regel „$CO_2$“ geschrieben, bei Verwendung als Kältemittel „R744“ |
| DKK | Dänische Kronen |
| DKV | Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V. |
| EHI | Euro Handels Institut |
| F-Gas | Fluorierter Kohlenwasserstoff |
| GWP | Global Warming Potential (Treibhauspotential). In der Regel werden GWP-Werte bei einem Zeithorizont von 100 Jahren auf $CO_2$ bezogen angegeben. Im Laufe der Zeit werden die GWP-Werte an neueste Forschungsergebnisse angepasst. Im Fließtext dieses Berichtes wird immer von den neuesten vom IPCC bzw. der UNEP im Jahr 2006 veröffentlichten Werten ausgegangen |
| HACCP | **H**azard **A**nalysis **C**ritical **C**ontrol **P**oints - Gefahrenanalyse und Kontrolle kritischer Punkte - und zwar auf allen Stufen der Zubereitung, Verarbeitung, Herstellung, Verpackung, Lagerung, Beförderung, Verteilung, Behandlung und des Verkaufs von gekühlten Produkten |
| IDHL | Immediately Dangerous to Health and Life – Konzentration ab welcher giftige Stoffe für den Menschen unmittelbar gefährlich werden |
| LEH | Lebensmitteleinzelhandel |

| | |
|---|---|
| LCCP | Life Cycle Climate Performance – Analyse der Klimabelastung eines Produktes/Prozesses von der Herstellung bis zur Außerdienststellung |
| MAK | Maximale Arbeitsplatz-Konzentration; gibt die maximal zulässige Konzentration eines Stoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der (Atem-)Luft am Arbeitsplatz an, bei der kein Gesundheitsschaden zu erwarten ist, auch wenn man der Konzentration in der Regel 8 Stunden täglich, maximal 40 (42) Stunden in der Woche ausgesetzt ist (Schichtbetrieb) |
| MoPro | Molkereiprodukte, d. h. Milch, Joghurt und Käse |
| MWp | Megawatt Peak – die maximal, bei optimaler Sonneneinstrahlung von einer Photovoltaikanlage abgegebene Leistung |
| $NH_3$ | Ammoniak (R717) |
| NK | Normalkühlung bzw. „Pluskühlung“, Produkttemperaturen über 0 °C |
| NOK | Norwegische Kronen |
| ODP | Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotential) |
| PAG | Vollsynthetische Kältemaschinenöle auf Polyglykolbasis für Anwendungen mit den Kältemitteln R134a und anderen HFKW; es gibt Ammoniak(teil)lösliche Varianten |
| PAO | Vollsynthetisches Kältemaschinenöl auf Basis von Polyalphaolefinen für Anwendungen mit dem Kältemitteln R717 |
| POE | Vollsynthetisches Kältemaschinenöl auf Basis von Polyolester für Anwendungen mit R134a, R404A, R404C, anderen HFKW(-Gemischen) und R744. |
| R290 | Propan |
| R600a | Isobutan |
| R717 | Ammoniak ($NH_3$) |

| | |
|---|---|
| R744 | Kohlendioxid ($CO_2$), bei Verwendung als Kälteträger wird in diesem Dokument von $CO_2$ geschrieben, bei Verwendung als Kältemittel in einer Kaltdampfkompressionskälteanlage von R744 |
| SB | Selbstbedienung |
| TEWI | Total Equivalent Warming Potential – Gesamttreibhausbetrachtung, d. h. Berücksichtigung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen |
| TK | Tiefkühlung, Produkttemperaturen üblicherweise unter -18 °C |
| VRF | Variable Refrigerant Flow – eine Form von Multisplit-Klimageräten, d. h. mehrere Verdampfer mit jeweils variablem Kältemitteldurchfluss an einer Außeneinheit (Verflüssigungssatz) |
| WP | Wärmepumpe |
| WRG | Wärmerückgewinnung |

# 1. Einleitung

Diese Berichtsteil enthält eine Marktübersicht zu vollständig oder teilweise mit halogenfreien Kältemitteln betriebenen Supermarktkälteanlagen und -geräten einschließlich Informationen zu ihrer aktuellen Marktdurchdringung in der EU. Neben der jeweiligen Relevanz der Technologie am Markt wird auch dargestellt, inwieweit mit ihnen einschlägige Betriebserfahrungen vorliegen.

Hierbei wurde zunächst eine Vorauswahl der für die EU relevanten Modelltechnologien und Anwendungen getroffen. Diese wurde auf Basis verfügbarer Informationen erstellt. Die Marktübersicht berücksichtigt, welche Relevanz die einzelnen Modelltechnologien haben. Soweit möglich wird angegeben um welche(s) Ladenformat(e)[1)] es sich bei der jeweiligen Anwendung handelt.

Relevante Anwendungen[2)] im Sinne dieser Studie sind:

- (Flaschen-) Kühlschränke
- Kühltheken,
- Kühlregale,
- Kühlinseln,
- Tiefkühlschränke,
- Tiefkühlinseln,
- Kühlräume und
- Tiefkühlräume.

Die Strukturierung der Informationen erfolgte nach den vom auftraggebenden Umweltbundesamt vorgeschlagenen Kategorien von Modelltechnologien[3)]:

- Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel

[1] Die relevanten Formate sind aus heutiger Sicht; Lebensmittel-Selbstbedienungsmarkt (SB), Lebensmitteldiscounter, Supermärkte, Verbrauchermärkte, SB-Warenhäuser mit der üblichen Abgrenzung über die Verkaufsfläche, siehe Kapitel 2 Beschreibung der relevanten Märkte.

[2] Diese Auswahl der Anwendungen orientiert sich an den in der Gewerbekälte üblichen Arten von Kühlmöbeln.

[3] Bei den Begriffen „Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel“ und „zentrale Verbundanlage“ handelt es sich im Prinzip in beiden Fällen um eine Doppelung der Aussage zum gleichen Punkt, da steckerfertige Kühlmöbel dezentral eingesetzt werden und Verbundanlagen in der Regel zentral ausgeführt sind. Dies ist dem kältetechnischen Laien, jedoch nicht immer in der Form bewusst. Es wird deshalb im Rahmen dieser Studie in der Regel mit der doppelten Bezeichnung gearbeitet.

- Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz
- Zentrale Verbundanlagen

Für jede Modelltechnologie wurden, sofern verfügbar, die folgenden dreißig Angaben ermittelt und in Form von Technologiedatenblättern dokumentiert:

**Kältedaten**

1. Einsatzzweck
2. Kälteleistungsbereich
3. Art der Kälteübertragung
4. Kältemittelart
5. Kältemittelfüllmenge

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten
7. Quelle der Kältemittelverlust-Information
8. Art der Ableitung
9. Verbleib des Kältemittels nach Außerdienststellung

**Energie**

10. Energieverbrauch
11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung
12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung
13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

**Lebenszykluskosten**

14. Investitions- / Komponentenkosten
15. Installationskosten
16. Betriebskosten
17. Wartungsintervalle
18. Wartungskosten

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen
20. Regionale Verbreitung

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre mit Betriebserfahrung, sofern keine konkreten Daten vorliegen
22. Angaben zur Zuverlässigkeit
23. evtl. besondere Probleme
24. Beschreibung besonderer Eigenschaften
25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes
26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

**Bezugsquellen**

27. Hersteller
28. evtl. Importeur
29. Komponentenhersteller
30. Betreiber

Methodisch wurden die benötigten Daten über folgende Wege beschafft:

- Statistisch abgesicherte Betreiberdaten
- Wissenschaftliche Fachliteratur
- Einschlägige Datenbanken z. B. FRIDOC (IIR), SCOPUS
- Daten von Herstellern und Lieferanten
- Interviews und
- Eigene Abschätzungen

## 1.1 Statistisch abgesicherte Betreiberdaten

Die Firmen EPTA (D), Frigo-Consulting (CH), Hauser (AT), KWN Engineering (A), Linde/Carrier (D) und SSP - Schmutz, Starkl und Partner (CH) haben Daten zur Verfügung gestellt, die in diesem Projekt ausgewertet wurden.

## 1.2 Wissenschaftliche Fachliteratur

Die folgende Fachliteratur wurde ausgewertet:

- DKV Statusberichte Nr. 20: Kohlendioxid, 3. überarbeitete Ausgabe 2006 und Nr. 22: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte. Juni 2002
- Forschungsrat Kältetechnik relevante Forschungsberichte
- IEA Annex 26: Advanced Supermarket Refrigeration/Heat Recovery Systems

Fachzeitschriften:

- ASHRAE Journal (online Archiv (1997 – 2007)
- hk gebäudetechnik (CH) (2005 – 2007)
- Ki Luft- und Kältetechnik (online Archiv 1994 – 2007)
- KK (online Archiv 1997 – 2007)
- KKA (2004 – 2007)
- Koude & luchtbehandling (NL) (2006 – 2007)
- Kulde (NO) (2004 – 2007)
- Scanref (DK) (2004 – 2007)

Tagungsbände:

- DKV Jahrestagungen 2005, Würzburg, 2006, Dresden und 2007, Hannover
- Greenpeace London Workshop 2006
- IEA Annex 31 short course in Peking, China am 25. August 2007 (http://www.energy.kth.se/index.asp?pnr=10&ID=1270&lang=1)
- IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Glasgow 2004 und Trondheim 2006
- IIR Congress of Refrigeration Washington D.C. 2003 und Peking 2007
- IIR Commercial Refrigeration, Vicenza 2005
- IIR Ammonia, Ohrid 2005
- IIR Refrigeration Science and Technology, New Zealand 2006

Internetforen, z. T. mit Vorträgen von Tagungen und Seminaren:

- Forum für Kälteanwender, Norwegen (FOKU), www.foku.org
- Informationsdienst zu HFKW-freien Kälteanlagen in Dänemark, www.hfc-fri.dk
- ProCool, www.procool.info
- R744 Informationsplattform, www.r744.com
- VDA Alternative Kältemittel Wintermeetings Saalfelden, http://www.vda-wintermeeting.de/

Daneben diverse Publikationen im Rahmen verschiedener Dissertationen, Projekte der internationalen Energieagentur (IEA), verschiedener Energieversorger (z. B. Southern California Edison) und Verbände (z. B. Asercom und Eurammon). Zitierte Stellen sind in diesem Bericht kenntlich gemacht und der Verweis auf die entsprechende Literatur findet sich am Ende im Abschnitt Literatur. Es wurde dabei die folgende Kennzeichnung verwendet: [Nachname1234] – Nachname des ersten Autors und vierstelliges Erscheinungsjahr; sofern es sich bei den Herausgebern/Autoren nicht um Personen handelt, wurde i. d. R. der Name der Organisation verwendet, z. B. „UNEP“. Bei mehreren Veröffentlichungen des gleichen Autors im selben Jahr erscheint ein a, b oder c nach der Jahreszahl.

Im Teil „Technologiedatenblätter“ sind weitere Literaturstellen zitiert. Die jeweiligen Hinweise sind dort unmittelbar bei der entsprechenden Technologie aufgeführt.

## 1.3 Einschlägige Datenbanken z. B. FRIDOC (IIR), SCOPUS

- FRIDOC IIR Datenbank
- SCOPUS (Elsevier Datenbank)

Suchbegriffe: Supermarkt, Supermarktkälte / supermarket (refrigeration)

## 1.4 Daten von Herstellern und Lieferanten

- Bitzer für Verdichter und Verflüssigungssätze
- Bock für Verdichter und Verflüssigungssätze
- Danfoss für hermetische Verdichter
- Dorin für R744 Verdichter
- Epta für Verbundanlagen
- Frigoglass, Liebherr, Mammut u. a. für steckerfertige Geräte
- Georg Fischer für Kunststoffrohrsysteme
- Hauser für Verbundanlagen und Energieeinsparungen
- Linde/Carrier für Verbundanlagen

## 1.5 Interviews

Die folgenden Interviews wurden in Verbindung mit dem AP1 durchgeführt, aufgeführt in chronologischer Reihenfolge:

- Thomas Tiedemann, Danfoss USA am 10.12.2006 zum Thema „steckerfertige Kühlgeräte“
- Per Henrik Pedersen, Dänisches Technologisches Institut am 11.12.2006 zum Thema „steckerfertige Kühlgeräte“
- Bernd Kaltenbrunner, KWN am 10.1.2007 zum Thema „Verbundkälteanlagen mit Kälteträger“ und am 13.9.2007 zum Thema „distributed systems“
- Mark Bulmer von Georg Fischer am 10.1.2007 zum Thema „Verbundanlagen mit Kälteträger“
- Udo Görner, BKT / EPTA am 12.1.2007 und 18.1.2007 zum Thema „Verbundanlagen mit R744 und HFKW“
- Bernd Heinbokel, Erik Wolfgang Bucher, Linde / Carrier am 18.1.2007 zum Thema „R744“
- Holger Schneider, Aldi Süd am 18.1.2007 zum Thema „R744 und HFKW in Verbundanlagen und R290 in steckerfertigen Tiefkühltruhen“

- Thomas Bader, Tebeg (Kältebeauftragter von Aldi Süd) am 18.1.2007 zum Thema „R744 und HFKW in Verbundanlagen und R290 in steckerfertigen Tiefkühltruhen“
- Gerd Haug von Zent-Frenger am 23.1.2007 zum Thema „Wärmerückgewinnung“
- Erik Wolfgang Bucher von Linde / Carrier am 24.1.2007 zum Thema „R744 und HFKW in Verbundanlagen“
- Herr Post von Linde / Carrier und Herr Empen und Frau Tischler von Gebauer (EDEKA) am 7.2.2007 zum Thema „R744 in der Tiefkühlung als Kaskade zu HFKW“
- Herren Brouwers, Bucher, Heinbokel, Haaf, Kammler von Linde / Carrier am 14.2.2007 zum Thema „Verbundkälteanlagen“
- Bjarne Dindler Rasmussen von Danfoss Dänemark am 27.2.2007 zum Thema „Regelung und Komponenten für R744 Verbundanlagen“
- Jan Hellsten von Temper Schweden am 7.3.2007 zum Thema „Kälteträger“
- Steffen Vogelbacher von Daikin am 20.3.2007 zum Thema „Conveni-Pack“
- Kenneth B. Madsen vom Dänischen Technologischen Institut am 11.4.2007 zu „Supermarktkälteanlagen in Dänemark“
- Alexander Cohr Pachai von Johnson Controls (York/Sabroe Kältetechnik) am 22.5.2007 zum Thema „$CO_2$-Kaskadenkälteanlagen“
- Mats Schenk von Frigotech bei einem Besuch in zwei Supermärkten in Stockholm, Schweden am 8. Juni 2007
- Tobias Sienal, Carrier/Linde am 24.8.2007 zum Thema „R744“
- Deepak Perti von DuPont am 25.8.2007 zum Thema „neue synthetische Kältemittel mit niedrigem GWP“
- Dirk Raudonus und Joachim Schadt von Lidl am 13.9.2007 zu Kälteanlagen bei Discountern
- Jörg Peters von der Bundesfachschule Kälte-Klima-Technik am 3.10.2007 zum Thema „Glastüren/-deckel und Leckagen“

Des Weiteren fanden zahlreiche Gespräche im Rahmen der EUROSHOP-Messe 2008 am 26. und 27. Februar 2008 in Düsseldorf mit Vertretern der folgenden Firmen statt:

- Hauser, Carrier/Linde, Epta, Daikin, J+E Hall und Frigo Consult zu Verbundanlagen
- AHT, Hauser, Carrier/Linde, Epta zu steckerfertigen Geräten
- Hauser, Coolexpert und Prof. Becker zur Regelung von Verbundanlagen bzw. Integration der gesamten Gebäudetechnik in eine übergeordnete Regelung
- Schott Glas, Behr, Anthony International zu Glastüren
- Georg Fischer, Flexi Chiller, Area, Indirect Cooling Technology und Pipetech zu Kälteträgersystemen
- Philips zu LED Beleuchtung
- Aldi Süd, Kaufland und Lidl zur Umsetzung von energiesparenden Lösungen und alternativen Kältemitteln

Bei den verschiedenen Gesprächen wurden auch immer die Möglichkeiten der Energieeinsparung diskutiert.

Bei der Datenerhebung speziell für halogenfreie Modelltechnologien wurde EU-weit nach dokumentierten Anwendungsfällen gesucht, da in Deutschland selbst von den großen Einzelhandelsketten oft nur wenige Einzelanlagen mit halogenfreien Kältemitteln betrieben werden. Halogenfreie Technologien finden sich insbesondere in den skandinavischen Ländern mit ihren jeweiligen strengen F-Gas-Regelungen. Einzelheiten zu Ländern mit über die europäische F-Gasverordnung hinausgehenden Gesetzen sind im Kapitel 4 mit ihren Auswirkungen auf den Supermarktkältebereich aufgeführt. Zu vielen Technologien finden sich nur wenige Veröffentlichungen. Häufig wird in den Veröffentlichungen auch nur von einer konkreten Anlage berichtet. Es fehlt also für viele Technologien eine genügend breite statistische Basis. Dennoch können die einzelnen Anlagen eine Indikation z. B. des Energieverbrauchs einer derartigen Anlage geben.

# 2. Beschreibung der relevanten Märkte

Der Lebensmitteleinzelhandel (LEH) für Endverbraucher umfasst in Deutschland die folgenden Ladenformate (nach Größe der Verkaufsfläche gegliedert) [EHI2001][1)], siehe dazu auch Tabelle 3.1:

- Tankstellenläden (Convenience Store)
- Lebensmittel Selbstbedienungsläden,
- Lebensmittel-Discountmarkt,
- Supermärkte,
- Verbrauchermärkte und
- SB Warenhäuser bzw. Hypermärkte.

Tankstellenläden haben typischerweise offene Kühlregale für Getränke, Flaschenkühler und Eiskremtiefkühltruhen. Die Verkaufsfläche ist in der Regel deutlich kleiner als 400 $m^2$.

Lebensmittelselbstbedienungsläden haben eine Verkaufsfläche von weniger als 400 $m^2$. Es werden überwiegend Lebensmittel angeboten.

Lebensmitteldiscounter haben Verkaufsflächen von 400 bis 800 $m^2$. Ein Lebensmittel-Discountmarkt ist ein Lebensmittelgeschäft mit Konzentration auf umschlagstarke Artikel [EHI2001]. Der Lebensmittelanteil beträgt 80 bis 85 %.

Supermärkte: typische Verkaufsfläche zwischen 600 und 1.500 $m^2$, zum Teil bis zu 2.500 $m^2$ [DKV2002]. Ein Supermarkt ist ein Lebensmittel-Selbstbedienungsgeschäft mit einer Verkaufsfläche von mindestens 400 $m^2$, das Lebensmittel einschließlich Frischwaren führt und in dem der Anteil der für Nonfood vorgesehenen Fläche nicht über 25 % liegt [EHI2001].

Verbrauchermärkte: typische Verkaufsfläche zwischen 1.500 und 5.000 $m^2$, die Lebensmittelverkaufsfläche beträgt etwa 1/3 der Gesamtfläche [DKV2002].

[1] Es gibt andere Einteilungsmöglichkeiten. Eine feinere Unterteilung der Verbrauchermärkte und Lebensmittelselbstbedienungsläden findet sich z.B. bei [Jakobs2006] eine gröbere Unterteilung bei [BVL2007].

SB Warenhäuser: typische Verkaufsfläche über 5000 $m^2$, die Lebensmittelverkaufsfläche beträgt etwa 1/3 der Gesamtfläche von bis zu 20.000 $m^2$ [DKV2002]. Insbesondere in Frankreich werden große SB Warenhäuser als Hypermärkte bezeichnet und haben dort bis zu 25.000 $m^2$ Verkaufsfläche von denen zwischen 25 und 40 % für Lebensmittel sind [Zoughaib2005].

Hier wird der Stand der Technik bei Supermarktkälteanlagen in Lebensmitteldiscountern, Supermärkten, Verbrauchermärkten und SB-Warenhäusern beschrieben. Daneben gibt es sogenannte Cash und Carry Märkte. Dies sind Abholgroßmärkte, die nicht an den Endverbraucher verkaufen [Jakobs2006]. Diese Cash und Carry Märkte werden bei bestimmten bisher nur dort umgesetzten Konzepten in den Technologiedatenblättern des AP1 beschrieben, im Rahmen der TEWI-Analysen im AP2 jedoch nicht gesondert betrachtet.

Lebensmittelselbstbedienungsläden stellen zwar eine zahlenmäßig große Gruppe, siehe 3.1, haben aber sehr viel kleinere Kälteanlagen mit entsprechend kleineren Kältemittelfüllmengen als die größeren Supermärkte. Es wurde deshalb im Rahmen des Projektes beschlossen, die Kälteanlagen von Lebensmittelselbstbedienungsläden nicht zu betrachten.

# 3. Vorkommen der einzelnen Marktformen

## 3.1 Deutschland

**Ladenformate**

Einer Studie des DKV zufolge gab es in Deutschland im Jahr 2000 ungefähr 38.000 Lebensmittelselbstbedienungsläden, siehe Tabelle 3.1 für die Zuordnung zu den einzelnen Ladenformaten [DKV2002].

Information Resources GmbH (IRI) gibt für Ende 2005 49.600 Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte an, siehe Tabelle 3.1 [IRI2006]. Gleichzeitig wird als Trend für die gesamte Branche eine Abnahme der Gesamtzahl von Supermärkten

angegeben. IRI gibt vom Jahr 2000 bis 2006 einen Rückgang von 25 % an. Vergleicht man die Gesamtzahl des DKV aus dem Jahre 2000 mit derjenigen von IRI, bestätigt sich diese Abnahme um ca. 25 %. Die Anzahl der Lebensmitteldiscounter hat dabei über die letzten Jahre beständig zugenommen und die der traditionellen Lebensmitteleinzelhändler abgenommen [IRI2007], siehe auch 3.4 Marktentwicklung. Ähnliche Zahlen und Tendenzen geben der Bundesverband des Deutschen Lebensmittelhandels e. V. und das EHI Retail Institute an [BVL2007, EHI2007].

Jakobs gibt für 2005 insgesamt 57.175 LEHs[1] an [Jakobs2006]. Abweichungen zu den IRI-Zahlen ergeben sich insbesondere bei den kleinen Lebensmittelselbstbedienungsgeschäften, den Super- und Verbrauchermärkten.

Tabelle 3.1: Größe und Anzahl der verschiedenen Ladenformate

| Ladenformat [EHI2001] | Fläche in $m^2$ | Anteil Lebens-mittel | Jahr 2000 [DKV2002] | Jahr 2005 [IRI2007] | Jahr 2005 [EHI2007] | Jahr 2006[2] [EHI2007] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Lebensmittelselbst-bedienungsläden und -märkte | < 400 | > 90 % | 38.000 | 26.870 | 32.740 | 28.900 |
| Lebensmittel-discounter | 400 – 800 | 80 – 85 % | 13.000 | 14.800 | 14.745 | 14.806 |
| Supermärkte | 600 – 1.500 (2.500) | > 75 % | 9.000 | 6.190 | 8.430 | 8.170 |
| Verbrauchermärkte | 1.500 – 5.000 | ca. 30 % | 1.600 | 1.030 | 2.995 | 3.150[3] |
| SB-Warenhäuser | 5.000 – 20.000 | ca. 30 % | 650 | 710 | | |
| Summe | | | 62.250 | 49.600 | 58.910 | 55.026 |

Nach einer Erhebung des VDMA gab es in Deutschland im Jahr 2000 ca. 17.000 Tankstellen. Die typische in einer mittelgroßen Tankstelle installierte Kälteleistung liegt bei 12 bis 15 kW [DKV2002]. Die Anzahl der Tankstellen in Deutschland ist weiter rückläufig [IRI2006]. Anfang 2006 waren es demnach noch 15.187 [IRI2006] und

[1] Die von Jakobs geschätzten 30 Lebensmittelabteilungen der Warenhäuser bleiben hier unberücksichtigt.
[2] Bei den EHI-Zahlen für 2007 handelt es sich um vorläufige Zahlen.
[3] Zahl des EHI enthält auch Lebensmittelabteilungen der Kaufhäuser, z.B. 127 bei Kaufhof und 67 bei Karstadt.

Anfang 2007 15.036, Tendenz abnehmend mit ca. 150 pro Jahr seit 1999 [ARCD2007]. Tankstellenshops werden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet.

## 3.2 Sonstiges Europa

In Süd- und Osteuropa finden sich deutlich mehr kleine Lebensmitteleinzelhändler, weniger Supermärkte. Bild 3.1 zeigt die Anzahl der LEH pro Einwohner in allen EU Mitgliedsstaaten. Wenn davon ausgegangen wird, dass in allen Ländern pro Kopf annähernd gleich viele Lebensmittel gekauft werden, müssen in Ländern mit wenigen LEH pro Einwohner die einzelnen Geschäfte deutlich größer sein, z. B. in Deutschland oder Holland, als in solchen Ländern mit sehr vielen LEH pro Einwohner, z. B. Bulgarien oder Griechenland. Bild 3.2 bestätigt diese Annahme indem für ausgewählte Länder die Größen der LEH aufgeführt sind.

Die Discounter waren bisher ein primär deutsches (Aldi, Lidl, Netto, Norma, Penny, Plus etc.) und dänisches (Fakta, Netto, Rema1000 etc.) Phänomen, halten aber in anderen europäischen Ländern Einzug; insbesondere durch Markteröffnungen der deutschen Ketten im Ausland.

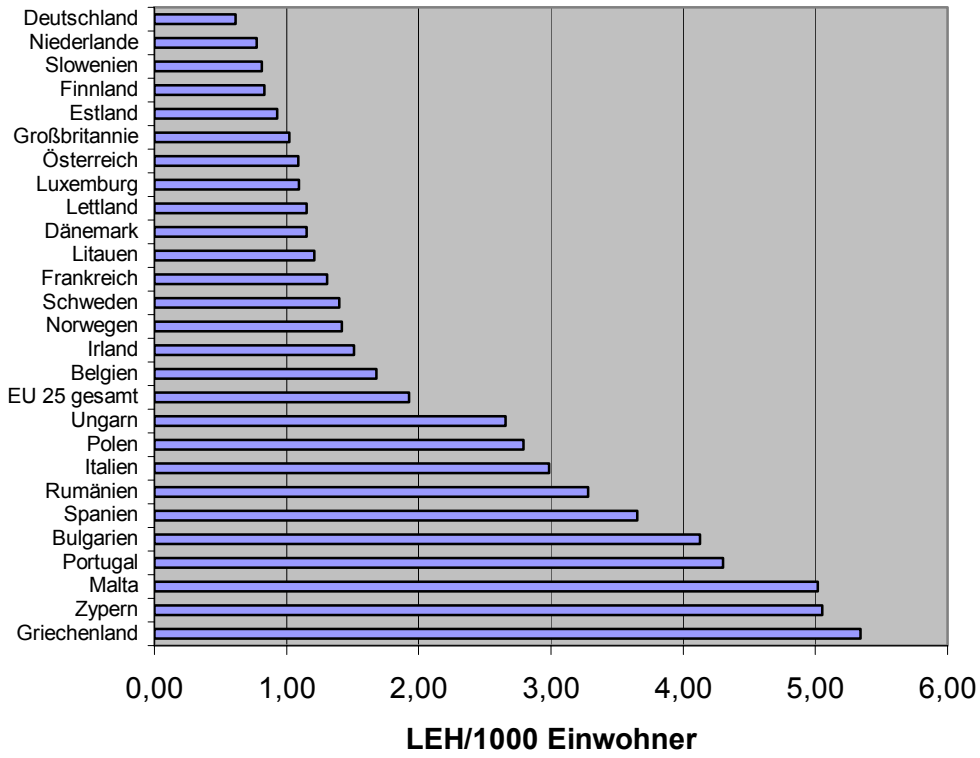



Bild 3.1: Anzahl Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte pro 1.000 Einwohner für EU 27 soweit Daten verfügbar. Anzahl der LEH aus [Eurostat2004], Anzahl der Einwohner aus [Eurostat2007].

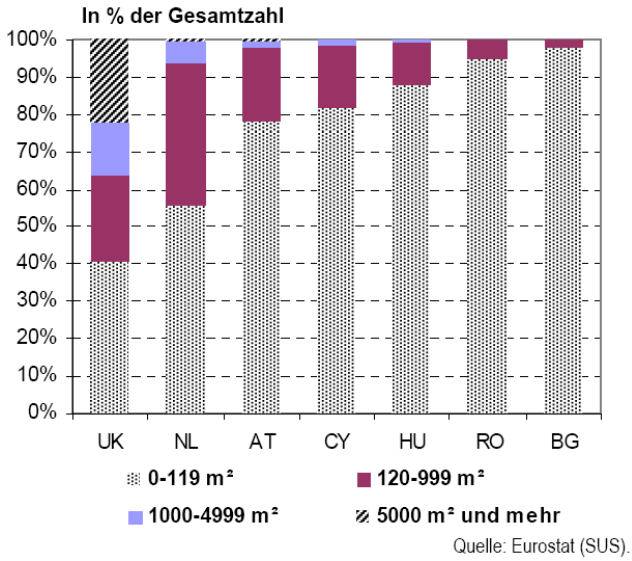



Bild 3.2: Zahl der Einzelhandelsgeschäfte nach Verkaufsfläche ($m^2$) für Länder für die Daten für das Jahr 2002 verfügbar sind [Eurostat 2006]. Der Einzelhandel umfasst Food- und Nonfood-Einzelhandel (ohne Tankstellen und ohne Handel mit Kraftfahrzeugen). EU-25-weit machte der Lebensmitteleinzelhandel im Jahr 2002 etwa 44 % des gesamten im Einzelhandel getätigten Umsatzes aus [Eurostat2006].

## 3.3 USA

Einige der beschriebenen Modelltechnologien, siehe Technologiedatenblätter, finden sich nur in den USA. Zum Teil finden sich in den USA für auch in Europa genutzte Technologien besonders umfangreiche öffentlich zugängliche Studien mit Energieverbrauchsdaten. Um die Zahlen in diesen Studien besser beurteilen zu können, ist es notwendig, einige Besonderheiten des amerikanischen Marktes zu kennen. Unterschiede zu Deutschland ergeben sich u. a. bei den Ladenöffnungszeiten – in den USA in der Regel von 6 bis 24 Uhr, für so genannte Supercenter auch 24 Stunden am Tag an sieben Tagen in der Woche [MacDonald2007] – , beim Platz – die amerikanischen Märkte haben i. d. R. deutlich breitere Gänge –, bei der Raumluft – amerikanische Märkte sind nahezu ausnahmslos klimatisiert – und beim Kenntnisstand der Kälteanlagenbauer – es gibt dort keine mehrjährige Berufsausbildung.

Der DKV-Statusbericht Nr. 22 gibt für die USA 30.000 Supermärkte mit zentralen Kälteanlagen an [DKV2002]. Die Quelle für diese Zahlen stammt von 1996, es dürfte sich also um die Zahl der amerikanischen Supermärkte im Jahr 1994 oder 1995 handeln. Das EHI Retail Institute gibt für die 24 größten Lebensmittelhandelsunternehmen der USA (ohne 7-Eleven) im Jahr 2006 30.247 Verkaufsstellen sowie für die fünf größten Convenience-Store-Betreiber 15.223 Verkaufsstellen an [EHI2007]. Das amerikanische Handelsmagazin „Supermarket News“ listet Anfang 2008 für die 75 umsatzstärksten Supermarktketten 41.120 Supermärkte und Convenience Stores [SN2008]. Bei ca. 300 Mio. Einwohnern in den USA entspräche das einer Supermarktdichte von ca. 0,13 LEH pro 1000 Einwohner gegenüber ca. 0,7 LEH pro 1000 Einwohner in Deutschland, s. Bild 3.1. Es gibt jedoch für USA auch andere, deutlich höhere Zahlen. So gibt Faramarzi für das Jahr 2003 über 199.000 Supermärkte an, die zusammen 95,8 TWh elektrische Energie verbraucht haben [Faramarzi2004]. Jahres-Energieverbräuche liegen zwischen 463 und 754 kWh/m$^2$ [1], wovon ca. 50 % auf die Kältetechnik (ohne Klimaanlagen) entfallen [Faramarzi2004], siehe Bild 3.3. Die Kosten für den Energieverbrauch können höher sein als der Gewinn eines Supermarktes der typischerweise 1,2 % beträgt [Faramarzi2004]. Dennoch werden die Kälteanlagen allein auf Grund der Investitionskosten ausgewählt [Faramarzi2007].

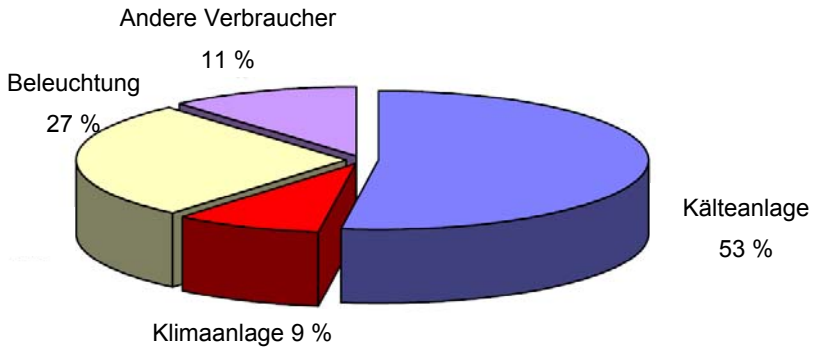



Bild 3.3: Energieverbrauch in einem typischen amerikanischen Supermarkt mit ca. 4650 m$^2$ und einem Energieverbrauch von 4,65 kWh/m$^2$ [Faramarzi2004].

[1] Für deutsche Supermärkte werden von Pries jährliche Energieverbräuche von 300 bis 800 kWh/m$^2$ angegeben [Pries2008].

Der Ausbildungsstand der amerikanischen Kälteanlagenbauer ist häufig schlechter als der von deutschen Kälteanlagenbauern. Gleichzeitig sind amerikanischen Supermärkte größer und die Kälteanlagen weit verzweigter. Dies resultiert in höheren Leckageraten von bis zu 30 % [Walker1999]. Vom Gesetzgeber sind maximal 35 % Leckagen im jährlichen Durchschnitt gestattet (Clean Air Act, Abschnitt 608).

In den USA läuft seit dem Jahr 2007 ein Projekt der US EPA mit dem Namen „EPA GreenChill Partnership“ bei dem Supermarktketten freiwillig Daten zum Energieverbrauch und zu Kältemittelleckagen abgeben können. Die Daten werden vom Oak Ridge National Laboratory analysiert. Ergebnisse sollen Mitte 2008 veröffentlicht werden. Die Bereitschaft der Supermarktketten Daten zu liefern ist bisher eher schlecht [Perti2007].

## 3.4 Marktentwicklung

Die übergeordnete Entwicklung im Lebensmitteleinzelhandelssektor zeigt für Deutschland mehr Discounter bei gleich vielen großen und weniger kleinen LEH-Geschäften. In Osteuropa werden mehr Supermärkte und dafür weniger kleine LEH erwartet [IRI2007]. In ganz Europa nehmen die Vertriebstypen Discount und Hypermarkt zu, jedoch mit gebremstem Tempo bei den Großflächen [BVL2007]. Bild 3.4 zeigt die Entwicklung in Deutschland in den letzten 27 Jahren. Noch deutlicher wird diese Entwicklung hin zu mehr Discountern, wenn man die Umsatzentwicklung der vergangenen 17 Jahre betrachtet, Bild 3.5 [RP2007].

In Deutschland steigt der Umfang der gekühlten Waren und damit die Kühlfläche durch Erweiterung der Bedienungsbereiche für Wurst und Käse (insbesondere bei großen Märkten), eine Zunahme der temperaturgeführten Convenience-Produkte sowie die Ausdehnung von Molkerei und Tiefkühlsortimenten [Lambertz2008].

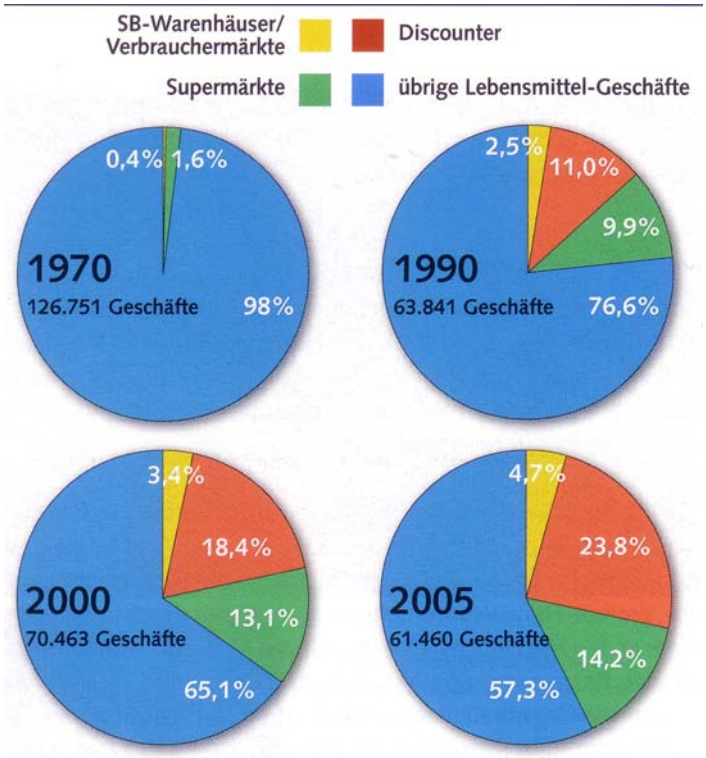



Bild 3.4: Zahl der Lebensmittelgeschäfte nach Betriebsformen 1970 – 2005 nach Handel aktuell [IRI2007].

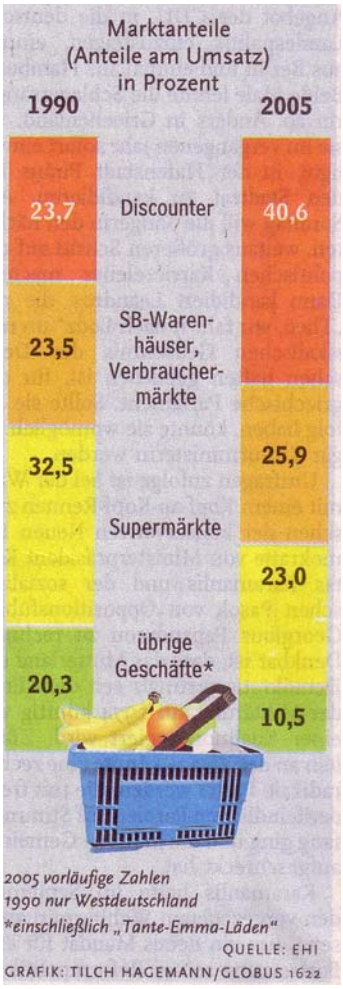



Bild 3.5: Marktanteile nach Betriebsformen 1990 und 2005 nach EHI [RP2007].

# 4. Gesetzgebungen zu F-Gasen

## 4.1 EU F-Gas Verordnung

In der EU unterliegen alle ortsfesten Kälteanlagen mit fluorierten Kohlenwasserstoffen seit dem 4. Juli 2007 der sogenannten F-Gas Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 842/2006). Die F-Gas Verordnung schreibt u. a. bestimmte regelmäßige Dichtheitskontrollen vor, z. B. für Anlagen mit mehr als 30 kg Füllmenge einmal alle 6

Monate und für Anlagen mit einer Füllmenge von mehr als 300 kg einmal alle drei Monate. Anlagen mit einer Füllmenge von mehr als 300 kg fluorierter Kältemittel müssen mit einem Leckageerkennungssystem[1] ausgerüstet werden. Bei Anlagen mit kleinerer Füllmenge erlaubt ein ordnungsgemäß funktionierendes Leckageerkennungssystem eine Verlängerung des Zeitintervalls zwischen den einzelnen Prüfungen. Dadurch sollen die Emissionen von Treibhausgasen reduziert werden. Es werden jedoch im Rahmen der F-Gas Verordnung keine Beschränkungen über den Einsatz von fluorierten Kältemitteln in ortsfesten Anlagen festgelegt.

Einzelne Länder (z. B. Dänemark, Niederlande, Norwegen, Österreich und Schweden) haben mehr oder weniger funktionierende verschärfende Regelungen. Diese Länder sind mit ihren jeweiligen Regelungen im Folgenden in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

## 4.2 Dänemark

In Dänemark gibt es ca. 2.200 Supermärkte [Bertelsen2002]. Seit 1.1.2007 besteht für die gesamte Kältebranche ein HFKW-Verbot für Anlagen mit Kältemittelfüllmengen von mehr als 10 kg. Das Dänische HFKW-Verbot darf laut EU-Entscheidung zunächst bis 2012 in Kraft bleiben.

Darüber hinaus besteht in Dänemark eine $CO_2$-Abgabe für die Emission von Treibhausgasen. Diese wird bei der Erzeugung von elektrischer Energie aus Gas oder Kohle genauso erhoben wie beim Verbrennen von Heizöl. Der Kunde zahlt die $CO_2$-Steuer beim Kauf von Strom, Benzin oder Heizöl. Seit 1. März 2001 wird auch beim Kauf von Kältemitteln mit einem Treibhauspotential diese $CO_2$-Steuer erhoben. Die $CO_2$-Abgabe beträgt derzeit im Durchschnitt 100 DKK pro Tonne $CO_2$ (0,10 DKK/kg). Diese Abgabe wurde ursprünglich eingeführt, um einen Anreiz zum Energiesparen zu schaffen. Auf Basis dieser $CO_2$-Abgabe wird seit einigen Jahren auch auf andere Treibhausgase eine $CO_2$-Abgabe erhoben, wobei der Satz 0,10 DKK pro kg $CO_2$-Äquivalent verwendet wird. Die Höhe der $CO_2$-Abgage ist nach oben auf 400 DKK/kg begrenzt. Es ergeben sich somit die in Tabelle 4.1 aufgeführten Abgaben für die in

[1] Leckageerkennungssysteme sind umfassend im Forschungsvorhaben FKT 118/05 des Forschungsrats Kältetechnik e.V. behandelt [FKT2007].

Supermärkten üblicherweise eingesetzten Kältemittel, die zusätzlich zur Recyclinggebühr (KMO – 30 DKK/kg entspr. ca. 4 €/kg) und zur Mehrwertsteuer (25 %) anfallen.

Tabelle 4.1: Dänische Treibhausgassteuern für ausgewählte Kältemittel, Stand 2007 [http://www.skm.dk/tal_statistik/satser_og_beloeb/184.html]

| | | |
|---|---|---|
| R134a | 130 DKK/kg [1)] | ca. 17,33 €/kg |
| R404A (HFC-143a/HFC-125/134a) | 378 DKK/kg | ca. 50,40 €/kg |
| R507A (HFC-125/HFC-143a) | 385 DKK/kg | ca. 96,25 €/kg |

[1)] 1 Euro entspricht ca. 7,5 DKK.

Die Treibhausgassteuer wird in Dänemark bei der Rückgabe von Kältemittel nicht zurückerstattet, da sie nicht auf bereits vor der Einführung des Gesetzes in Kälteanlagen befindliches Kältemittel erhoben wurde. Umweltpolitisch wäre dies zwar sinnvoll, jedoch befürchtete das dänische Finanzministerium einen Verstoß gegen EU-Recht, da ja bei der Rückgabe von gebrauchtem Kältemittel nicht ersichtlich ist, ob auf dieses Steuer gezahlt wurde oder nicht [Jensen2007].

Die Treibhausgassteuer hatte in den Jahren von 2001 bis 2006 zu einer Anzahl von verschiedenen Supermarktkälteanlagen ohne F-Gase geführt. Wobei sich die Anzahl gesehen am gesamten dänischen Supermarktkältemarkt von ca. 200 neuen Anlagen pro Jahr recht bescheiden ausnahm [Madsen2007]. Die durch die dänischen Treibhausgassteuern verursachten zusätzlichen Kosten für eine Standard-HFKW-Anlage waren nicht hoch genug, um die Mehrkosten für HFKW-freie Anlagentechnologie zu rechtfertigen. Seit Beginn der Füllmengengrenze für HFKW von 10 kg seit 1. Januar 2007, werden fast nur noch Anlagen mit natürlichen Kältemitteln oder solche mit sehr kleiner Füllmenge gebaut. Da nicht die gesamte dänische Kältebranche den gleichen Kenntnisstand hat, werden derzeit zum Teil beim Anlagenbau viele Fehler gemacht [Madsen2007]. In Dänemark war die Gesetzgebung deutlich schneller als die entsprechende Weiterbildung des Kälteanlagenbauerhandwerks. Erst kurz vor Inkrafttreten des HFKW-Verbots zum

1. Januar 2007 wurden entsprechende Beratungsmaßnamen durch staatliche Zuschüsse angeboten. Für jede „Aufgabe“ werden 5 Stunden kostenlose Beratung durch erfahrene Ingenieure angeboten [www.hfc-fri.dk]. Diese kostenlose Beratung wird für drei Jahre (2007 bis 2009) vom dänischen Staat bezahlt.

## 4.3 Niederlande

In den Niederlanden gibt es seit 1992 ein Programm, welches die Dichtheit von Kälteanlagen steigern soll: STEK. Es werden Verlustraten von 4 bis 5 % berichtet [Maaten2007 und Yellen2002]. Die Effektivität von STEK und den berichteten Leckageraten ist jedoch nicht unumstritten. Je nach Auslegung der berichteten Leckageinformationen steigen die berichteten 4,5 % auf bis zu 12,6 % an [Anderson2005].

## 4.4 Norwegen

In Norwegen werden noch höhere Treibhausgassteuern als in Dänemark auf alle Kältemittel erhoben. Tabelle 4.2 gibt einen Auszug wieder. Seit 2007 ist der Steuersatz angehoben worden auf 0,19 NOK/kg $CO_2$-Äquivalent, so dass R404A jetzt ca. 740 NOK pro kg kostet. In Norwegen gibt es die Treibhausgassteuer bei der Rückgabe von gebrauchtem Kältemittel zurück. Norwegen ist nicht in der EU und musste von daher, im Gegensatz zu Dänemark, keine Verstöße gegen EU-Recht befürchten.

Tabelle 4.2: Norwegische Treibhausgassteuern für ausgewählte Kältemittel, Stand 2007 [Toll2007]

| | bis 2007 | | ab 2007 | |
|---|---|---|---|---|
| | NOK/kg [1)] | €/kg | NOK/kg [1)] | €/kg |
| R134a | 243 | ca. 31,60 | 252 | ca. 32,50 |
| R404A | 610 | ca. 79,20 | 632 | ca. 82,10 |
| R507A | 617,50 | ca. 80,20 | 640 | ca. 83,10 |

[1)] 1 Euro entspricht ca. 7,7 NOK.

Außerdem betrachten die Norwegischen Einzelhändler und Kälteanlagenbauer die Diskussionen im Rahmen der EU F-Gase-Verordnung als Hinweis darauf, dass die Zeit für HFKW-Anwendungen begrenzt sein wird. Deshalb sehen die verschiedenen Norwegischen Supermarktketten (COOP, IKA, Rema og Norgesgruppen) sehr positiv auf natürliche Kältemittel [Bakken2007].

## 4.5 Österreich

In Österreich gibt es seit 2002 eine entsprechende Verordnung, die die Verwendung von teilfluorierten und vollfluorierten Kohlenwasserstoffen regelt; die HFKW-FKW-SF6-Verordnung (Industriegas-V, BGBl. II Nr. 447/2002, mit Änderungen von BGBl. II Nr. 86/2006 und Nr. 139/2007). Eigentlich handelt es sich dabei um ein HFKW-Verbot. In der Praxis werden jedoch durch die angegebenen Füllmengenobergrenzen von 100 kg bzw. 1,5 kg Füllmenge pro kW Kälteleistung bei „ortsfesten Anlagen mit verzweigtem Rohrleitungssystem“, dies wären z. B. Supermarktkälteanlagen, keine realen Einschränkungen erreicht [Kaltenbrunner2007].

## 4.6 Schweden

In Schweden (ca. 6060 Supermärkte im Jahr 2003 [Jansson2004] war bis zur Einführung der F-Gase Verordnung die maximal in einer Kälteanlage erlaubte Füllmenge auf 20 kg für Normalkühlung und 30 kg für Tiefkühlung begrenzt [Colbourne1999]. Insgesamt durften in einem Markt alle Kälte- und Klimaanlagen

zusammen nicht mehr als 200 kg HFKW enthalten [Schenk2007]. Es wurden und werden deshalb in allen Bereichen der Kältetechnik sehr viele indirekte Kälteanlagen gebaut oder es erfolgt eine Aufteilung in sehr viele kleine Anlagen. Bei den indirekten Anlagen geht die Entwicklung hin zu kleinen fabrikgefertigten Anlagen mit Plattenwärmeüberträgern, die nur noch auf der warmen Seite an einen Glykolkreislauf mit Kühler angeschlossen werden und auf der kalten Seite den Kälteträger abkühlen. In großen Verbrauchermärkten mit mehreren tausend Quadratmetern Verkaufsfläche finden sich weit über zehn derartige parallelgeschaltete Anlagen. Die Dichtheit der einzelnen Kälteanlage ist durch die Fabrikfertigung deutlich höher als bei einer traditionellen Verbundanlage. Außerdem tritt bei einer Havarie nur die Füllmenge einer Anlage aus, d. h. maximal 20 bzw. 30 kg. Die Leistungsanpassung ist durch die vielen kleinen Anlagen auch sehr gut möglich, weshalb schwedische indirekte Kälteanlagen häufig weniger Energie verbrauchen als vergleichbare Verbundanlagen [Hellsten2007].

### 4.7 Schweiz

Seit 2007 gibt es in der Schweiz ein sogenanntes „Minergie-Label“ für Verkaufsstellen. Diese freiwillige Richtlinie lässt unter anderem einen maximalen Energieverbrauch von 4 MWh pro Laufmeter offenes Kühlregal zu [Schmutz2007]. Migros und Coop wollen in Zukunft nur noch Märkte nach Minergi-Standard bauen [Schmutz2007]. Daneben gibt es in der Schweiz eine entsprechende Gesetzgebung, die für Supermarktkälteanlagen von mehr als 80 kW Kälteleistung und mehr als 3 Kühlstellen indirekte Kälteanlagen vorschreibt [Schmutz2007]. Zudem schreibt das Gesetz die Meldung, die Bewilligung und die Dichtheitskontrolle von Anlagen mit in der Luft stabilen Kältemitteln vor. In der Schweiz laufen derzeit (Jahr 2007) Bestrebungen den Einsatz von R744 für die Tiefkühlung gesetzlich bindend vorzuschreiben [Schmutz2007].

## 5. Darstellung der Kältemittel und Technologien

### 5.1 Einleitung

Supermarktkälteanlagen dienen der Frischhaltung und Tiefkühlung von Verkaufswaren, vor allem Lebensmitteln. Unterschiedliche Waren, die in Supermärkten verkauft werden, erfordern verschiedene Lagertemperaturen. Die folgende Liste zeigt die

unterschiedlichen Kühltemperaturen, die in einem typischen Supermarkt je nach Warenart benötigt werden:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Tiefkühlware: | -29 | bis | -18 °C |
| Speiseeis: | -26 | bis | -22 °C |
| Fisch und Meeresfrüchte: | -5 | bis | -1 °C |
| Fleisch und Geflügel: | -1 | bis | 3 °C |
| Frischprodukte: | -3 | bis | 8 °C |
| Obst und Gemüse: | 7 | bis | 10 °C |

Eine typische Supermarkt-Kälteanlage wird Verdampfungstemperaturen von ca. -38 °C (TK) bzw. ca. -8 °C (NK) bedienen.

Je nach Anwendungsbereich und -zweck kann zwischen vielen Technologieausführungen unterschieden werden. In der Gewerbekälte unterscheidet man häufig drei Modelltechnologien:

- Steckerfertige Kühlmöbel
- Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz
- Verbundanlagen

Eine weitere Unterscheidung kann nach zentralen und dezentralen Systemen erfolgen.

Bei zentralen Anlagen (z. B. Verbundkälteanlagen) werden mehrere Kühlstellen durch eine Kälteanlage versorgt. Der Verbundkältesatz besteht aus mehreren parallel geschalteten Verdichtern. Während sich die Kühlstellen im Verkaufsraum befinden, ist die eigentliche Kälteanlage (Verdichter) meist in einem separaten Raum (Maschinenraum) installiert. Kälteanlage und Kühlstellen sind über verzweigte Rohrleitungssysteme verbunden. Die meisten Anlagen verfügen über getrennte Systeme für den Bereich der Tiefkühlung (TK - Produkttemperatur ca. -18 °C) und den Bereich der Normalkühlung (NK -Produkttemperatur ca. 0 bis +8 °C). Kälteleistungen liegen für zentrale Supermarktkälteanlagen mit Verdichterverbundschaltungen zwischen ca. 30 und 1.500 kW. Zu den zentralen Anlagen können je nach Aufstellungsort auch Verflüssigungssätze gehören. In kleineren Lebensmittelmärkten

kommen derartige fabrikgefertigte Einheiten aus Verdichter(n), Verflüssiger, Sammler und Regelungskomponenten zur Anwendung und werden an zentraler Stelle aufgestellt. Diese haben in der Regel Kälteleistungen bis zu ca. 50 kW.

Dezentrale Anlagen (Geräte) können als industriell vorgefertigte, kompakte Einheiten mit integriertem Verdichter und Kondensator (z. B. steckerfertige Kühlmöbel, Flaschenkühler oder Stopferaggregate für Kühlräume) oder als Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz (Einzelkühlmöbel oder Einzelkühlraum) ausgeführt werden. Die Kälteleistung von dezentralen Anlagen mit Verflüssigungssatz reicht bis etwa 20 kW für größere Kühlräume oder nachträglich installierte Kühlmöbel. Typische Anwendungsbereiche sind z. B. Fleischereien oder Fleischtheken in kleineren Supermärkten, aber auch Erweiterungsinstallationen bei größeren Märkten.

Die verschiedenen Ausführungen unterscheiden sich in ihrer Flexibilität bei der Umgestaltung des Marktes, Größe und Kälteleistung, aber auch in ihrem spezifischen auf eine „Einheit Kühlgut“ bezogenen Energieverbrauch. So sind die spezifischen Energieverbräuche der Verflüssigungssätze von Einzelanlagen häufig größer als bei Verbundanlagen. Kompaktgeräte (steckerfertige Kühlmöbel) verbrauchen gegenüber Einzelanlagen nochmals mehr spezifische Energie, siehe Tabelle 5.1. Dafür sind steckerfertige Kühlmöbel besonders flexibel und eignen sich vor allem für kleine Läden (z. B. Kioske), in denen die Installation einer Verbundanlage nicht sinnvoll ist. In der Praxis werden Läden häufig mit einer Kombination aus zwei oder allen drei Technologien ausgestattet.

Tabelle 5.1: Energieverbrauch von steckerfertigen Geräten im Vergleich zu Verbundanlagen basierend auf Messungen in dänischen Supermärkten im Jahr 1994 [Bertelsen2002]

| Art des Verbrauchers | kWh/Jahr/Meter bzw. kWh/Jahr/Tür |
|---|---|
| Kühlregal an Verbundanlage | 3.000 |
| Mopro-Raum [1)] pro Tür | 2.450 |
| Tiefkühltruhe an Verbundanlage | 2.400 |
| Tiefkühltruhe steckerfertig | 3.500 |
| Normalkühltruhe an Verbundanlage | 900 |
| Normalkühltruhe steckerfertig | 1.500 |

[1)] in Dänemark ist es üblich, den Kühlraum für Molkereiprodukte (Mopro) direkt an den Verkaufsraum anzubauen und den Kunden den Warenzugriff über Glastüren vom Verkaufsraum aus zu ermöglichen. Die einzelnen Regalböden werden dabei von hinten, also vom Kühlraum aus befüllt.

Aus Sicht der Herstellung lassen sich die Supermarktkühlgeräte und -kälteanlagen nochmals in zwei Gruppen gliedern:

- in einer Fabrik hergestellte, gebrauchsfertige Geräte und Anlagen
- vor Ort aus Einzelteilen installierte Anlagen

Zur ersten Gruppe gehören steckerfertige Geräte, z. B. Kühltruhen oder -regale, Verflüssigungssätze aber auch Komponenten für Kälteanlagen (Verdampfer, Verflüssiger, Verdichter, Expansionsventile). Verbundkälteanlagen und Anlagen mit einem Verflüssigungssatz gehören der zweiten Gruppe an. Diese werden vor Ort installiert.

Die Energiekosten für den Betrieb der Kälteanlage eines Supermarktes unterscheiden sich je nach Technologie und liegen häufig in der gleichen Größenordnung wie der mit dem jeweiligen Supermarkt erwirtschaftete Profit. Die Wahl der Kälteanlage ist deshalb vom ökonomischen Gesichtspunkt her eine wichtige Entscheidung.

Anforderungen an die jeweilige Modelltechnologie sind:

- Niedrige Investitionskosten
- hohe Zuverlässigkeit (bei Totalausfall der Anlage ist der Wert der verdorbenen Waren evtl. größer als die Investitionskosten der Kälteanlage)
- Normalkühlung: Temperatur und Feuchte sind wichtig (austrocknen der Lebensmittel)
- Tiefkühlung: nur Temperatur ist wichtig
- Umweltaspekte (global: Ozonabbau, direkter und indirekter Beitrag zum Treibhauseffekt, Umweltbelastung bei der Herstellung und/oder der Entsorgung etc.; lokal: z. B. Toxizität und Brennbarkeit der Kältemittel)
- Energieverbrauch und damit Ausgaben für Energie über die Lebensdauer der Anlage
- Wartungskosten

Deutsche Supermärkte werden ca. alle 7 Jahre umgebaut, wobei in der Regel auch die Kälteanlage geändert wird, da die Möbel zum Teil umgestellt werden. Ca. alle 14 Jahre, d. h. bei jedem zweiten Umbau wird die gesamte Kälteanlage erneuert. Rohrleitungen und einige Möbel werden jedoch häufig wiederverwendet [Schmidt2007a].

## 5.2 Kältemittel für Supermarktkälteanlagen

Bis Mitte der 1990er Jahre wurden in Supermarktkälteanlagen die chlorierten Kältemittel R22, R502 und zum Teil R12 eingesetzt. Das Ozonloch und die deshalb erlassenen Einschränkungen in der Verwendung von chlorhaltigen Kältemitteln haben zum Wechsel auf teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW), hier R404A und zum Teil R134a geführt. Bei diesem Wechsel war man darauf bedacht, möglichst ähnliche thermodynamische Eigenschaften der Ersatzkältemittel zu erzielen. Der Treibhauseffekt und die daraus resultierenden Einschränkungen bei der Verwendung von fluorierten, synthetischen Kältemitteln mit hohem Treibhauspotential führen in letzter Zeit auch bei Supermarktkälteanlagen zu einer Neubewertung von natürlich vorkommenden Substanzen im Hinblick auf ihre Verwendung als Kältemittel.

Wichtige Anforderungen an Kältemittel für Supermarktkälteanlagen sind u. a.:

- kein Ozonabbaupotential
- niedriges Treibhauspotential
- hohe energetische Effizienz – dazu zählen:
    - guter Wärmeübergang
    - hohe Wärmeleitfähigkeit
    - niedrige Viskosität
    - Druckverhältnis – Verhältnis aus Verflüssigungs- und Verdampfungsdruck
    - niedrige Druckabfälle in Rohrleitungen
    - hohe Wirkungsgrade bei der Verdichtung
- chemisch stabil, um in der Kälteanlage bei hohen Verdichtungsendtemperaturen nicht zu zerfallen
- inert
- hohe elektrische Durchschlagfestigkeit bei hermetischen und halbhermetischen Verdichtern
- nicht brennbar
- nicht giftig
- nicht korrosiv
- preiswert
- kompatibel zu Materialien der Kälteanlage
- hohe auf das Volumen im Verdichteransaugzustand bezogene Verdampfungswärme
- Verdampfungsdruck oberhalb von 1 bar absolut um Lufteintritt an Leckstellen zu verhindern
- Gefrierpunkt unterhalb der Verdampfungstemperatur
- Verflüssigungsdruck unter 25 bar bzw. 32 bar
- gute Löslichkeit/Mischbarkeit mit Schmierstoffen
- einfach zu detektieren für Lecksuche

Es ist klar, dass kein Kältemittel alle Anforderungen erfüllen kann. Je nach Anwendungsfall oder Anlagenschaltung muss aus der Vielzahl von möglichen

Kältemitteln das geeignete ausgewählt werden. Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht der zurzeit in neuen Supermarktkälteanlagen eingesetzten Kältemittel mit einigen ihrer Eigenschaften. Beim Treibhauspotential (GWP) sind sowohl die im Protokoll von Kyoto international anerkannten und politisch verbindlichen Werte, die das IPCC 1996 veröffentlicht hat [IPCC1996], angegeben, als auch die neuesten von IPCC und UNEP verwendeten Werte [UNEP2006].

**Tabelle 5.2:** Eigenschaften ausgewählter Kältemittel für Supermarktkälteanlagen [UNEP2006]. R22 ist nicht als Alternative aufgeführt, sondern nur als Referenzkältemittel, da es zu Prä-Ozonloch-Zeiten das bevorzugte Kältemittel für Supermarktkälteanlagen war. R407C, R410A und R507A werden nur sehr selten in Supermärkten eingesetzt und sind nur der Vollständigkeit halber gezeigt.

| | Normal-siede-punkt in °C | kritische Temp. in °C | Druck in bar bei Siedetemperatur von | | | Brennbar | giftig | ODP | GWP[1)] | | vol. Verdam-pfungs-wärme bei 0 °C kJ/m³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | -30 °C | 0 °C | 40 °C | | | | IPCC 1996 | UNEP 2006 | |
| **R22** | -40,8 | 96,1 | 1,6 | 5,0 | 15,3 | nein | nein | 0,04 | 1.500 | 1.810 | 4.360 |
| **R134a** | -26,1 | 101,1 | 0,8 | 2,9 | 10,2 | nein | nein | 0 | 1.300 | 1.430 | 2.870 |
| **R404A** | -46,5 | 72,1 | 2,1 | 6,1 | 18,2 | nein | nein | 0 | 3.260 | 3.900 | 5.070 |
| **R407C[2)]** | -43,6 | 86,0 | 1,9 | 5,6 | 17,5 | nein | nein | 0 | 1.530 | 1.800 | 4.230 |
| **R410A** | -51,4 | 72,5 | 2,7 | 8 | 24,3 | nein | nein | 0 | 1.730 | 2.100 | 6.780 |
| **R507A** | -46,7 | 70,9 | 2,1 | 6,2 | 18,7 | nein | nein | 0 | 3.300 | 4.000 | 5.230 |
| **R600a Isobutan** | -11,7 | 134,7 | 0,5 | 1,6 | 5,3 | ja | nein | 0 | ? | ~20 | 1.510 |
| **R290 Propan** | -42,2 | 96,7 | 1,7 | 4,7 | 13,7 | ja | nein | 0 | 6,3 | ~20 | 3.880 |
| **R1270 Propen** | -47,7 | 92,4 | 2,1 | 5,9 | 16,5 | ja | nein | 0 | ? | ~20 | 4.670 |
| **R717 Ammoniak** | -33,3 | 132,3 | 1,2 | 4,3 | 15,5 | (ja) | ja | 0 | ? | < 1 | 4.360 |
| **R744 Kohlendioxid** | (-78,4) [3)] | 31,0 | 14,3 | 34,8 | 90 - 120 | nein | < 10 % nein | 0 | 1 | 1 | 22.550 |

[1)] bezogen auf $CO_2$ bei einem Zeithorizont von 100 Jahren

[2)] Temperaturgleit von 6 bis 7 K

[3)] Tripelpunkt von $CO_2$ bei 5,18 bar und –56 °C

”Natürliche” Kältemittel

Bild 5.1 zeigt Dampfdruckkurven aller in Supermarktkälteanlagen verwendeten Kältemittel: R22, R134a, R404A, R600a, R290, R1270, R717 und R744. Als Ersatz für

R134a gibt es demnach keinen natürlichen Reinstoff, der eine ähnliche Dampfdruckkurve aufweist. R600a führt zu niedrigeren Anlagendrücken und R290 und die anderen natürlichen Alternativen zu höheren Anlagendrücken. Anders sieht es bei R22 aus. R290 hat eine annähernd gleiche Dampfdruckkurve und kann deshalb aus Sicht des Anlagendruckes recht problemlos in für R22 ausgelegten Systemen betrieben werden (siehe unten). R744 hat im für Supermarktkälteanlagen relevanten Temperaturbereich einen deutlich höheren Druck als alle anderen Kältemittel, siehe unten.

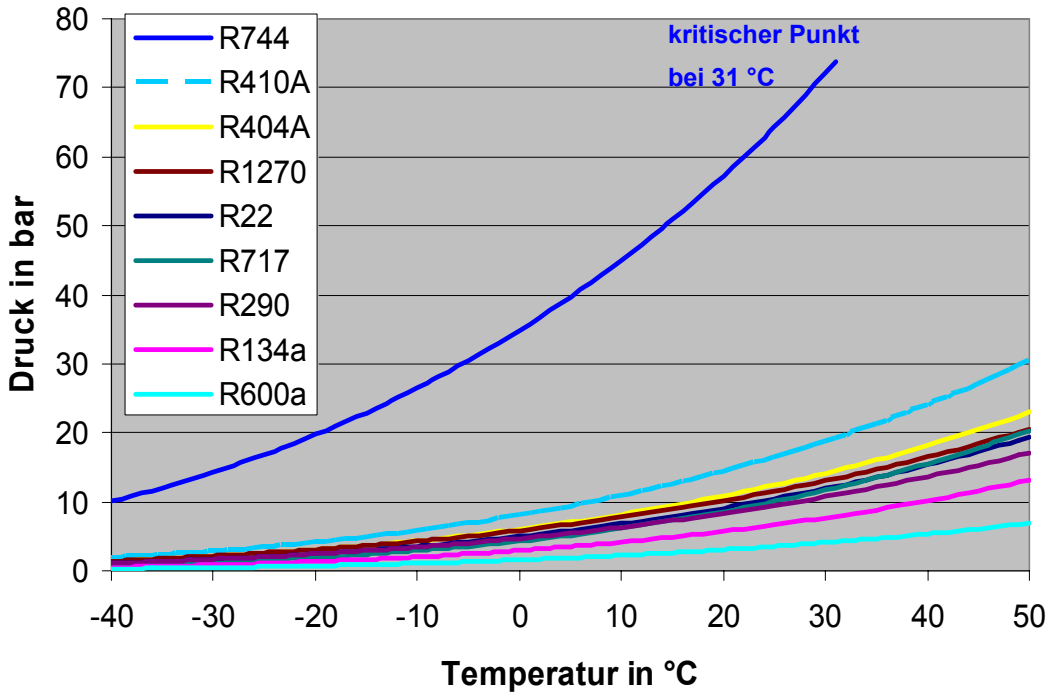



Bild 5.1: Dampfdruckkurven der in Supermarktkälteanlagen eingesetzten Kältemittel berechnet mit CoolPack version 1.46. Die Kältemittel stehen in der Legende in der Reihenfolge der Dampfdrücke, d. h. R744 mit höchstem Dampfdruck bei gegebener Temperatur oben und R600a mit niedrigstem Dampfdruck bei gleicher Temperatur unten.

## 5.3 Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Die zwei hauptsächlich in Supermarktkälteanlagen eingesetzten fluorierten chlorfreien Kältemittel R134a und R404A (Kältemittelgemisch) sind nicht brennbar und nicht giftig. Sie haben jedoch beide ein recht hohes Treibhauspotential, insbesondere R404A. Um in zentralen Supermarktkälteanlagen (Verbundanlagen) die Rückführung des Kältemaschinenöls zum Verdichter sicherzustellen, müssen Öle verwendet werden, die mit dem Kältemittel löslich sind. Das sind für halogenierte Kohlenwasserstoffe verschiedene synthetische Öle wie z. B. PAG oder POE. Diese Öle sind stark hygroskopisch, weshalb auf Luftabschluss zu achten ist. PAG- und POE-Öle werden z. T. auch für R717 und R744 verwendet. Die Problematik der Hygroskopie der Öle stellt sich dann auch dort.

### R134a

R134a ist das Standardkältemittel in PKW-Klimaanlagen und kleineren südeuropäischen und asiatischen steckerfertigen Kühlgeräten. Als Einstoffkältemittel hat es einen gegenüber Kältemittelgemischen besseren Wärmeübergang und kann somit zu höheren Kälteleistungszahlen führen als z. B. R404A. Auf der anderen Seite ist die Dichte des R134a-Kältemitteldampfes im Ansaugzustand deutlich kleiner als bei R404A, was insbesondere bei Verbundkälteanlagen mit langen Saugleitungen zu hohen Druckverlusten in der Saugleitung führen kann. In Verbundanlagen wird R134a nur im NK-Bereich eingesetzt.

Mit R134a sind die Betriebs- und Stillstandsdrücke in der Kälteanlage deutlich niedriger als mit R404A, z. B. beträgt der Verflüssigungsdruck bei 40 °C mit R134a 10,2 bar gegenüber 18,2 bar mit R404A. Durch die niedrigeren Drücke treten zum einen Leckagen seltener auf und zum anderen sind bei kleinen Leckageöffnungen, z. B. Spalt an einer nicht richtig angezogenen Bördelverschraubung, die Leckagemengen kleiner, da die treibende Druckdifferenz kleiner ist [Schmidt2007a]. R134a hat ein Treibhauspotential von 1.430[1].

[1] Im Text werden die neuesten Werte nach [UNEP2006] angegeben.

### R404A

R404A ist ein zeotropes Kältemittelgemisch aus 44 % R125, 52 % R143a und 4 % R134a mit einem Temperaturgleit von weniger als 0,5 K. Es verhält sich in Bezug auf die Verdampfungs- bzw. Verflüssigungstemperatur also annähernd wie ein Reinstoff. Bild 5.1 zeigt, dass die Dampfdruckkurve derjenigen von R22 sehr ähnlich ist. R404A wurde auch speziell für Gewerbekälteanlagen, die bisher mit R22 betrieben wurden, entwickelt. Es ist jedoch auf Grund seiner anderen Öllöslichkeits- und Ölmischbarkeitseigenschaften nicht als Drop-in Kältemittel[1] geeignet. Bei der Umstellung einer bestehenden R22-Kälteanlage auf R404A muss das Kältemaschinenöl gewechselt werden. Anstelle des bei R22 verwendeten Mineralöls wird mit R404A in der Regel ein Esteröl verwendet. Komponenten der Kälteanlage ohne Elastomerdichtungen benötigen keine Veränderung – alle Bauteile mit Elastomerdichtungen, z. B. Ventile müssen bei einer Umstellung von R22 auf R404A ausgetauscht werden [Görner2007]. R404A hat ein Treibhauspotential von 3.900[2].

### R407C

R407C ist ein zeotropes Kältemittelgemisch aus 23 % R32, 25 % R125 und 52 % R134a mit einem Temperaturgleit von 6 bis 7 K. R407C verhält sich in Bezug auf die Verdampfungs- bzw. Verflüssigungsdrücke ähnlich wie R404A, allerdings mit dem Unterschied des Temperaturgleits. Es wird überwiegend in Klimaanlagen eingesetzt. Sofern die Anlagen hermetisch dicht sind, führt der Temperaturgleit zu keinerlei Problemen. Bei Leckagen wird jedoch zunächst die niedriger siedende Komponente entweichen und es kommt zu einer Konzentrationsverschiebung. Im Bereich der Supermarktkälte wird R407C von der Firma Daikin in den sogenannten Conveni-Packs – einer Kombination aus Kälte- und Klimaanlage mit integrierter Wärmerückgewinnung – eingesetzt, siehe Technologiedatenblätter C16. R407C hat ein Treibhauspotential von 1.800[2].

### R410A

R410A ist ein zeotropes Kältemittelgemisch aus 50 % R32 und 50 % R125 mit einem Temperaturgleit von ca. 0,1 K. Es verhält sich in Bezug auf die Verdampfungs- bzw.

[1] Als Drop-In Kältemittel werden solche Kältemittel verstanden, die ohne Ölwechsel in einem bestehenden FCKW- oder H-FCKW-System eingesetzt werden können.
[2] Im Text werden die neuesten Werte nach [UNEP2006] angegeben.

Verflüssigungstemperatur also annähernd wie ein Reinstoff. Verdampferregelung und Nachfüllen von Kältemittel werden dadurch gegenüber R404A aber insbesondere gegenüber R407C sehr vereinfacht [Rivet2007].

Bild 5.1 zeigt, dass die Dampfdruckkurve höher liegt als diejenige von R22 oder R404A. Alle Komponenten müssen also für höhere Drücke, in der Regel 32 bar und zum Teil je nach Hersteller sogar bis 40 bar, zugelassen sein. Herkömmliche Komponenten sind in der Regel bis 25 bar ausgelegt. Deshalb ist der Einsatz von R410A auch später erfolgt als z. B. derjenige von R404A oder R407C, die druckfesteren Komponenten mussten erst entwickelt werden. Die höheren Drücke führen zu kleineren Anlagen und Komponenten; so können der Verdichter, die Sauggasleitung und Flüssigkeitsleitung z. B. 40 % kleiner ausfallen als bei R404A [Rivet2007]. Die Kältemittelfüllmenge reduziert sich dadurch um 30 % [Rivet2007]. Die Kälteleistungszahl ist mit R410A sowohl in der Normal- als auch in der Tiefkühlung zwischen 5 und 15 % besser als mit R404A [Rivet2007].

R410A wird bisher überwiegend in Klimaanlagen und Wärmepumpen sowie in Transportkälteanlagen eines deutschen Herstellers eingesetzt. Darüber hinaus gibt es eine Anwendung in einem zentralen Kühllager in Deutschland [Frommann2006]. R410A hat ein Treibhauspotential von 2.100[1].

### R507A

R507A ist ein azeotropes Kältemittelgemisch aus 50 % R125 und 50 % R143a, d. h. es weist keinen Temperaturgleit bei der Verdampfung oder Verflüssigung auf. R507A hat ein Treibhauspotential von 4.000[1].

### Neue halogenierte Kältemittel

Für PKW-Klimaanlagen in neuentwickelten Fahrzeugen erlaubt die EU-Richtlinie 2006/40/EG ab 2011 nur noch Kältemittel mit einem Treibhauspotential von weniger als 150 (“Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates bezüglich der Emissionen von Klimaanlagen in Motorfahrzeugen“ als Erweiterung der Richtlinie 70/156/EEC). Zum Zeitpunkt des Entwurfs dieser Richtlinie wären dann nur noch

[1] Im Text werden die neuesten Werte nach [UNEP2006] angegeben.

Kohlendioxid (R744) oder brennbare Kältemittel wie R152a oder R290 in Frage gekommen. Bis Ende des Jahres 2006 hatten die Automobilindustrie und deren Zulieferer serienreife R744-Klimaanlagen entwickelt, da brennbare Kältemittel im PKW von den PKW-Herstellern nicht akzeptiert werden. Da R744 auf Grund des deutlich höheren Druckes neue Komponenten erfordert und es bei Leckagen in den Fahrzeuginnenraum zu physiologischer Beeinträchtigung des Fahrers kommen kann, wurde parallel von der chemischen Industrie nach alternativen Kältemitteln gesucht. Bei der VDA-Tagung im Februar 2007 in Saalfelden wurden von allen namhaften Kältemittelherstellern umfangreiche Studien zu neuen synthetischen Kältemitteln vorgestellt [VDA2007]. Demnach haben die überwiegend als Gemisch aus zwei oder drei verschiedenen Stoffen hergestellten neuen Kältemittel ein Treibhauspotential deutlich unter 150, dem R134a ähnliche Dampfdruckkurven sowie ähnliche Kälteleistungszahlen. Die Kälteleistung in einer bestehenden Anlage scheint jedoch ca. 10 % niedriger zu sein [Minor2007]. Für diese neuen Stoffe sind jedoch noch nicht alle Toxizitätstests abgeschlossen, so dass zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage über deren mögliche Markteinführung gemacht werden kann. Sofern diese neuen Kältemittel alle Tests bestehen und in der Folge dann in PKW-Klimaanlagen eingesetzt würden, wären es evtl. auch geeignete Kandidaten zumindest für den Normalkühlbereich im Supermarkt.

Auf einem Automobilworkshop in Turin Ende November 2007 haben die Firmen DuPont und Honeywell eine Gemeinschaftsentwicklung präsentiert: das HFKW-1234yf. Durch eine Doppelbindung zwischen dem zweiten und dritten Kohlenstoffatom ist die atmosphärische Lebensdauer sehr kurz und das Treibhauspotential beträgt deswegen nur 4. Erste Tests in einer PKW-Klimaanlage zeigen mit R134a vergleichbare Ergebnisse. Weitergehende Toxizitätstests und Systemvergleiche werden für Mitte 2008 erwartet. HFKW-1234yf weist eine dem Ammoniak ähnliche Entzündbarkeit auf [DuPont2007].

## 5.4 Kohlenwasserstoffe

Kohlenwasserstoffe sind erheblich preiswerter als die synthetischen Kältemittel. Sie haben Treibhauspotentiale unter 20 und kein Ozonabbaupotential, sie sind ungiftig, nahezu geruchlos und erfüllen viele andere der an Kältemittel gestellten

Anforderungen. Allerdings sind sie brennbar, s. Tabelle 5.3. Dennoch haben sie sich in kleinen steckerfertigen Geräten bei Füllmengen bis zu 150 g in Nord- und Mitteleuropa durchsetzen können und werden inzwischen auch von einigen asiatischen Herstellern von Haushaltskühlgeräten verwendet. In IEC 60335-2-89 sind 150 g als obere Grenze festgelegt. Bei größerer Füllmenge sind besondere Anforderungen an den Explosionsschutz vorgeschrieben. In der Regel ist die Kältemittelfüllmenge bei unverändertem Kältekreislauf ca. 40 bis 50 % kleiner als bei einem HFKW-Kältemittel [Kauffeld1996], so dass mit Kältemittelfüllmengen unterhalb 150 g bei den derzeitigen steckerfertigen Geräten Kälteleistungen bis zu ca. 1.000 Watt möglich sind, siehe auch Technologiedatenblätter. Einleitende Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsprojektes mit dem Kältemittel R290 in Verbindung mit Minichannelverflüssiger und –verdampfer ergaben für eine Kälteanlage mit 1 kW Kälteleistung 120 g Kältemittelfüllmenge mit einer Prognose für eine optimierte Kälteanlage von 50 g pro kW für steckerfertige Geräte [Hoehne2004]. Mit dieser Technologie (Minichannelwärmeüberträger) dürften also langfristig mit einer maximalen Füllmenge von 150 g bis zu 3 kW Kälteleistung in steckerfertigen Geräten möglich sein.

Tabelle 5.3: Zündgrenzen und Zündtemperaturen einiger Kohlenwasserstoffe [AirLiquide2007]. Auch elektrische Funken reichen als Zündquelle aus – die erforderliche Zündenergie liegt bei ca. 0,25 mJ.

| | Zündgrenzen in trockener Luft Vol.-% | Zündtemperatur °C |
|---|---|---|
| R600a (Iso-Butan) | 1,3 – 9,8 | 543 |
| R290 (Propan) | 1,7 – 10,9 | 470 |
| R1270 (Propen | 2,0 – 11,1 | 460 |
| *zum Vergleich:* Benzin | ca. 1,1 – 7,0 | ca. 300 |

Die als Kältemittel verwendeten Kohlenwasserstoffe sind schwerer als Luft. Zündfähige Gemische bilden sich von daher zunächst in Bodennähe. Bei größeren Kältemittelfüllmengen sind entsprechende Gassensoren und Absaugvorrichtungen in Bodennähe vorzusehen.

Kohlenwasserstoffe sind sehr gut mit Mineralölen mischbar, ja sogar so gut, dass die Schmiermittel eine Viskositätsklasse höher gewählt werden sollten als dies z. B. für R22 der Fall ist. Wegen der sehr guten Öllöslichkeit kann es Probleme mit Aufschäumen des Öls im Kurbelgehäuse des Verdichters geben.

### Isobutan – R600a

Isobutan ist das Standardkältemittel in nord- und mitteleuropäischen Haushaltskühl- und gefriergeräten. Inzwischen werden weltweit pro Jahr 30 Millionen Haushaltsgeräte mit R600a hergestellt [UNEP2006]. R600a wird auch in kleineren gewerblichen steckerfertigen Geräten eingesetzt, z. B. in Tiefkühltruhen für Speiseeis. Durch die gegenüber R134a niedrigeren Drücke und Druckverhältnisse laufen steckerfertige R600a-Geräte leiser als vergleichbare R134a-Geräte. Durch die geringere Dichte von R600a sind größere Verdichterhubvolumina erforderlich. Bei größeren Kälteleistungen reicht häufig der Einbauraum für den Verdichter nicht mehr aus und es muss auf R290 übergegangen werden.

### Propan – R290

Propan wird in steckerfertigen Getränkekühlern (z. B. Liebherr und Vestfrost) und Tiefkühltruhen (z. B. AHT und Liebherr) einiger Hersteller eingesetzt. Kann man die geltenden Anforderungen an die Sicherheit erfüllen (z. B. IEC 60335-2-89), ist Propan das ideale Kältemittel für diese Geräte. Es kann mit handelsüblichen Komponenten eingesetzt werden, ist mit Mineralölen gut mischbar und führt zu niedrigeren Verdichtungsendtemperaturen und häufig zu 10 bis 15 % besseren Kälteleistungszahlen als z. B. R134a oder R404A [Jürgensen2004]. Darüber hinaus sind die Druckverhältnisse und Druckdifferenzen niedriger als bei R404A, R407C oder R410A, was zu niedrigeren Geräuschemissionen führt (ähnlich wie bei Haushaltskühlgeräten, die in der Regel auch mit Iso-Butan leiser arbeiten als mit R134a). Bei gleichem Hubvolumen des Verdichters sinkt die Kälteleistung gegenüber R22 um ca. 4 bis 10 % [Mali1995].

### Propen – R1270

Propen ist ein Kohlenwasserstoff mit einer ungesättigten Kohlenstoffverbindung. Es ist von daher weniger stabil als z. B. R290. R1270 wurde Mitte der 1990er Jahre für indirekte Supermarktkälteanlagen eingesetzt. Indirekte Supermarktkälteanlagen sind häufig in der Anschaffung teurer als vergleichbare Direktverdampfungsanlagen mit R404A. Deshalb und auf Grund der Bedenken der Supermarktketten beim Einsatz von brennbaren Kältemitteln sind diese Anlagen wieder verschwunden.

## 5.5 Ammoniak – R717

Ammoniak (R717) hat von allen für Supermarktkälteanlagen geeigneten Kältemitteln das niedrigste Treibhauspotential ($GWP_{R717} < 1$). Es ist auch energetisch sehr interessant. Ammoniakkälteanlagen erzielen in der Regel höhere Kälteleistungszahlen als HFKW-Kälteanlagen. Leider ist R717 giftig (MAK-Wert 50). Es hat jedoch einen sehr stechenden Geruch und dadurch eine hohe Warnwirkung. R717-Dämpfe sind leichter als Luft. In manchen Ländern werden deshalb z. B. auf dem Dach eines Gebäudes installierte Ammoniakverflüssiger weniger kritisch gesehen als solche, die auf dem Erdboden stehen. Ammoniak ist auch brennbar, allerdings nur bei Vorhandensein einer Brandquelle. Zündgrenzen liegen zwischen 15 und 30 Vol.-%.

Ammoniak ist ein alkalisches Gas. Der Kontakt zwischen Ammoniak und einigen anderen Stoffen kann zu explosiven Stoffen bzw. Reaktionen führen, unter anderem der Kontakt mit Quecksilber, Zink, Chlor, Kalzium und Silberoxid. Gasförmiges Ammoniak kann sehr stark mit Stickoxiden und starken Säuren reagieren. In Zusammenhang mit Wasser entsteht der bekannte Salmiakgeist. In Verbindung mit Kohlendioxid entsteht Hirschhornsalz. Feuchtes Ammoniak, d. h. Ammoniak, welches Wasser enthält, ist gegenüber Kupfer und Messing sehr korrosiv. Von allen für Ammoniak-Kälteanlagen geeigneten Materialien ist Stahl das bekannteste, nicht zuletzt wegen der verbreiteten Anwendung in industriellen Kälteanlagen. Doch auch bei der Anwendung von Stahl sind gewisse Regeln zu beachten [Kauffeld1998a]. Daneben können Kupfer- und Zink-freie Aluminiumlegierungen eingesetzt werden. Diese werden bereits seit 1966 für Verdampfer, Wärmeüberträger und Rohrleitungen in der

Ammoniakproduktion eingesetzt. In Norwegen bietet eine Firma bereits seit 30 Jahren seewassergekühlte Rohrbündelverflüssiger für Ammoniak-Kälteanlagen an. Aluminium ist gegenüber Ammoniak-Wasser-Mischungen mit Wasseranteilen bis zu 10 % beständig [Kauffeld1998a].

In Kälteanlagen führt Ammoniak zu hohen Verdichtungsendtemperaturen, weshalb Kälteanlagen für die Tiefkühlung zweistufig mit einer Zwischenkühlung zwischen den beiden Verdichtungsstufen ausgeführt werden müssen. Ammoniak ist mit Mineralöl nicht mischbar. Ammoniakkälteanlagen müssen von daher sehr sorgfältig im Hinblick auf ihren Ölhaushalt geplant und ausgeführt werden[1]. In Industriekälteanlagen ist Ammoniak seit über 100 Jahren das Standardkältemittel. In Supermarktkälteanlagen kann es auf Grund seiner Toxizität und hohen Panikwirkung nur in indirekten Kälteanlagen eingesetzt werden. Bekannt sind Anlagen mit flüssigen und verdampfenden Kälteträgern in der Normal- und/oder Tiefkühlung, neuerdings auch als obere Stufe in Verbindung mit R744 in der unteren Stufe einer Kaskadenkälteanlage. Es fehlten jedoch in der Regel bei den Kälteanlagenbauern im Supermarktbereich das entsprechende Know-how im Umgang mit Ammoniak sowie geeignete Komponenten für Ammoniakkälteanlagen kleiner Leistung.

## 5.6 Kohlendioxid – R744

Kohlendioxid ($CO_2$ – R744) ist ein Kältemittel mit deutlich höheren Dampfdrücken als andere eingesetzte Kältemittel, siehe Bild 5.1. In steckerfertigen Flaschenkühlern erreicht es auf der Hochdruckseite Drücke bis zu 130 bar. Die hohen Betriebsdrücke erfordern festere Gehäusewerkstoffe und/oder größere Wandstärken. Auf der anderen Seite wird insbesondere der Verdichter durch die hohe volumenstrombezogene Kälteleistung (siehe Tab. 5.1) sehr klein. Auch führen Druckverluste zu deutlich kleineren Temperaturabfällen und damit zu deutlich kleineren Einbußen bei der Kälteleistungszahl. Rohrleitungen können deshalb und auf Grund der kleineren erforderlichen Massenströme deutlich kleiner ausgeführt werden als mit HFKW-Kältemitteln. So ist trotz der druckbedingt größeren Wandstärken der Materialeinsatz

[1] Ein unter dem Handelsnamen R723 vermarktete azeotrope Mischung aus R717 und Dimethylether (DME) führt zu etwa 20 bis 30 K niedrigeren Verdichtungsendtemperaturen und verbessert durch den DME-Anteil die Löslichkeit mit Mineralölen und dadurch auch den Wärmeübergang [Kraus2007]. Ähnliche Ergebnisse erzielt man mit zeotropen Mischungen von R717 mit Kohlenwasserstoffen, z. B. R290 oder R600a [Chmelnyuk2007].

für Rohrleitungen kleiner [Heinbokel2005]. Tabelle 5.4 zeigt einige Eigenschaften von R744. Durch die höheren Wärmeübergangszahlen können z. B. die Verdampfungstemperaturen um ca. 2 K gegenüber HFKW angehoben werden [Heinbokel2005].

Tabelle 5.4: Eigenschaften von R744 / $CO_2$ als Kältemittel [Kauffeld2004].

| ***Umwelt*** | ***Kälteanlage*** |
|---|---|
| • niedriges Treibhauspotential (GWP = 1 per Definition)[1)]<br>• in geringen Konzentrationen ungiftig - reine Naturluft = 330 ppm<br>- Behaglichkeitsgrenze = 1000 - 1500 ppm<br>- MAK = 5.000 ppm (0,5 %, entspr. 9.000 mg/m$^3$)<br>- Atemluft ausatmen = 3 - 4 % vol.<br>- IDHL = 40.000 ppm (4,0 % vol.)<br>- über 10 % vol. in der Atemluft betäubend<br>- unmittelbar tödlich über 30 % vol.<br>• Nicht brennbar (wird als Feuerlöschmittel verwendet)<br>• schwerer als Luft<br>• keine Beeinträchtigung von Lebensmitteln<br><br>1) Das als Kältemittel verwendete $CO_2$ ist in der Regel ein Abfallprodukt anderer Prozesse und kann daher als "treibhausneutral" betrachtet werden | • Hohe volumenstrombezogene Kälteleistung (8-mal höher als R 134a; 5-mal höher als Ammoniak) → kleine Verdichterhubvolumen + Rohrleitungsquerschnitte<br>• Hohe Kälteleistungszahl bei tiefen Temperaturen<br>• Niedrige Viskosität → geringe Druckverluste<br>• Druckverluste führen nur zu kleinen Temperaturabfällen<br>• hohe Anlagendrücke (z. B. 40 bar bei +5 °C)<br>• Niedrige Druckverhältnisse → hohe Verdichtergütegrade<br>• Hohe Wärmeübergangszahlen bei Verdampfung und Verflüssigung (zwei- bis dreimal höher als bei HFKW [Stenhede2007])<br>• Gute Materialverträglichkeit mit gängigen Materialien und Kältemaschinenölen<br>• Hohe Temperaturen im Gaskühler → Nutzung als Heizung<br>• Tripelpunkt bei 5,18 bar und -56,6 °C<br>Niedrige kritische Temperatur (31,05 °C) → maximale Verflüssigungstemperatur 20 bis 25 °C |

Die kritische Temperatur, unterhalb derer eine Verflüssigung des Kältemittels möglich ist, beträgt bei R744 nur 31 °C. R744 ist von daher im klassischen

Kaltdampfkältemaschinenprozess mit Verdampfung auf der Niederdruckseite und Verflüssigung auf der Hochdruckseite nur bei Temperaturen der Wärmesenke am Verflüssiger bis zu ca. 25 °C einsetzbar. Bei Supermarktkälteanlagen betragen insbesondere im Sommer und bei luftgekühlten Verflüssigern die Temperaturen auf der Hochdruckseite der Kälteanlage über 31 °C. Bei R744 ist dann keine Verflüssigung des Kältemittels mehr möglich und die Kälteanlage arbeitet als so genannter transkritischer Prozess (Bild 5.2). In der Regel sind die Kälteleistungszahlen von transkritischen Kälteanlagen schlechter als die von traditionellen Kälteanlagen mit einer Verflüssigung des Kältemittels auf der Hochdruckseite. Diese Eigenschaft kann durch den Einsatz eines inneren Wärmeüberträgers zum Teil kompensiert werden. Der kälteleistungszahlsteigernde Effekt eines inneren Wärmeüberträgers ist beim transkritischen R744-Prozess größer als bei anderen Kältemitteln. Auch die Wahl des Druckes auf der Hochdruckseite hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kälteleistungszahl. Zu jeder Gaskühleraustrittstemperatur, also im Prinzip zu jeder Außenlufttemperatur bei luftgekühlter Hochdruckseite, gibt es dabei einen optimalen Druck in Bezug auf die Kälteleistung (Bild 5.3). Die Regelung einer R744-Kälteanlage muss diese Eigenschaft berücksichtigen, um einen niedrigen Energieverbrauch sicherzustellen. Eine elektronische Regelung stellt dabei im Gegensatz zu einer Regelung mit einem rein mechanischen Differenzdruckregelverntil in einem weiten Einsatzbereich sicher, dass die Anlage mit bestmöglicher Kälteleistungszahl und dadurch niedrigstem Energieverbrauch läuft [Cecchinato2007].

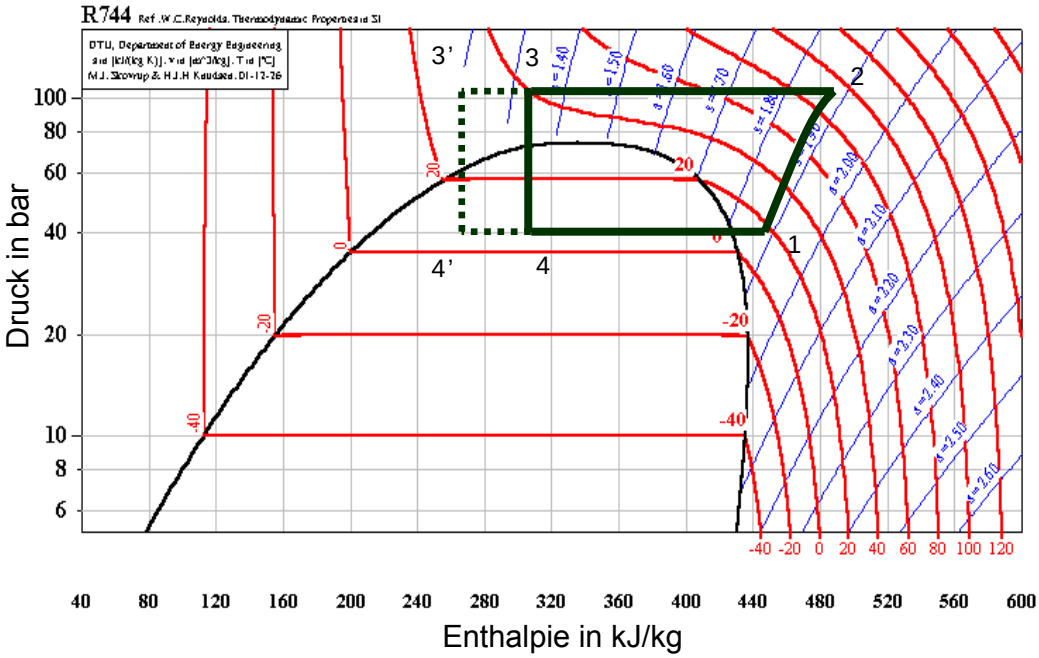



Bild 5.2: Ein transkritischer R744-Prozess im lg p,h-Diagramm. Man sieht deutlich, dass die Austrittstemperatur des Gaskühlers (3) einen Einfluss auf die Kälteleistungszahl des Prozesses hat. Je niedriger die Gaskühleraustrittstemperatur (3'), desto besser wird die Kälteleistungszahl [Kauffeld2004].

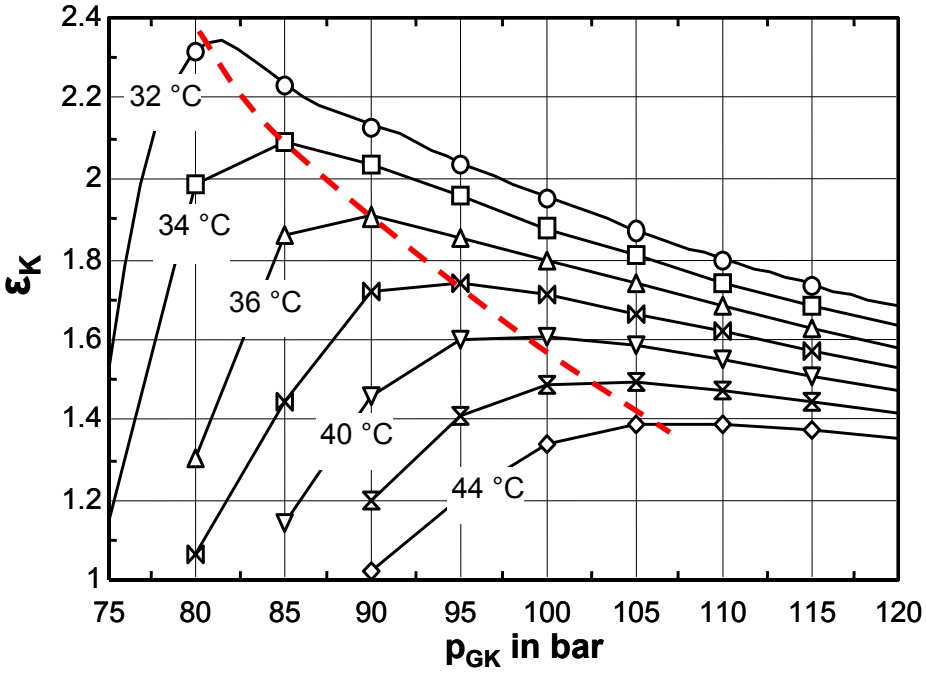



Bild 5.3: Kälteleistungszahl in Abhängigkeit vom Druck auf der Hochdruckseite ($p_{GK}$) bei verschiedenen Gaskühleraustrittstemperaturen [Kauffeld2004].

Bei Außenlufttemperaturen unterhalb von ca. 26 °C arbeitet eine luftgekühlte R744-Kälteanlage mit Verflüssigung auf der Hochdruckseite und mit vergleichbaren Kälteleistungszahlen wie eine R404A Direktverdampfungsanlage. Bei tiefen Außenlufttemperaturen erzielt die R744-Anlage sogar eine bessere Kälteleistungszahl, siehe Technologiedatenblätter C13 für weitere Ausführungen.

Da R744 bei tiefen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen sehr gute Kälteleistungszahlen erzielt, wird es häufig für TK-Anlagen im Supermarkt, als Kaskade zu z. B. einer Ammoniakkälteanlage oder einer HFKW-Kälteanlage eingesetzt, siehe Technologiedatenblätter C5, C6, C7, C10, C12 und C14. Derartige Anlagen sind bei großen Kälteanlagenbauerfirmen inzwischen Bestandteil des Standardproduktprogramms [Sienel2007] und insbesondere bei großen Supermärkten auch im Hinblick auf die Investitionskosten wettbewerbsfähig [Post2007]. Typische Verflüssigungstemperaturen der R744-Anlage liegen in diesen Anwendungen um 0 °C. In der Schweiz laufen derzeit Bestrebungen den Einsatz von R744 für die Tiefkühlung gesetzlich bindend vorzuschreiben [Schmutz2007].

Eine weitere Eigenart des transkritischen R744-Prozesses ist interessant. In Bild 5.2 kann man deutlich die sich kontinuierlich ändernde Temperatur im Gaskühler sehen. Vom Verdichteraustritt, Zustand 2, geht es stetig von ca. 90 °C über die 80 °C-Isotherme, diejenige bei 60 °C bis zu ca. 40 °C am Gaskühleraustritt. Dabei gibt das transkritische R744 anders als kondensierende Kältemittel, annähernd gleich viel Wärme über den gesamten Abkühlvorgang ab. Mit einer transkritisch arbeitenden R744-Kälteanlage lässt sich demnach hervorragend Luft oder Wasser erwärmen; ein Grund, weshalb heute in vielen japanischen Wärmepumpen zur Wassererwärmung R744 als Kältemittel eingesetzt wird [Kusakari2006]. Bei der Wärmerückgewinnung ist eine transkritisch arbeitende R744-Anlage deshalb neben der Heizungswassererwärmung insbesondere für die Brauchwassererwärmung geeignet.

Durch die verbesserten Wärmeübergangeigenschaften von R744, siehe Tab. 5.4, ergeben sich um ca. 2 K höhere Verdampfungstemperaturen [Gernemann2003, Heinbokel2005]. Durch die hohe Drucklage von R744 ergibt sich in der Saugleitung ein um 1 K reduzierter Sättigungstemperaturverlust im Vergleich zu R404A [Gernemann2003]. Der Rücktransport des Öls zu den Verdichtern ist dabei weiterhin

gewährleistet. Somit können die R744-Verdichter in der Normalkühlung mit einem Saugdruck betrieben werden, der in der Summe einer um 3 K erhöhten Sättigungstemperatur gegenüber R404A entspricht [Heinbokel2005]. Die Besonderheiten der transkritischen Prozessführung und die guten Wärmeübertragungseigenschaften von R744 im Gaskühler ermöglichen eine Abkühlung des Druckgases bis nahe an die Lufttemperatur [Heinbokel2005]. Bei niedrigen Lufttemperaturen ist bei R744 eine Absenkung der Verflüssigungstemperatur bis auf ca. +5 °C möglich, da durch das höhere Druckniveau von R744 auch bei diesen niedrigen Temperaturen noch ein für den Betrieb der Expansionsventile ausreichend großer Differenzdruck zum Verdampfungsdruck besteht [Heinbokel2005]. In Deutschland mit entsprechend vielen verhältnismäßig kalten Betriebsstunden haben bei Discountern installierte transkritische R744-Anlagen in ihrem ersten Betriebsjahr einen geringfügig niedrigeren Energieverbrauch als vergleichbare R404A-Anlagen gezeigt. Wobei die ersten derartigen R744-Anlagen den höchsten Energieverbrauch aufweisen; Anlagen der "zweiten Generation" verbrauchen weniger Energie [Bader2007].

R744 wirkt in Konzentrationen über 10 % toxisch. Der MAK-Wert beträgt 5.000 ppm entsprechend 0,5 % (ca. 9.000 mg/m$^3$ Luft). Insbesondere in kleinen Räumen müssen deshalb die $CO_2$-Konzentrationen überwacht werden. Da $CO_2$ schwerer als Luft ist, müssen entsprechende Sensoren in Bodennähe angebracht werden. In Supermärkten werden häufig in den Kühl- und Gefrierräumen sowie im Maschinenraum entsprechende Sensoren angeordnet, manchmal darüber hinaus im Markt und/oder im Fortluftkanal der Lüftungsanlage.

An allen Anlagenteilen, die einzeln abgesperrt werden können, sind Sicherheitsventile erforderlich, da der Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der niederdruckseitigen Komponenten liegt. Dabei ist auf die Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar zu achten. Es sollten z. B. keine Abblasrohrleitungen nach den Sicherheitsventilen angeschlossen sein [Vestergaard2006]. Die Flüssigkeitsleitung kann evtl. in die Saugleitung, in der Drücke über 5,2 bar herrschen, abblasen; von dort kann über ein weiteres Sicherheitsventil ohne Abblasrohrleitung direkt in die Atmosphäre abgeblasen werden [Vestergaard2006].

## 5.7 Kälteträger und sekundäre Kältemittel

Jeder Kälteträger für indirekte Kälteanlagen soll eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Ein Kälteträger soll gute thermophysikalische Eigenschaften besitzen, die den Transport von großen Kältemengen mit einer kleinen Temperaturänderung und einem kleinen Volumenstrom ermöglichen. Ein Kälteträger soll hohe Wärmeübergangszahlen haben, die zu kleinen Temperaturunterschieden im Wärmeüberträger führen. Er soll möglichst kleine Druckverluste in den Rohrsystemen aufweisen, um die Pumpenarbeit zu reduzieren. Ein Kälteträger darf nicht zu Werkstoffkorrosion führen. Außerdem soll er nicht-giftig, umweltfreundlich, nicht-brennbar sowie leicht und risikofrei zu hantieren sein. Darüber hinaus soll er leicht zu beschaffen sein – zu einem akzeptablen Preis. Einen Kälteträger, der alle diese Anforderungen erfüllt, gibt es nicht. Für jeden Zweck ist daher das am besten geeignete Mittel mit den wenigsten Nachteilen zu wählen.

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

Traditionell werden in indirekten Supermarktkälteanlagen Ein-Phasen-Flüssigkeiten – entweder auf Wasserbasis oder synthetische, nicht-wasserbasierte Flüssigkeiten – benutzt. Neuere Entwicklungen gehen in Richtung von schmelzenden Kälteträgern, sogenanntem Eisbrei, oder verdampfenden sekundären Kältemitteln, z. B. Kohlendioxid. Entsprechende Beschreibungen ausgeführter Anlagen finden sich in den Technologiedatenblättern C2, C3, C6, C8, C9 und C11.

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

Die gebräuchlichsten wasserbasierten Kälteträger sind [Kauffeld1998b]:

Wasser: Wasser friert bei etwa 0 °C. Wasser ist korrosiv, wenn Sauerstoff vorhanden ist, und dies gilt für alle wasserbasierten Flüssigkeiten ohne entsprechenden Korrosionsschutz.

Ethylenglykol: Giftig und in größeren Mengen umweltgefährdend (leicht biologisch abbaubar) aber preiswert; wird deshalb im Supermarkt nur für evtl. Flüssigkeitskühlkreisläufe am Verflüssiger verwendet

Propylenglykol: Hohe Viskosität bei niedriger Temperatur sowie Risiko für Umweltverschmutzung, jedoch weniger als bei Ethylenglykol; am häufigsten eingesetzter Kälteträger im Bereich der Normalkühlung.

Ethanol: Reines Ethanol (Ethylalkohol) ist brennbar, mit Wasser verdünntes Ethanol in Konzentrationen unterhalb ca. 50 % nicht; vorwiegend bei Eisbreisystemen in Europa verwendet.

Methanol: Ebenfalls brennbar sowie gesundheitsschädlich. Dosen von 0,1 g Methanol pro kg Körpergewicht sind gefährlich, über 1 g pro kg Körpergewicht ist Methanol lebensbedrohlich; sehr selten als Kälteträger eingesetzt.

Glyzerin: Glyzerin hat eine hohe Viskosität bei niedrigen Temperaturen; sehr selten als Kälteträger eingesetzt.

Ammoniak: Reines Ammoniak ist entflammbar, hat einen niedrigen Siedepunkt und einen stechenden Geruch; in Mischung mit Wasser ergibt sich Salmiak, sehr selten als Kälteträger eingesetzt – hätte gute thermodynamische Eigenschaften für Eisbrei.

Kaliumkarbonat: Hoher pH-Wert, der bei Augenkontakt gefährlich ist. Der eutektische Punkt liegt bei -37,5 °C; sehr selten als Kälteträger eingesetzt.

Calciumchlorid: Korrosiv, eutektischer Punkt liegt bei -55 °C. Der Korrosionsschutz durch Chromat kann gesundheitsschädigend sein, besonders während des Mischprozesses. (Gilt für alle Flüssigkeiten, wenn Chromat benutzt wird); sehr selten als Kälteträger im Supermarktbereich eingesetzt, Verwendung z. B. in der Lebensmittelindustrie.

Magnesiumchlorid: Korrosiv, eutektischer Punkt bei -33,5 °C; sehr selten als Kälteträger eingesetzt.

Natriumchlorid: Korrosiv, eutektischer Punkt bei -20,7 °C; insbesondere bei der Fischdirektkühlung eingesetzt (Meerwasser), sehr selten als Kälteträger im Supermarktbereich eingesetzt.

Kaliumazetat: Verhältnismäßig hoher pH-Wert, relativ neuer Kälteträger kommerzieller Einsatz seit ca. 1995); Einsatz überwiegend im TK-Bereich.

Kaliumformiat: Höherer pH-Wert als bei Kaliumazetat und noch neuer als sekundäres Kälte-mittel, deshalb liegen weniger Erfahrungen vor. Dis Viskosität bei niedrigen Temperaturen ist aber sehr gut, es wird von daher gern für TK-Anwendungen eingesetzt.

Abgesehen von diesen wasserbasierten Kälteträgern gibt es einige synthetische Flüssigkeiten, die besonders bei niedrigen Temperaturen benutzt werden, da sie in diesem Temperaturbereich eine niedrige Viskosität haben. Eine gute Übersicht über die verschiedenen sowohl wasserbasierten als auch kommerziellen Kälteträger wurde 1997 vom International Institute of Refrigeration herausgegeben [Melinder1997]. Eine Aktualisierung findet sich in der Dissertation von Melinder [Melinder 2007].

Als Ausgangsprodukt für schmelzende Kälteträger (Eisbrei) können alle im letzten Abschnitt beschriebenen, wasserbasierten Kälteträger benutzt werden. Bisher wurden die größten Erfahrungen mit Ethanol oder Glykol als Zusatzstoff sowie mit Natriumchlorid (Meereswasser) gemacht. Beschreibungen entsprechender Supermarktkälteanlagen mit Eisbrei als Kälteträger finden sich im Technologiedatenblatt C4.

Eisbrei ist eine Mischung von sehr feinen Eispartikeln in einer Flüssigkeit. Der Gefrierpunkt z. B. für eine 16-prozentige Ethanolwassermischung liegt bei -8 °C. Bei dieser Temperatur frieren die ersten Wasserpartikel. Dadurch wird die verbleibende Flüssigkeit reicher an Ethanol, und der Gefrierpunkt sinkt. Bei weiterer Abkühlung werden mehr Eispartikel, die immer reines Wasser enthalten, gefroren, deshalb wird die verbleibende Flüssigkeit noch reicher an Ethanol, und der Gefrierpunkt fällt weiter.

Wenn man nun z. B. in einer Kälteanlage eine Temperaturänderung von -12 bis -8 ° C erlaubt, ist der Enthalpie-Inhalt für den Eisbrei fast achtmal größer als für einen konventionellen flüssigen Kälteträger auf Wasserbasis. Die Druckverluste bei moderaten Eiskonzentrationen, d. h. bis zu 20 % Eisanteil, sind mehr oder weniger dieselben wie bei konventionellen Flüssigkeiten. Gleichzeitig ist die Wärmeübergangszahl jedoch etwa doppelt so gut für schmelzenden Eisbrei wie für konventionelle Kälteträger [Kauffeld2005]. Der große Wärmeinhalt zusammen mit den guten Wärmeübertragungszahlen bewirkt, dass die Rohrdurchmesser um etwa 50 % reduziert werden können und dies bei etwa gleichen Druckverlusten. Gleichzeitig sinkt die Pumpenleistung auf 1/8 der für konventionelle Kälteträger erforderlichen Größe [Kauffeld1999].

Bei verdampfenden, sekundären Kältemitteln wird das sekundäre Kältemittel im Prinzip wie aus direktverdampfenden Kälteanlagen bekannt benutzt. Der einzige Unterschied ist der, dass das Kältemittel, das an den Kühlstellen verdampft, in der Regel nicht dasselbe ist wie das in der primären Kälteanlage. Bisher ist besonders Kohlendioxid ($CO_2$) als verdampfendes, sekundäres Kältemittel benutzt worden. Dabei ist auf die hohen Stillstandsdrücke von $CO_2$ zu achten. Außerdem muss sichergestellt werden, dass nicht verdampftes flüssiges $CO_2$ zur Pumpstation zurückläuft. Die thermodynamischen Eigenschaften von $CO_2$ sind so günstig, dass derartige Kälteträgeranlagen nicht mehr Energie verbrauchen als vergleichbare HFKW-Direktverdampfungsanlagen [Rees2007].

## 5.8 Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel

Bei dezentralen steckerfertigen Geräten sind alle Komponenten (Verdichter, Verflüssiger, Expansionsorgan und Verdampfer) im Gerät integriert. Bei der Aufstellung ist einzig ein Stromanschluss erforderlich. Kältetechnische Installationsarbeit ist im Supermarkt nicht erforderlich. Die komplette Fertigung erfolgt bei den entsprechenden Herstellern mit daraus resultierender hoher Qualität und geringer Leckagewahrscheinlichkeit.

Dezentrale steckerfertige Geräte gibt es als (in der Reihenfolge der Häufigkeit):

- Flaschenkühlschränke,
- Tiefkühltruhen,
- Kühltruhen,
- Kühltheken
- Kühlregale und
- Tiefkühlregale.

Die einzelnen Typen gibt es mit verschiedenen Kältemitteln, in der Regel mit HFKW, Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid. Neben den hier genannten steckerfertigen Kühlmöbeln gibt es noch so genannte steckerfertige Stopferaggregate. Diese fabrikgefertigten Kälteaggregate mit Kälteleistungen von 0,5 bis zu 9 kW werden z. B. zur Kühlung von nachgerüsteten Kühl- oder Tiefkühlräumen eingesetzt. Sie finden außerdem insbesondere Verwendung bei einigen Discountern, die ausschließlich über Stopferaggregate ihre Tiefkühlräume kühlen. Die zentrale Verbundanlage hat dann nur einen NK-Teil, da die Tiefkühlung im Markt bei diesen Discountern über steckerfertige Tiefkühltruhen erfolgt.

Die folgenden Modelltechnologien sind in den Technologiedatenblättern in Teil A beschrieben:

A1 Flaschenkühler mit HFKW R134a

A2 Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)

A3 Flaschenkühlerkühler mit Kohlendioxid (R744)

A4 Tiefkühltruhen mit HFKW (R134a, R404A)
A5 Tiefkühltruhen mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)
A6 Tiefkühltruhen mit Kohlendioxid (R744)
A7 Kühltruhen – gibt es nur als umschaltbare Tiefkühltruhe
A8 Kühltheken mit HFKW (R134a, R404A)
A9 Kühlregale mit HFKW (R134a, R404A)
A10 Kühlregale mit Kohlendioxid (R744)
A11 Stopferaggregate mit R404A

Kühlinseln und Tiefkühlinseln gibt es nicht steckerfertig. Es werden aber insbesondere bei einigen Discountern einzelne steckerfertige Geräte (siehe z. B. A4, A5 und A6) zu Inseln zusammengestellt. Es bleiben jedoch einzelne Geräte mit jeweils einzelner Kälteanlage.

Tabelle 5.5 zeigt eine Zusammenfassung der Technologiedatenblätter Teil A zu steckerfertigen Geräten. Als Kältemittel für steckerfertige Geräte kommen heute R134a, R404A, R507A, R290, R600a und R744 zum Einsatz. Geräte mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel (R600a und R290) erzielen 10 bis 15 % niedrigere Energieverbräuche als vergleichbare mit HFKW [Jürgensen2004]. Bei Geräten mit R744 ist der Energieverbrauch stärker von der Temperatur des Aufstellungsortes abhängig als bei Geräten mit den anderen genannten Kältemitteln. Die eingesetzte Kältemittelmenge liegt zwischen 50 g (R600a) und etwa 1400 g (R404A), entsprechend ca. 23,5 bis 162 g/100 Liter Bruttovolumen. Die Kälteleistung solcher Geräte reicht von 200 W bis 2000 W. Die Emissionen aus den einzelnen Geräten sind wegen der hermetischen Bauweise gering. Die jährlichen Leckageraten durch Beschädigungen an einzelnen Geräten sowie bei der Entsorgung am Gebrauchsende liegen im Mittel für alle steckerfertigen Geräte bei unter 1 % [IPCC/TEAP2005]. Von größerer Bedeutung – bezogen auf das Einzelgerät – sind dabei die Entsorgungsemissionen, da eine vollständige Rückgewinnung des Kältemittels nur in entsprechenden Entsorgungsstationen, wie sie für Haushaltsgeräte existieren, möglich ist. Die Verwendung von Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid beschränkt sich (bisher) auf wenige Hersteller. Die Entwicklungen zum Einsatz von Kohlenwasserstoffen gehen in zwei verschiedene Richtungen. Zum einen wird versucht, die erforderliche Kältemittelfüllmenge durch Systemoptimierungen zu reduzieren [Hoehne2004]. Zum

anderen wird versucht, die in Normen festgelegte Mengenbegrenzung an brennbaren Kältemitteln von 150 g auf 500 g zu erhöhen, soweit dies sicherheitstechnisch möglich erscheint [Jürgensen2004]. R744 wird bisher nur in Flaschenkühlern kommerziell eingesetzt, wobei Nestlé angekündigt hat, R744 in Zukunft auch in Speiseeistiefkühltruhen einzusetzen.

Eine bis vor kurzem nicht am Markt verfügbare Variante der steckerfertigen Geräte wären Geräte mit wassergekühlten Verflüssigern und Wasserkühlung in einem luftgekühlten Wärmeüberträger für alle Kältesätze. Dazu wäre im Markt ein entsprechendes Wassernetz erforderlich. Auf der EUROSHOP 2008 wurden erstmals von einer Firma derartige steckerfertige Geräte mit wassergekühlten Verflüssigern vorgestellt [AREA2008].

Ähnliche Ansätze, allerdings mit größeren, schallgedämmten Kälteaggregaten, gibt es in USA von der Firma Hussmann als „Hussmann Protocol“, siehe Technologiedatenblätter C15 „Distributed Systems“.

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Technologiedatenblätter Teil A Steckerfertige Geräte

| | | Technologiedatenblatt | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel | | | | | | | | | | Stopferaggregate |
| | | | Flaschenkühler mit HFKW (R134a) | Flaschenkühler mit KW (R600a, R290) | Flaschenkühler mit Kohlendioxid (R744) | Tiefkühltruhen mit HFKW (R134a, R404A) | Tiefkühltruhen mit KW (R600a, R290) | Tiefkühltruhen mit Kohlendioxid (R744) | Kühltruhen | Kühltheken mit HFKW (R134a, R404A) | Kühlregale mit HFKW (R404A) | Kühlregale mit Kohlendioxid (R744) | steckerfertige Stopferaggregate |
| Kälte-Daten | 1 | Einsatzzweck | Getränkekühler in Kassennähe und an Tankstellen | | | Als steckerfertige, flexible TK-truhen im Supermarkt und an Tankstellen. Discounter bevorzugen wegen der hohen Flexibilität steckerfertige TK-truhen. | | | Es gibt keine steckerfertigen Kühltruhen - nur umschaltbare Tiefkühltruhen mit entsprechendem Thermostat - Daten siehe dort | steckerfertige, flexible Kühltheken / Kühlregale vorwiegend an Tankstellen und in kleinen Supermärkten oder für Verkaufsaktionen | | | steckerfertige Kälteanlage primär für Kühlzellen |
| | 2 | Kälteleistungsbereich | 400 bis 950 W | 300 bis 600 W | 400 bis 1000 W | 200 bis 3000 W | 200 bis 1000 W | 200 bis 1000 W | | 420 bis 1657 W | 590 bis 4700 W | unbekannt | ca. 0,5 bis 9 kW |
| | 3 | Art der Kälteübertragung | direkt | direkt | direkt | direkt | direkt | direkt | | direkt | direkt | direkt | direkt |
| | 4 | Kältemittelart | R134a | R600a; für große Geräte R290 | R744 - im Sommer transkritisch | R134a und R404A | R290, nur für kleine Truhen R600a | R744 | | R134a und R404A | R404A | R744 | R404A |
| | 5 | Kältemittelfüllmenge | 95 bis 310 g, entspr. 23,5 bis 72 g/100 Liter Bruttovolumen | bis zu 150 g | bis zu 300 g | 120 bis 1200 g, entspr. 36 bis 162 g pro 100 Liter Volumen | unter 150 g | unbekannt | | 210 bis 1400 g, entspr. 245 bis 700 g/m² Ausstellfläche | 390 bis 3300 g, entspr. 290 bis 730 g/m² bzw. 84 bis 125 g/100 Liter Bruttovolumen | 2300 g, entspr. 467 g/100 Liter Nettovolumen | ca. 0,5 bis 3 kg |
| Leckage | 6 | Typische Leckageraten | Nahe 0 solange die Geräte nicht zu Reparaturzwecken geöffnet werden; bei der Entsorgung entstehen evtl. geringe Verluste | | | | | | | | | | gering da fabrikgefertigt |
| | 7 | Quelle der Leckage-Information | qualifizierte Schätzung und Gespräche mit Herstellern | | | | | | | | | | eigene Abschätzung |
| | 8 | Art der Ableitung | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort | direkt am Aufstellort |
| | 9 | Verbleib des KM bei Außerdienststellung | Entsorgung | Entsorgung; früher Abblasen | Entsorgen, evtl. Abblasen dann aber Öl auffangen! | Entsorgung | Entsorgung; früher Abblasen | Entsorgen, evtl. Abblasen dann aber Öl auffangen! | | Entsorgung | Entsorgung | Entsorgen, evtl. Abblasen dann aber Öl auffangen! | Entsorgung |
| Energie | 10 | Energieverbrauch (empirisch und statistisch abgesichert wenn möglich) | Glastür: 1,1 bis 1,6 kWh/24 h je 100 Liter Bruttovolumen; geschlossene Tür: 0,6 kWh/24 h je 100 Liter Bruttovolumen | bis zu 30 % niedriger als bei Flaschenkühlern mit R134a | bei moderaten Aufstellraum-temperaturen 5 bis 10 % niedriger als bei HFKW-Flaschenkühlern, bei hohen Temp. auch drüber | mit Glasdeckel 0,8 bis 1,8 kWh/24 h je 100 Liter Nettovolumen; ohne Glasdeckel 3,9 bis 5,4 kWh/24 h je 100 Liter | 0,468 bis 0,718 kWh/24 h je 100 Liter Volumen; in der Regel 10 bis 15 % niedriger als bei vergleichbaren HFKW-Truhen | unbekannt, bei hohen Aufstellraumtemp. vermutlich höher als mit HFKW, bei niedrigen Aufstellraumtemp. vermutlich niedriger | es gibt keine steckerfertigen Kühltruhen - nur umschaltbare Tiefkühltruhen mit entsprechendem Thermostat - Daten siehe dort | von 0,5 (stille Kühlung) bzw. 5,9 (Umluftkühlung) bis 12,5 kWh/24 h pro m² Ausstellfläche | 7,3 bis 19,4 kWh/24h pro m² Ausstellfläche bzw. 2,5 bis 4,4 kWh/24 h pro 100 Liter Brutto-Inhalt | 7,5 kWh/24 h pro 100 Liter Inhalt | in Abhängigkeit von der Kälteleistung |
| | 11 | Möglichkeit zur WRG | Wärme wird ganzjährig an Verkaufsraum abgegeben | | | | | | | | | | Aufstellraum |
| | 12 | Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung | Drehzahlregelung des Verdichters (ca. 10 bis 15 % Energieeinsparung), Beleuchtung mit Energiesparlampen, Lichtquelle außerhalb des gekühlten Bereichs, bessere Isolierung, optimierte Lüfter und Lüftermotoren, Lüftermotor außerhalb des gekühlten Bereichs, verbesserte Expansionsventile, Verbesserte Verdampfer, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers | | | | | | | | | | z.B. Drehzahlregelung von Verdichter und/oder Lüfter |
| | 13 | Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden. | Gesamt-EU | Kalorimetermessungen und Messungen in Klimakammern unter gleichen Bedingungen | Dänemark | Gesamt-EU | Kalorimetermessungen und Messungen in Klimakammern unter gleichen Bedingungen | keine bekannt | | 25 °C, 60 % rel. Feuchte | 25 °C, 60 % rel. Feuchte | Klimakammer vom TÜV | |
| Lebenszykluskosten | 14 | Investitions- / Komponentenkosten | Referenztechnologie für Flaschenkühler | ähnlich wie bei Flaschenkühlern mit HFKW | zur Zeit noch deutlich über denen für HFKW-Flaschenkühler | deutlich preiswerter als Verbundanlagen | ca. 15 % über HFKW-Truhen | Teurer als vergleichbare steckerfertige HFKW-Geräte | | deutlich preiswerter als Verbundanlagen | deutlich preiswerter als Verbundanlagen | Teurer als vergleichbare steckerfertige HFKW-Geräte | je nach Aufstellort preiswerter als mit Verbundanlage gekühlter Kühlraum |
| | 15 | Installationskosten | Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind | | | | | | | | | | |
| | 16 | Betriebskosten | Referenztechnologie für Flaschenkühler | ca. 15 bis 30 % niedriger als bei Flaschenkühlern mit HFKW | Energiekosten bis zu 10 % niedriger als bei HFKW-Flaschenkühlern bei moderater Aufstellraumtemp. | Referenztechnologie für Tiefkühltruhen | Energiekosten ca. 10 bis 15 % unter denen von HFKW-Truhen | unbekannt | | höher als Kühltheke an Verbundanlage | höher als Kühlregal an Verbundanlage | je nach Aufstellraumtemp. Höher oder niedriger als Kühlregal mit HFKW | über denen eines mit eine Verbundanlage gekühlten Kühlraums |
| | 17 | Wartungsintervalle | keine | keine | keine | keine | keine | keine | | keine | keine | keine | keine |
| | 18 | Wartungskosten | keine | keine | keine | keine | keine | keine | | keine | keine | keine | keine |
| Marktanteil | 19 | Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung) | mehrere 100.000 | über 1000 mit R600a und einige hundert mit R290 | ca. 6000 | AHT-Geräte allein bis Anfang 2007 240.000 Stück | über 100.000 als Eiskremtruhen, mehrere 10.000 als TK-Truhen | bisher nur Prototypen | | unbekannt | unbekannt | unbekannt, aber vermutlich nur wenige Hundert | sehr viele |
| | 20 | Regionale Verbreitung | Gesamte EU | überwiegend Skandinavien, in Zukunft auch Westeuropa | weltweit | Gesamte EU | Truhen in Nord- und Westeuropa; als Eiskremtruhen weltweit außer | keine, Nestlé erwägt Einsatz weltweit | | Gesamte EU | Gesamte EU | unbekannt | Gesamte EU |
| Betriebserfahrungen | 21 | Dauer der Betriebserfahrung | mit R134a 15 Jahre; vorher Erfahrung mit FCKW | ca. 6 Jahre in Gewerbekälte, ca. 15 Jahre in Haushaltskälte | seit 2003 mit Prototypen, seit 2004 mit Kleinserien und seit ca. 2006 mehrere Tausend Stück | mit R134a 15 Jahre; vorher Erfahrung mit FCKW | ca. 6 Jahre in Gewerbekälte, ca. 15 Jahre in Haushaltskälte | bisher nur Prototypen | | mit HFKW seit Mitte der 1990er, vorher Erfahrung mit FCKW | mit HFKW seit Mitte der 1990er, vorher Erfahrung mit FCKW | Prototypen seit 2003, Kleinserie seit 2004, größere Serie seit 2005 | mit HFKW Erfahrung seit Mitte der 1990er |
| | 22 | Zuverlässigkeit | sehr zuverlässig | hoch, z.T. höher als mit HFKW | zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig, z.T. höher als mit HFKW | zuverlässig | | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | unbekannt | sehr zuverlässig |
| | 23 | evtl. besondere Probleme | keine | R600a nur bis zu einer gewissen Kälteleistung einsetzbar | hohe Drücke bei Betrieb und Stillstand; lauter als Flaschen-kühler mit HFKW und KW | keine | maximale Kälteleistung begrenzt durch max. Füllmenge von 150 g und 50 bar • Liter Verdichtergröße | hohe Drücke | es gibt keine steckerfertigen Kühltruhen - nur umschaltbare Tiefkühltruhen mit entsprechendem Thermostat - Daten siehe dort | keine | keine | hohe Drücke, insbes. an heißen Aufstellorten | keine |
| | 24 | Besondere Eigenschaften | Sehr flexibel, da nur Stromanschluss erforderlich | | | | | | | | | | sehr flexibel |
| | 25 | Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes | Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben wird. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur und zu steigendem sonstigen Kühlbedarf. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch. | | | | | | | | | | vorhanden |
| | 26 | Sicherheit/besondere Sicherheitsanforderungen | keine | keine bei Füllmengen bis zu 150 g | keine | keine | keine bei Füllmengen bis zu 150 g | keine | s.o. | keine | keine | keine | keine |
| Bezugsquellen | 27 | Hersteller | viele, u.a. AHT (A) Caravell (DK), Fricon (P), Frigoglass (GR), Liebherr (D), Norcool (N), Vestfrost (DK) | Liebherr (D), Vestfrost (DK) | Vestfrost (DK) u.a. | u.a. AHT, Carrier, Elcold, Hauser, ISA, KMW, Metalfrio Solutions, Novum, Oscartielle | AHT (A), Frost-trol (ES), Liebherr (D) | u.a. Frost-trol (ES) und Novum (IRL) | s.o. | u.a. Epta, Hauser (A), KMW, Oscartielle (I); Frost-Trol (ES) und Novum (IRL) auch mit R744 | Carrier, Criocabin, Epta, Fogal, Hauser (A), Oscartielle (I) u.a. | Frigoglass (GR) | z.B. Cibin, Isobar, KBS Kältetechnik u.a. |
| | 28 | evtl. Importeur | Mammut u.a. | - | - | Mammut u.a. | - | unbekannt | s.o. | Mammut u.a. | Mammut u.a. | - | viele |
| | 29 | Komponentenhersteller | viele | Expansionsventile: Danfoss, Verdichter: Danfoss, Embraco | Verdichter: Daikin, Danfoss, Embraco, Sanden, Sanyo | Expansionsventile: u.a. Danfoss, Verdichter: u.a. Danfoss, Embraco | u.a Danfoss | Verdichter: Daikin, Danfoss, Embraco, Sanden, Sanyo, | s.o. | Viele | Viele | Verdichter: Danfoss, Embraco, Sanyo; Expansionsventil: Danfoss | Standardkomponenten |
| | 30 | Betreiber | alle | Carlsberg | Coca-Cola | insbesondere Discounter | insbesondere Discounter | Nestlé erwägt Anwendung | s.o. | Unbekannt | zahlreiche | Coca-Cola | Alle Supermarktketten |

## 5.9 Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz

Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz waren bis 1985 bei Deutschen Supermärkten Standard, wurden jedoch in der Folge von Verbundsätzen verdrängt, siehe Abschnitt 5.5 [Höpfer2007]. Heute werden Verflüssigungssätze noch bei kleineren Lebensmittelselbstbedienungsgeschäften (sogenannte „Tante Emma Läden“), Convenience Stores, Tankstellen, Metzgereien, Bäckereien etc. eingesetzt [Höpfer2007]. Die Größe heutiger deutscher Supermärkte (ohne Lebensmittelselbstbedienungsläden, s. Kap. 2) erfordert in der Regel Kälteleistungen deutlich über 20 kW und damit die Parallelschaltung von mehreren Verdichtern [ASHRAE2002]. Systeme mit mehreren parallelgeschalteten Verdichtern werden als Verbundanlagen bezeichnet und im Abschnitt 5.5 behandelt.

In Supermärkten der im Rahmen dieses Projektes untersuchten Größe, d. h. ab ca. 400 $m^2$ Verkaufsfläche, siehe Kap. 2, kommen Verflüssigungssätze überwiegend bei Erweiterungsbauten zum Einsatz, wenn die Kapazität der Verbundkälteanlage für die Erweiterung nicht ausreicht [Schnase2007]. Die Verflüssigungssätze werden dabei in der Regel entfernt von der Kühlstelle, typischerweise auf dem Dach, im Keller, in einem Nebenraum oder an der Außenseite der Gebäudewand betrieben. Bei modernen Verflüssigungssätzen gibt es aufgrund der verwendeten Werkstoffe keine Korrosionsprobleme bei der Aufstellung im Freien. Meist sind die Komponenten in einem Wetterschutzgehäuse untergebracht und beinhalten darin auch die komplette Elektrik/Elektronik [Höpfer2007]. Verflüssiger, Verdichter (in der Regel hermetische Verdichter, wobei es auch solche mit halbhermetischen Verdichtern gibt) und Sammler werden vom Hersteller auf einem Geräteträger fertig verbunden. Vor Ort werden vom Kälteanlagenbauer die Verbraucher, kleinere Kühlzellen und Gruppen von Kühl-/Gefriermöbeln angeschlossen. Es gibt in Europa ca. 1 Million derartiger Verflüssigungssätze [DKV2002]. In den Süd- und Osteuropäischen Supermärkten mit ihren gegenüber Deutschland deutlich kleineren Größen kommen Verflüssigungssätze noch häufig als alleinige Kälteanlage des Marktes zum Einsatz.

In der Regel werden neue Kälteanlagen mit Verflüssigungssätzen mit HFKW als Kältemittel in Direktverdampfung ausgeführt. Für die Normalkühlung wird teilweise

R134a eingesetzt und für die Tiefkühlung in der Regel R404A. Die Mitte der 1990er Jahre von einigen kleinen Herstellern vorgestellten R290-Verflüssigungssätze haben sich nicht durchsetzen können. Derzeit halten sich alle Verdichterhersteller an die maximale Füllmenge von 150 g brennbare Kältemittel aus dem Haushaltsgerätebereich. Solange die Kältemittelfüllmengen unter 150 g bleiben, sind nach IEC 60335 (International Electrotechnical Commission) keine besonderen Anforderungen in Bezug auf den Aufstellort zu erfüllen. Der Gerätehersteller muss jedoch bestimmte Anforderungen in Bezug auf z. B. Oberflächentemperaturen und Gasdichtheit erfüllen. Für Verflüssigungssätze sind 150 g Kältemittel jedoch deutlich zu wenig, typische Füllmengen liegen mit HFKW zwischen 3 und 43 kg, siehe Technologiedatenblätter B sowie deren Kurzfassung in Tabelle 5.6.

In Großbritannien gab es Ende der 1990er Jahre einzelne Ansätze, Kohlenwasserstoffe in Verflüssigungssätzen mit einem Verkaufsmöbel zu installieren. Die Kohlenwasserstofffüllmenge lag dabei unterhalb von 1,25 kg [Colbourne2007]. Bei den verschiedenen Versuchen Kohlenwasserstoffe als Kältemittel für Verflüssigungssätze zu etablieren, steigen in der Regel die Investitionskosten auf Grund der Anforderungen, z. B. ständige Überwachung, Lüftung, Gasdichte (exgeschützte) Komponenten etc.. Gleichzeitig gibt es eine Hemmschwelle insbesondere bei den Anwendern; Kälteanlagen enthalten traditionell keine brennbaren Stoffe. Größere Mengen (z. B. 1 bis 10 kg) brennbare Kältemittel werden als gefährlich eingestuft. Eine Campinggasflasche mit ihren 5 bzw. 11 kg Füllmenge wird hingegen nicht als Bedrohung eingestuft. Diese echten Mehrausgaben und „gefühlten“ Sicherheitsbedenken haben bisher eine Verbreitung von Kohlenwasserstoffen als Kältemitteln in Verflüssigungssätzen verhindert.

Speziell für Convenience Stores und Tankstellen bietet ein japanischer Hersteller kombinierte Verflüssigungssätze zur Klimatisierung, Heizung (Wärmepumpe) und Kühlung mit R407C an [Zeller2006]. Für April 2007 war der Einsatz dieser Technologie in einem deutschen Discounter geplant [Vogelbacher2007]. Im Rahmen des zweiten Treffens des Projektbegleitenden Expertenkreises wurde beschlossen, diese als „Convenipack“ vermarktete Lösung den Verbundanlagen zuzuordnen, siehe Technologiedatenblatt C16.

Tabelle 5.6: Zusammenfassung der Technologiedatenblätter Teil B Verflüssigungssätze

| | | | B1 |
|---|---|---|---|
| | | | **Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz** |
| Kälte-Daten | 1 | Einsatzzweck/Gerätetyp | Verflüssigungssatz mit luftgekühltem Verflüssiger und halbhermetischem Verdichter für Klima-, NK- und TK-Anwendungen |
| | 2 | Kälteleistungsbereich | AC 2,5 kW - 50 kW, NK 1,8 kW - 45 kW, TK 0,75 kW - 25 kW |
| | 3 | Art der Kälteübertragung | direkt |
| | 4 | Kältemittelart | R404A, R134a, R507A, R407C |
| | 5 | Kältemittelfüllmenge | 10 bis 20 kg |
| Leckage | 6 | Typische Leckageraten | bei geringerer Lötstellenanzahl niedriger als bei Verbundanlagen |
| | 7 | Quelle der Leckage-Information | Bitzer |
| | 8 | Art der Ableitung | in den Markt |
| | 9 | Verbleib des KM bei Außerdienststellung | Entsorgung |
| Energie | 10 | Energieverbrauch | ähnlich dem einer Verbundanlage mit gleicher Verdichtertechnologie, d.h. Ein/aus- oder Drehzahlregelung |
| | 11 | Möglichkeit zur WRG | Anlagenseitig möglich |
| | 12 | Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung | Viele der in Kapitel 6 beschriebenen Technologien, z.B. Drehzahlregelung, Heißgasabtauung oder Verflüssigerdruckabsenkung |
| | 13 | denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden. | weltweit |
| Lebens-zykluskosten | 14 | Investitions- / Komponentenkosten | geringer als bei einer Verbundanlage |
| | 15 | Installationskosten | geringer als bei einer Verbundanlage |
| | 16 | Betriebskosten | ähnlich denen einer Verbundanlage |
| | 17 | Wartungsintervalle | Verflüssigereinigung nach Bedarf, ansonsten nach F-Gaseverordnung 1 (bis 30 kg) oder 2 (ab 30 kg) Mal im Jahr |
| | 18 | Wartungskosten | gering |
| Markt-anteil | 19 | Anzahl installierter Geräte und Anlagen | viele Millionen weltweit |
| | 20 | Regionale Verbreitung | D seit 1985 auf dem Rückzug, in Südeuropa in kleineren Märkten noch verbreitet |
| Betriebserfahrungen | 21 | Dauer der Betriebserfahrung | über 10 Jahre mit HFKW, davor mit FCKW |
| | 22 | Zuverlässigkeit | sehr zuverlässig |
| | 23 | Sonder-Probleme | keine |
| | 24 | Besondere Eigenschaften | große Kältemittelauswahl, robust, langlebig, flexibel |
| | 25 | Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes | Ideal für Erweiterungen und Anlagen mit einer oder mehreren Kühlstellen. Flexible Kältemittelwahl. Bei KM-wechsel Reinigung beachten |
| | 26 | Angaben zur Sicherheit/besondere Sicherheitsanforderungen | bei größeren Märkten Redundanz und Leckagerisikostreuung durch Verwendung mehrerer Einzelanlagen |
| Bezugsque | 27 | Hersteller | Bitzer, Bock, Copeland, Danfoss, Dorin, Frigopohl u.a. |
| | 28 | evtl. Importeur | viele |
| | 29 | Komponentenhersteller | Bitzer, Bock, Copeland, Danfoss, Dorin, Frigopohl u.a. |
| | 30 | Betreiber | Verschiedene, in D überwiegend für Kühlräume oder Erweiterungen |

## 5.10 Zentrale Verbundanlagen

Zentrale Verbundanlagen finden sich heute in nahezu allen Supermärkten [Jakobs2006]. In großen Verbrauchermärkten und Hypermärkten werden ausschließlich Verbundanlagen eingesetzt. Sie finden sich jedoch auch bei Discountern; dort in der Regel nur für den NK-Bereich. Kennzeichnend für diese Kälteanlagen ist die Parallelschaltung von mehreren Verdichtern zu einem Verbund. Die Verdichter arbeiten mit einem gemeinsamen Verflüssiger der die verschiedenen Verbraucher mit Kältemittel versorgt. Verbraucher sind Kühltheken, Kühlregale, Kühlinseln, Tiefkühlinseln, Kühlräume und Tiefkühlräume. Die Untergliederung entsprechend dieser Verbraucher ist bei Verbundanlagen wenig sinnvoll, da alle Verbraucher vom gleichen Verdichterverbund versorgt werden. Die installierten Kälteleistungen liegen im Bereich von 1.200 bis 1.800 W pro laufenden Meter Kühlregal [Schneider2007].

Die verschiedenen am Markt verwendeten zentralen Kälteanlagen unterscheiden sich in der Wahl des/der Kältemittel(s) und auch in der Art der Kältemittelverteilung sowie bei manchen Anlagen durch die Kühlung des Verflüssigers. Man unterscheidet des Weiteren zwischen Systemen mit direkter und indirekter Verdampfung. Tabelle 5.7 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten (siehe Technologiedatenblätter Teil C für nähere Ausführungen). Nicht alle Kombinationen sind wegen (sicherheits-) technischer Gründe sinnvoll bzw. akzeptabel. So ist Ammoniak auf Grund seiner hohen Toxizität für den Kundenbereich ausgeschlossen und wird daher niemals in Direktverdampfungssystemen im Verkaufsraum eines Supermarktes eingesetzt werden.

Tabelle 5.7: Kombinationsmöglichkeiten für zentrale Verbundanlagen.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Verflüssiger** | luftgekühlt (Außenluft) | wassergekühlt, Wasserkühlung in Kühler auf dem Dach | wassergekühlt, Brauch- oder Heiz-wasser (Wärme-rückgewinnung – WRG) | Luftgekühlt (WRG) |
| **Kältemittel NK** | R404A / R507A / R134a | KW (R290 oder R1270) | R717 | R744 |
| **Kälteverteilung NK** | Direkt-verdampfung | Kälteträger einphasig, flüssig | Kälteträger zweiphasig, verdampfend | Kälteträger zweiphasig, schmelzend |
| **Kältemittel TK** | R404A / R507A | KW (R290 oder R1270) | R717 | R744 |
| **Kälteverteilung TK** | Direkt-verdampfung | Kälteträger einphasig, flüssig | Kälteträger zweiphasig, verdampfend | Kälteträger zweiphasig, schmelzend |

In der Praxis bisher realisierte Verbundanlagen verwenden folgende Technologien, die alle im Abschnitt C der Technologiedatenblätter beschrieben sind:

C1 HFKW Direktverdampfung: R404A-Supermarkt-Verbundkälteanlage mit Direktverdampfung – diese Anlage ist derzeit Industriestandard bei Supermarktverbundanlagen; Varianten verwenden Wärmerückgewinnung. Neben R404A kommen auch R507A (selten) und für den NK-Bereich R134a zum Einsatz.

C2 HFKW Indirekt: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet

C3 HFKW Indirekt Sole/$CO_2$: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung und verdampfend für Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet

C4 HFKW Eisbrei: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger Eisbrei für Normalkühlung und Direktverdampfung für die Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet

C5 HFKW/R744 Kaskade: R404A Direktverdampfung für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung

C6 HFKW/R744 Kaskade: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet

C7 HFKW/R744 Kaskade – NK indirekt mit $CO_2$: R404A Kompaktanlage mit verdampfendem Kälteträger ($CO_2$) für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet

C8 R717 indirekt: Ammoniak (R717) mit flüssigem Kälteträger, Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger und/oder verdampfenden Kälteträger

C9 R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem Kälteträger

C10 R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit verdampfendem Kohlendioxid

C11 KW indirekt: Kohlenwasserstoff mit flüssigem Kälteträger, Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger und/oder verdampfenden Kälteträger

C12 KW/R744 Kaskade: Kohlenwasserstoff in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem oder verdampfendem Kälteträger

C13 R744 Direktverdampfung: Kohlendioxid im gesamten Markt; anstelle einer Kältemittelverflüssigung findet hier- je nach Außentemperatur - im Sommer keine Verflüssigung sondern nur eine Gaskühlung statt. Die Drücke derartiger Kälteanlagen liegen bei derartigem Betrieb in der Regel über 100 bar auf der Hochdruckseite, Häufig in Kombination mit Wärmerückgewinnung

C14 R744 Direktverdampfung in Kaskade zu HFKW- bzw. KW. Kohlendioxid im ganzen Markt; Betrieb von NK und TK unterkritisch mit Verflüssigung an einer kompakten HFKW- bzw. KW-Anlage.

C15 Distributed Systems („Hussmann Protocol“, 1993 von der Fa. Hussmann vorgestellt) sind kompakte Verdichterverbünde mit wassergekühlten Verflüssigern. Die Verdichterverbünde befinden sich in schallgedämmten Gehäusen, die im Supermarkt platziert werden können. Als Kältemittel wird von der Fa. Hussmann immer R404A eingesetzt.

C16 Conveni-Pack – Kombinierte Kälteversorgung, Klimatisierung und Beheizung von kleinen bis mittelgroßen Ladenformaten

Bei direkt verdampfenden Systemen befindet sich der Verdampfer in den Kühlmöbeln. Verflüssiger können in luftgekühlten Maschinenräumen im Gebäude oder außerhalb des Gebäudes angeordnet sein. Rückgewonnene Wärme vom Verflüssiger kann für Raum- oder Wassererwärmung genutzt werden. Direktverdampfungs-Systeme sind die weltweit dominierende Technologie für Supermärkte. Verwendete Kältemittel für Neuanlagen sind R404A und im kleineren Ausmaß R134a für mittlere Temperaturanwendungen sowie in einigen Ländern, z. B. Norwegen, R507A. Direktverdampfungs-Systeme werden immer einen kältemittelführenden Teil innerhalb der Verkaufsräume haben, die der Öffentlichkeit ständig zugänglich ist. Für das Kältemittel ist deshalb in der Regel die höchste Sicherheitsklasse (z. B. L1 nach EN-378) notwendig.

Indirekte Systeme verfügen über einen Sekundärkreis, der die Wärmeenergie mit Hilfe eines Kälteträgers von der Kühltruhenauslage zum Verdampfer transportiert. Kältemittelführende Teile können sich in einem gesicherten Maschinenraum befinden, d. h. isoliert von öffentlich zugänglichen Bereichen. Die Kältemittelfüllmenge des Primärsystems kann erheblich verringert werden. Indirekte Systeme werden sowohl mit HFKW Kältemitteln als auch mit R717 oder Kohlenwasserstoffen betrieben. Maschinenräume mit ausreichenden Sicherheitsinstallationen stellen bei Anlagen mit R717 oder Kohlenwasserstoffen einen zusätzlichen Kostenfaktor dar. Energieverbräuche von gut ausgeführten und eingeregelten indirekten Supermarktkälteanlagen können energetisch durchaus mit R404A-

Direktverdampfungsanlagen mithalten – siehe Technologiedatenblätter C2, C3, C8 und C11.

Mehr Beachtung findet in letzter Zeit auch das Verwenden von Sekundärfluiden mit Phasenwechsel; Eisbrei für die Normalkühlung (s. Technologiedatenblatt C4) oder $CO_2$ für die Tiefkühlung (C3), aber auch für die Normalkühlung (C7 und C10) [Møller2003]. Obwohl Eisbrei in Supermärkten bisher nur für den Normalkältebereich eingesetzt wird, gibt es Entwicklungen im Rahmen eines EU-Projektes, Eisbrei auch für den TK-Bereich einzusetzen [Hägg2005]. Bei Wahl des richtigen Mediums kann Eisbrei sowohl in der Normalkälte wie auch in der Tiefkälte einem einphasigen Kälteträger überlegen sein [Hägg2005, Lagrabette2005].

In den indirekten Anlagen kann die eigentliche Kälteanlage sehr kompakt konstruiert werden. Es können in einer Fabrik gefertigte Einheiten benutzt werden und die Montage von Systemen vor Ort kann vereinfacht werden. Bei Supermarktkälteanlagen können indirekte Systeme auch für stabilere Temperaturverhältnisse und höhere Luftfeuchtigkeiten an den Kühlstellen sorgen, allerdings wird die Regelung gleichzeitig etwas träger [Bucher2007]. Der Energieverbrauch kann, insbesondere bei der Verwendung von Eisbrei, bis zu 10 % unter dem einer vergleichbaren Direktverdampfungsanlage liegen, da bei einer Direktverdampfungsanlage häufig durch die Überhitzung des Kältemittels in den Verdampfern tiefere Verdampfungstemperaturen erforderlich sind. Diese führen wiederum zu einer stärkeren Vereisung der Verdampfer und damit verbundenen Abtauverlusten. Auch sind die Saugleitungen in Direktverdampfungsanlagen in Supermärkten zum Teil sehr lang. Lange Saugleitungen führen zu Druckverlusten und damit zu einer höheren erforderlichen Verdichterleistung [Rivet2007].

Die sekundären Kältesysteme haben jedoch auch Nachteile. Man braucht zusätzlich mindestens eine Pumpe und einen Wärmeüberträger. Um den Energieverbrauch der Anlagen nicht zu erhöhen, ist es auch wichtig, einen geeigneten Kälteträger zu wählen.

Tabelle 5.8 zeigt in zwei Teilen eine Zusammenfassung der Technologiedatenblätter für Verbundanlagen (Teil C). Die Informationen in der Tabelle sind zum Teil stark

verkürzt. Genauere Angaben sowie die entsprechenden Literaturstellen finden sich in den Technologiedatenblättern.

Tabelle 5.8: Zusammenfassung der Technologiedatenblätter Teil C Verbundkälteanlagen, Teil 1

| | | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Zentrale Verbundanlagen | | | | | | | |
| | | | **HFKW Direktverdampfung** | **HFKW indirekt** | **HFKW indirekt flüssig und verdampfend** | **HFKW indirekt Eisbrei** | **HFKW/R744-Kaskade** | **HFKW indirekt/R744-Kaskade** | **HFKW/R744-Kaskade - NK CO2** | **R717 indirekt** |
| Kälte-Daten | 1 | Einsatzzweck/Gerätetyp | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen |
| | 2 | Kälteleistungsbereich | 40 bis 1000 kW | 40 bis 1000 kW | 40 bis 1000 kW | 10 bis 100 kW, z.T.bis 800 kW | 40 bis 1000 kW möglich; TK serienmäßig bis 120 kW | alle Bereiche möglich | alle Bereiche möglich | alle Bereiche möglich |
| | 3 | Art der Kälteübertragung | direkt | indirekt | indirekt | NK: indirekt; TK: direkt | direkt | NK: indirekt; TK: direkt | NK: indirekt; TK: direkt | indirekt |
| | 4 | Kältemittelart | R404A, seltener R134a (NK), R507 und R410A | R404A, R507, für NK auch R134a | R404A, als Kälteträger für TK R744 | R404A, selten R717 | NK: R404A, selten R134a; TK: R744 | NK: R134a oder R507; TK: R744 | NK: R134a oder R404A; TK: R744 | R717 indirekt |
| | 5 | Kältemittelfüllmenge | 60 (Discounter) bis 1500 kg (Verbrauchermarkt) | ca. 60 % weniger als bei Direktverdampfung | ca. 60 - 70 % weniger als bei Direktverdampfung | NK: 70 - 80 % weniger als C1, TK wie C1 | Verbrauchermarkt 5000 m2: 1150 kg R404A, 70 kg R744 | NK-Anlage ca. 60 % weniger HFKW als C1 | NK: 70 - 80 % weniger HFKW als C1 | ca. 300 bis 800 g/kW |
| Leckage | 6 | Typische Leckageraten | 4 bis 10 %, mit R134a niedriger da Druck niedriger | niedriger als bei C1 | niedriger als bei C1 | niedriger als bei C1 | HFKW-Leckagen niedriger als bei C1 | HFKW-Leckagen niedriger als bei C1 | HFKW-Leckagen niedriger als bei C1 | gering da Ammoniak stinkt |
| | 7 | Quelle der Leckage-Information | Hersteller und Anwender | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung |
| | 8 | Art der Ableitung | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie |
| | 9 | Verbleib des KM bei Außerdienststellung | Entsorgung | Entsorgung | Entsorgung | Entsorgung | HFKW: Entsorgung; R744 abblasen - Öl auffangen! | HFKW: Entsorgung; R744 abblasen - Öl auffangen! | HFKW: Entsorgung; R744 abblasen - Öl auffangen! | Entsorgung |
| Energie | 10 | Energieverbrauch | ca. 3400 kWh/a/m - Mittelwert pro Laufmeter TK + NK | ca. 10 % weniger bis 20 % mehr als C1 | NK: ca. 10 % mehr als C1, TK: bis 6 % mehr als C1 | NK: bis zu 3 % weniger als C1; TK gleich C1 | wie C1 | ca. 5 bis 15 % weniger als C2 | ca. 15 % weniger als C2 | ca. 0 - 10 % mehr als C1 |
| | 11 | Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung | vorhanden | vorhanden | vorhanden | vorhanden | vorhanden | vorhanden | vorhanden | vorhanden |
| | 12 | Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen |
| | 13 | denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden. | D, F, CH | USA, CAN, EU | CH, D, F | F | D | CH, N | N | Mitteleuropa + Brasilien |
| Lebenszykluskosten | 14 | Investitions- / Komponentenkosten | Industriestandard, preiswerter als R744 oder R717 | bis zu 25 % höher als bei C1 | bis zu 20 % höher als bei C1 | über denen von traditonellen Kälteträgeranlagen (C2) | gleich wie C1 | TK ähnlich wie C1, NK ähnlich wie C2 | bis zu 20 % höher als bei C1 | ca. 20 - 35 % über C1 |
| | 15 | Installationskosten | preiswerteste Verbundtechnologie | je nach verwendetem Rohrmaterial und Installationsfirma z.T. niedriger als C1 | je nach verwendetem Rohrmaterial und Installationsfirma z.T. niedriger als C1 | niedriger als C2 | je nach Anlagengröße zwischen 0 und 10 % höher als C1 | je nach Anlagengröße zwischen 0 und 10 % höher als C1 | je nach Anlagengröße zwischen 0 und 10 % höher als C1 | ca. 2 % über denen von C1 |
| | 16 | Betriebskosten | Referenztechnologie | 15 % niedriger bis 15 % über C1 | ähnlich C1, niedriger als C2 | niedriger als C2 | zwischen 0 und 5 % niedriger als C1 | zwischen 5 und 10 % niedriger als C1 | zwischen 10 und 15 % niedriger als C1 | zwischen 0 und 10 % über denen von C1 |
| | 17 | Wartungsintervalle | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr | einmal im Jahr |
| | 18 | Wartungskosten | Referenztechnologie | bis zu 50 % niedriger als C1 | bis zu 50 % niedriger als C1 | höher als bei C2 | wie C1 | unter denen von C1 | unter denen von C1 | bis zu 50 % niedriger als C1 |
| Marktanteil | 19 | Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung) | sehr viele | insbesondere in CAN, CH, L und S, ca. 500 in USA | ca. 100 | 10 bis 50 in Supermärkten | über 100 allein von Linde, insgesamt in EU mehrere hundert | zwischen 20 und 50 (Schätzung) | wenige | ca. 60 von Linde |
| | 20 | Regionale Verbreitung | Gesamte EU | CAN, CH, L, N, S, USA | u.a. CH, S | CH, F, JP | CH, DK, D, I, L, N, S | CH, N | DK, N | Brasilien, CH, D, DK, L, N, S |
| Betriebserfahrungen | 21 | Dauer der Betriebserfahrung | R404A seit 1998, R134a (NK) seit 1998, R410A seit (2006) | seit Mitte 1990er | seit Mitte der 1990er | seit 1995 | seit 2001 | seit Ende der 1990er | wenige | seit 1995 |
| | 22 | Zuverlässigkeit | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig |
| | 23 | Sonder-Probleme | keine | Luft im Kälteträgerkreislauf führt zu Korrosion | hohe Drücke im CO2-TK-Kreis | Eisbreigenerator je nach Bauart wartungsintensiv | hohe Stillstandsdrücke bei R744 führen zum Abblasen im Stillstand | hohe Stillstandsdrücke bei R744 führen zum Abblasen im Stillstand | führen zum Abblasen im Stillstand; Gefälle bei NK-Rücklaufleitungen erforderlich | R717 ist giftig |
| | 24 | Besondere Eigenschaften | hohe Flexibilität | sehr flexibel, unverpackte Waren trocknen weniger aus, Verwendung von Kunststoffrohren möglich | im TK-Bereich Einsatz herkömmlicher Möbel möglich | hohe Flexibilität, Möglichkeit der Kältespeicherung, Verwendung von Kunststoffrohren möglich | TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744 | sehr flexibel, unverpackte Waren trocknen weniger aus, TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744 | unverpackte Waren trocknen weniger aus, TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744 | GWP nahe 0, Verwendung von Kunststoffrohren möglich |
| | 25 | Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes | vorhanden | vorhanden, aber Austausch der Wärmeaustauscher ratsam | vorhanden | bedingt vorhanden | NK problemlos; TK Austausch aller Komponenten nötig/ratsam | bedingt vorhanden | bedingt vorhanden | nur sehr bedingt |
| | 26 | Angaben zur Sicherheit/besondere Sicherheitsanforderungen | Drücke mit R410A höher, bis 28 (40) bar | hohe Sicherheit | hohe Drücke im CO2-TK-Kreis, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | hohe Sicherheit | maximaler Druck der R744-Stufe beträgt 40 bar, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | Maximaler Druck der R744-Stufe beträgt 40 bar, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | Maximaler Druck der R744-Stufe beträgt 40 bar, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | R717 ist giftig |
| Bezugsquellen | 27 | Hersteller | alle | zahlreiche | zahlreiche | wenige | BKT, Carrier/Linde, Epta, Knudsen Køling, Norild, Superkøl | Carrier/Linde, Goetz (CH) | Carrier/Linde | Carrier/Linde |
| | 28 | evtl. Importeur | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant |
| | 29 | Komponentenhersteller | viele | viele | viele | Eisbrei z.B. Axima, Sunwell, Müller, Heatcraft | viele | viele | viele | viele |
| | 30 | Betreiber | R404A alle, R134a (NK) Rewe, R410A Ökoring (Kühllager) | alle schwedischen, viele in CAN, CH, L, N und USA | einige in CH, DK, F und S | Migros (CH), Carrefour (F) | Viele | Coop (CH, N), ICA (N), Migros (CH) | Coop (N), Hurtigrutenterminal (N) | ICA (S), Migros (CH) |

## Tabelle 5.8: Zusammenfassung der Technologiedatenblätter Teil C Verbundkälteanlagen, Teil 2

| | | | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Zentrale Verbundanlagen | | | | | | | |
| | | | R717/R744 Kaskade NK flüssiger KT | R717/R744 Kaskade - NK CO2 als KT | KW indirekt | KW/R744 Kaskade - NK CO2 als KT | R744 Direktverdampfung | R744 Direktverdampfung in Kaskade zu (HF-)KW | Distributed System | Convenipack |
| Kälte-Daten | 1 | Einsatzzweck/Gerätetyp | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Zentrale Verbundanlagen | Verteilte (Verbund-)anlage | Gleichzeitiger Einsatz zur Markt-klimatisierung und NK-Kühlmöbel (TK optional) mit integrierter WRG |
| | 2 | Kälteleistungsbereich | alle Bereiche möglich, nach unten durch verfügbare Verdichter begrenzt | alle Bereiche möglich, nach unten durch verfügbare Verdichter begrenzt | ausgeführt bis 190 kW NK und 50 kW TK | alle Bereiche möglich | alle Bereiche möglich, bisher 40 bis 140 kW ausgeführt | alle Ber. möglich, in DK-Dis-counter typisch NK: 24 kW, TK: 10 kW | jede einzelne Verdichterinseln 15 bis 40 kW | NK 15,8 kW; TK 2,0 kW, AC 14,5 kW; WP 30 kW |
| | 3 | Art der Kälteübertragung | NK: indirekt; TK: direkt | NK: indirekt; TK: direkt | indirekt | NK: indirekt; TK: direkt | direkt | direkt | direkt, aber lokal begrenzt | direkt |
| | 4 | Kältemittelart | R717/R744 | R717/R744 Kaskade - NK CO2 als KT | R290 oder R1270 | R290 und R744 | R744 | HFKW/R744 oder KW/R744 | R404A | R407C |
| | 5 | Kältemittelfüllmenge | ca. 230 g/kW R717 und 2.500 g/kw R744 | ca. 1 kg R71 pro kW Kältelesitung, R744 unbekannt | ab 120 g KW pro kW Kälteleistung | ab 120 g KW pro kW Kälteleistung | ca. 1 kg pro kW | HFKW ca. 70 - 80 % reduziert gegenüber C1 | ca. 25 bis 33 % weniger als C1 | 10 bis 25 kg |
| Leckage | 6 | Typische Leckageraten | gering da Ammoniak stinkt | gering da Ammoniak stinkt | unbekannt, aber vermutlich gering durch Gassensoren | unbekannt, aber vermutlich gering durch Gassensoren | ca. 10 % | HFKW unter 5 %, R744 ca. 10 % | niedriger als C1 | vermutlich niedriger als bei Verbundanlage |
| | 7 | Quelle der Leckage-Information | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | eigene Abschätzung | dänische Abschätzung | dänische Abschätzung | USA | Daikin |
| | 8 | Art der Ableitung | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | ins Freie | einzelne Kreise in den Markt | in den Markt |
| | 9 | Verbleib des KM bei Außerdienststellung | R744 abblasen - Öl auffangen! | Entsorgung oder Abblasen - Öl auffangen! | Entsorgung | Abblasen - Öl auffangen! | Abblasen - Öl auffangen! | Entsorgung; R744 auch Abblasen - Öl auffangen | Entsorgung | Entsorgung |
| Energie | 10 | Energieverbrauch | weniger als C1 | 13 - 18 % weniger als C1 | luftgekühlter Verflüssiger 5 % mehr als C1, indirekte Kühlung des Verfl. 20 % mehr als C1 | ähnlich C1 | in Nordeuropa ca. 10 % weniger als C1, in Südeuropa ca. 10 % mehr als C1 | ähnlich C1 | ca. 5 bis 10 % unter C1 | ähnlich dem einer Verbundanlage |
| | 11 | Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung | vorhanden | vorhanden | sehr gut, insbesondere bei Wärmeträgerkreislauf am Verflüssiger | vorhanden | sehr gut | vorhanden | sehr gut | fest installiert |
| | 12 | Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | die meisten in Kapitel 6 beschriebenen | Viele der in Kap. 6beschriebenen Technologien, z.B. Heißgasabtauung |
| | 13 | denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden. | Dänemark - Versuchsanlage + Supermarkt in Norwegen | NL | Unbekannt | DK | CH, D, DK, N, S | DK | USA | B, D, GB, JP |
| Lebenszykluskosten | 14 | Investitions- / Komponentenkosten | TK-Teil bei großen Märkten vergleichbar mit C1 | 28 % über C1 | ca. 15 bis 25 % über C1 | ca. 20 % teurer als C1 | ca. 50 % über C1, zukünftig ca. 20 % über C1 | Bis ca. 20 % über C1 | für kleine Supermärkte bis zu 30 % teurer als C1, für große Märkte preiswerter als C1 | Ähnlich denen einer Verbundanlage |
| | 15 | Installationskosten | unbekannt | höher als C1 | ca. 20 % höher als C1 | ca. 10 bis 20 % teurer als C1 | etwas höher als C1 | etwas höher als C1 | vermutlich niedriger als bei C1 | Montagekosten etwas geringer als bei Verbundanlage mit Klimaanlage |
| | 16 | Betriebskosten | unbekannt | niedriger als C1 | niedriger als C1 | wie C1 | z.Zt. noch etwas höher als C1 | ähnlich C1 | ca. 10 % unter C1 | Für gesamten Markt bis zu 30 % niedriger, da kein Heizkessel vorhanden |
| | 17 | Wartungsintervalle | einmal im Jahr | einmal im Jahr | einmal im Jahr | einmal im Jahr | mehrmals pro Jahr zur Gaskühlerreinigung | einmal im Jahr | je nach HFKW-Füllmenge bis zu 4x im Jahr, aber seltener als C1, da Füllmenge kleiner | Nach Bedarf, von Anlage ermittelt und automatisch angefordert |
| | 18 | Wartungskosten | unbekannt | niedriger als C1 | niedriger als C1 | wie C1 | ca. 20 % über C1 | ca. 20 bis 50 % über C1 | ähnlich C1 | vermutlich niedriger als bei C1 |
| Marktanteil | 19 | Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung) | sehr wenige | weniger als 10 in EU | Linde ca. 17 | 1 in DK | ca. 60 in EU | über 100 in DK | Marktanteil bei Neuanlagen in USA im Jahr 2006: 15 % | ca. 4000 in JP in Convenience Stores sowie ca. 130 in EU |
| | 20 | Regionale Verbreitung | N, S | NL | CH, D, DK, GB, I, S | DK | B, CH, D, DK, GB, I, L, N, S | DK | USA, einige wenige in A und CH | D (10), B (20), GB (100), JP (4000) |
| Betriebserfahrungen | 21 | Dauer der Betriebserfahrung | seit 1995 Versuchsanlage in DK | 3 bis 4 Jahre | seit 1996 | seit 2000 | seit 2001 | seit 2002 | seit Mitte der 1990er | seit 2002 |
| | 22 | Zuverlässigkeit | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig | sehr zuverlässig |
| | 23 | Sonder-Probleme | R717 ist giftig, hohe Stillstandsdrücke bei R744 führen zum Abblasen im Stillstand | R717 ist giftig, hohe Stillstandsdrücke von R744 | KW sind brennbar, Gassensoren erforderlich | R290 ist brennbar, hohe Stillstandsdrücke bei R744, Gassensoren erforderlich | hohe Stillstandsdrücke | hohe Stillstandsdrücke von R744 | keine | keine |
| | 24 | Besondere Eigenschaften | GWP nahe 0, unverpackte Waren trocknen weniger aus, TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744 | GWP nahe 0 | GWP nahe 0, sehr flexibel, unverpackte Waren trocknen weniger aus, Verwendung von Kunststoffrohren möglich | GWP nahe 0, sehr flexibel, TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744 | stabilere Kühlregaltemperaturen, kleinere Rohrleitungs-durchmesser | stabilere Kühlregaltemperaturen, kleinere Rohrleitungs-durchmesser bei R744 | sehr flexibel | integrierte WRG |
| | 25 | Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes | nur sehr bedingt | bedingt vorhanden | nur bedingt geeignet | alle Komponenten neu | viele Komponenten neu | viele Komponenten neu | ja, sehr gut | vorhanden, umfassende Reinigung aller Kältemittel-führenden Teile erforderlich |
| | 26 | Angaben zur Sicherheit/besondere Sicherheitsanforderungen | Stillstandsdrücke bei R744, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | Stillstandsdrücke bei R744, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | KW sind brennbar, Gassensoren und Lüftung erforderlich | R290 ist brennbar; R744 hohe Stillstandsdrücke, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | hohe Stillstandsdrücke bei R744, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | hohe Stillstandsdrücke bei R744, Sicherheitsventile und CO2-Sensoren erforderlich | keine | bei größeren Märkten getrennte KM-Kreisläufe mit gemeinsamer Regelung |
| Bezugsquellen | 27 | Hersteller | Johnson Controls/Sabroe/York (DK), Norild (N) | unbekannt | Carrier/Linde (D), Johnson Controls (DK) | SuperKøl (DK), J&E Hall (GB) | Epta, Goetz, Green and Cool, Knudsen Køling, Linde/Carrier, Trondheim Kulde | Tempcold (DK) | Hussmann | Daikin |
| | 28 | evtl. Importeur | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | nicht relevant | Hussmann | Daikin |
| | 29 | Komponentenhersteller | viele | viele | viele | viele | E-Ventil: Danfoss; Verdichter: Bitzer, Dorin; Möbel: Costan, Linde; Wärmeübertrager: Güntner, Luve | E-Ventil: Danfoss; Verdichter: Bitzer, Dorin; Möbel: Costan, Linde; Wärmeübertrager: Güntner, Luve | viele | Daikin |
| | 30 | Betreiber | Coop (N) + einige in S | unbekannt | einige in S | Fakta in DK (NK jedoch mit Kälteträger) | inzwischen über 70 Märkte verschiedenster Ketten in EU | Rema 1000 und andere in DK | In EU nur drei Märkte in A bekannt, sehr beliebt in USA - 15 % Marktanteil mit steigender Tendenz | Aldi (GB), Penny (D), Spar (B) u.a. |

Die Installationskosten einer zentralen Verbundanlage werden insbesondere durch die Wahl des Kältemittels bestimmt. Drucklage, volumetrische Kälteleistung und Materialkompatibilität sind entscheidende, die Installationskosten beeinflussende Größen. Bild 5.4 zeigt zum Beispiel für eine Kälteleistung von 100 kW die erforderlichen Rohrleitungsquerschnitte mit den dazugehörigen Isolationen für verschiedene Kältemittel. So wird bei großen Märkten zum Beispiel durch kleinere Rohrleitungsdimensionen mit R744 genauso viel Geld eingespart, wie für die zusätzliche Sicherheitstechnik und entsprechende Hochdruckkomponenten zusätzliche Kosten entstehen [Post2007]. Bei kleineren Kälteanlagen, z. B. im Discounter wiegen die Kostenvorteile bei den Rohrleitungen die Mehrkosten nicht auf [Görner2007].

| Art des Kältesystems | Saugleitung/ Rücklauf | Flüssigkeits-leitung/ Vorlauf | Flächen-verhältnis |
|---|---|---|---|
| Direktverdampfung mit R404A als Kältemittel | 76/102mm | 35mm | 100% |
| Indirekt mit Sole als Kälteträger | 76/140mm | 76/140mm | 337% |
| Indirekt mit $CO_2$ als Kälteträger | 54/118mm | 35/73mm | 166% |
| Direktverdampfung mit $CO_2$ als Kältemittel | 42/68mm | 22/48mm | 60% |

Bild 5.4: Vergleich der Rohrleitungsdurchmesser mit Isolierung für unterschiedliche Kältesysteme (Kälteleistung 100 kW) [Heinbokel2005].

Genaue Angaben zur Energieeffizienz von Verbundanlagen sind schwierig zu treffen, da der Energieverbrauch von vielen Faktoren beeinflusst wird:

- Verlauf der Außenlufttemperatur, dieser unterliegt tageszeitlichen sowie jahreszeitlichen Schwankungen und ist in Nordeuropa anders als in Südeuropa,
- Sonneneinstrahlung auf den Verflüssiger,
- Verschmutzungsgrad des Verflüssigers

- Sonneneinstrahlung in den Verkaufsraum bzw. direkt auf Kühl- oder Tiefkühlmöbel,
- die Lufttemperatur und die Luftfeuchte im Verkaufsraum; diese sind in der Regel im Sommer höher als im Winter,
- die Lastanforderungen im Tagbetrieb sind höher als in der Nacht, gleichzeitig sind die Außenlufttemperaturen am Tag höher als in der Nacht,
- die Bausubstanz des Supermarkts und eine mögliche Klimatisierung beeinflussen die Luftfeuchte und -temperatur,
- der unterschiedliche Abverkauf von Ware,
- die unterschiedlichen Ladenöffnungszeiten – jede Stunde längere Öffnungszeit erhöht den Energieverbrauch um ca. 4 % [Pries2008],
- Beladung der Möbel,
- die Anzahl und Größe der Kühlräume.

Vergleiche sind deshalb in der Regel mit großen Unsicherheiten behaftet. Teilweise zeigt sich sogar beim Vergleich von weitgehend identischen Supermarkt-Kälteanlagen in einer engen geografischen Region, dass deren Schwankungsbreite im Energiebedarf viel größer ist als die Schwankungsbreite, die bei Verwendung unterschiedlicher Modelltechnologien zu erwarten wäre. Bild 5.5 zeigt den Energieverbrauch von 226 Penny-Märkten aus dem Jahr 2001, die alle annähernd identische Kälteanlagen besitzen und annähernd gleich groß sind. Ähnliche Schwankungen finden sich in anderen Veröffentlichungen auch für andere Ladenformate. Bild 5.6 zeigt Messungen an Schweizer Supermärkten [Heinbokel2005].

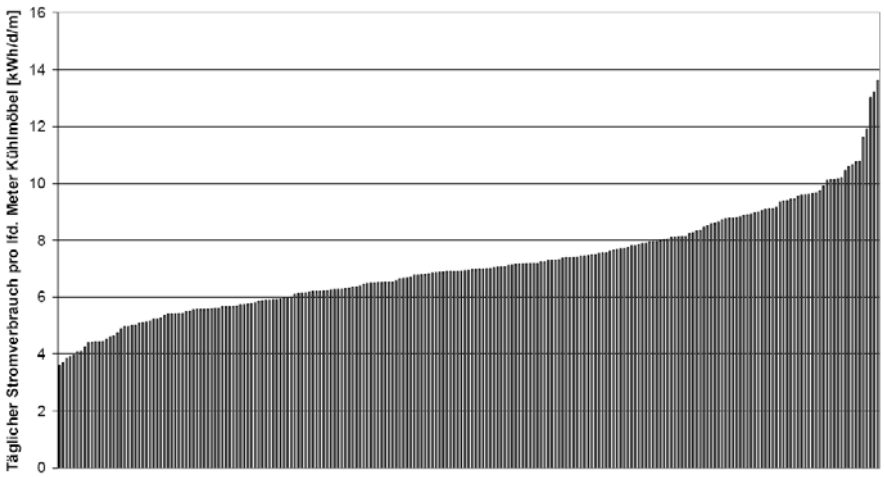



Bild 5.5: Auf laufende Meter Kühlmöbel normierte tägliche Stromverbräuche für die Kälteerzeugung in 226 Penny-Märkten im Jahre 2001 [Ecofys2003].

Bei dem in Bild 5.6 gezeigten Vergleich ist der ermittelte Jahresenergiebedarf auf die Anzahl der vorhandenen Kühlmöbel und -räume bezogen, um die unterschiedlichen Marktinstallationen hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz miteinander vergleichen zu können. Die verschiedenen Kühlmöbel und -räume werden mit entsprechenden Korrekturfaktoren belegt, um deren unterschiedlichen Kältebedarf bezogen auf die „Lauflänge“ (Möbellänge) entsprechend zu bewerten. Dargestellt sind direkte und indirekte Systeme mit dem Kältemittel R404A sowie die Daten eines Pilotmarktes in Wettingen mit R744 [Heinbokel2005].

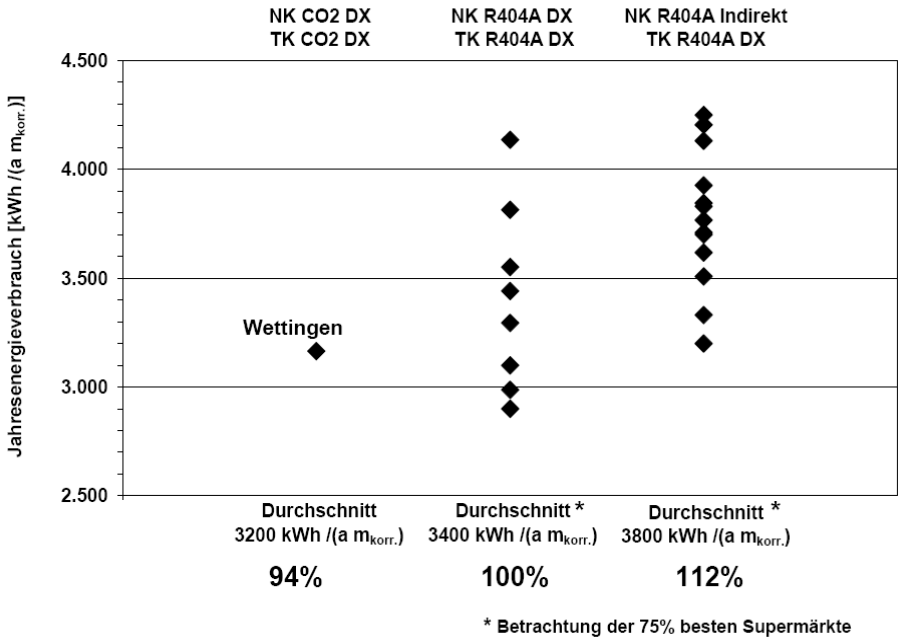



Bild 5.6: Energiebedarf pro Laufmeter Kühlmöbel in Schweizer Supermärkten. Messwerte: COOP Basel, Carrier Kältetechnik Schweiz AG, früher LKS Schweiz AG [Heinbokel2006]

Die Ermittlung des Energieverbrauchs einzelner Kühlmöbel ist jedoch relativ unproblematisch und kann in Anlehnung an Europäische Normen (z. B. DIN EN 441-9) erfolgen. Für die Angabe der Energieeffizienz muss zunächst eine Bezugsgröße (z. B. Inhalt der Kühlmöbel, Ausstellfläche, Meter Kühlregal, Meter Tiefkühltruhe, Verkaufsfläche, Umsatz) definiert werden, deren Wahl das Ergebnis entscheidend beeinflussen kann.

In Zukunft werden für Kälteträgeranlagen Vorteile in Bezug auf Materialkosten erwartet. Ein Kälteträger kann in Kunststoffrohren transportiert werden – für Kältemittel sind Kupfer oder Stahl/Edelstahl-Leitungen erforderlich. Insbesondere der Kupferpreis ist in den vergangenen 5 Jahren stark gestiegen. Eine andere Anlagenbauart, die die Länge der kältemittelführenden Leitungen stark reduziert, sind die so genannten „Distributed Systems“, die in den USA auch als „Hussmann Protocol“ bekannt sind. Bei diesen Anlagen führt ein im Markt installiertes Wassernetz die Verflüssigerwärme der einzelnen Verdichterstationen ab. Die Verdichter (-verbünde) sind in schallgedämmten Kälteaggregaten im Verkaufsraum unmittelbar neben den Verbrauchern angeordnet,

siehe Technologiedatenblätter C15 „Distributed Systems“. Die HFKW-Kältemittelfüllmengen lassen sich durch derartige Systeme um 25 bis 33 % verglichen mit R404A-Direktverdampfungsverbundanlagen senken. Gleichzeitig sinkt der Energieverbrauch bei großen Supermärkten durch reduzierte Saugleitungsverluste um 5 bis 10 % [Garry2007, Walker1999].

In Deutschland wird der Markt für den Neubau von zentralen Verbundanlagen von vier großen überregional tätigen Unternehmen dominiert, die ca. 85 % der Supermarktverbundkälteanlagen bauen. Dies sind in der Reihenfolge des Umsatzes: Carrier UTC (Linde), EPTA (BKT), Hauser und Dresdner Kühlanlagenbau [Bucher2007, Schauer2008]. Es gibt daneben eine ganze Reihe von kleineren Kälteanlagenbauern, die ebenfalls Supermarktkälteanlagen, insbesondere für solche Supermärkte die nicht zu den großen Supermarktketten gehören, bauen und warten, z. T. als Auftragnehmer eines der großen der Branche. In den anderen EU-Ländern gibt es keine vergleichbaren Marktdominanzen [Bucher2007].

## 5.11 Alternative Technologien

Neben den bisher beschriebenen, auf dem Kaltdampfkompressionsprozess basierenden Kälteanlagen gibt es in Forschungsinstituten und Hochschulen Ansätze, alternative Technologien auch für den Supermarktbereich einzusetzen. Zu diesen alternativen Technologien zählen:

- Magnetische Kälteerzeugung
- Pulse tube / Schallwellen
- Peltierelemente
- Kaltluftprozess

Bei der magnetischen Kälteerzeugung wird ein magnetokalorisches Material, z. B. Gadolinium, abwechselnd in ein Magnetfeld gebracht und aus diesem entfernt. Im Magnetfeld erwärmt sich das Material und außerhalb des Magnetfeldes kühlt es sich ab. Forscher prophezeien der magnetischen Kälteerzeugung höhere Wirkungsgrade als die mit einem Kaltdampfkompressionsprozess erzielbaren. Allerdings sind bei den

heutigen magnetokalorischen Materialien nur Temperaturdifferenzen bei der Demagnetisierung von 15 K erreichbar [Warthmann2006].

Bei der Kälteerzeugung mittels Schallwellen (Pulse Tube) handelt es sich um einen Gasprozess. Die Kälteleistungszahlen sind niedriger als diejenigen von Kaltdampfkompressionsanlagen.

Bei Peltierelementen wird direkt mit Hilfe von elektrischem Strom Wärme transportiert. Wird ein aus zwei verschiedenen Leitern oder Halbleitern bestehender Stromkreis von einem elektrischen Strom durchflossen, tritt je nach Stromrichtung eine Abkühlung bzw. Erwärmung der Kontaktstellen auf. An der einen Kontaktstelle wird Wärme aus der Umgebung aufgenommen und an der anderen abgegeben. Peltierelemente werden heute z. B. in Kühltaschen für die Verwendung in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Die Kälteleistungszahl derartiger Peltierelemente fällt sehr stark mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen warmem und kaltem Ende. Bei 5 K Temperaturdifferenz betragen die Kälteleistungszahlen heutiger Peltierelemente aus Halbleitern ungefähr 10, fallen jedoch bei 10 K Temperaturdifferenz bereits auf Werte unter 1 [Radermacher2007]. Denkbar wäre demnach der Einsatz von Peltierelementen zur Flüssigkeitsunterkühlung nach dem Verflüssiger oder zur Verbesserung des Lamellenwirkungsgrades an Luft-Kältemittel-Wärmeüberträgern [Radermacher2007].

Der Kaltluftprozess basiert auf dem Verdichten von Luft. Die verdichtete Luft ist wärmer als vor der Verdichtung, wird abgekühlt und in einer Arbeitsmaschine entspannt. Diese Entspannungsmaschine kann z. B. eine Strömungsmaschine sein wie in einem Abgasturbolader. Die bei der Entspannung gewonnene Arbeit kann dem Verdichter zugeführt werden. Derartige Kaltluftkälteanlagen arbeiten in fast allen heutigen Verkehrsflugzeugen, da sie leichter sind als vergleichbare Kaltdampfkompressions-kälteanlagen und weil in Triebwerken von Düsenflugzeugen sowieso große Mengen von verdichteter Luft erzeugt werden.

Der Kaltluftprozess wird allerdings erst bei Temperaturen unterhalb von ca. -30 °C energetisch im Vergleich zum Kaltdampfprozess interessant [Kauffeld1993]. Er würde sich von daher im Supermarkt hauptsächlich für die Tiefkühlung eignen. Der große Vorteil einer Kaltluftkälteanlage ist, dass das Kältemittel (Luft) überall in ausreichenden

Mengen kostenlos zur Verfügung steht und weder brennbar, noch giftig oder umweltschädlich ist.

Zurzeit ist keine der hier beschriebenen alternativen Technologien als echte Alternative für zukünftige Supermarktkälteanlagen anzusehen.

# 6. Möglichkeiten der Energieeinsparung

Tiefkühl- und Gefriergeräte für den privaten Haushalt sind seit Anfang der 1990er Jahre um über 30 % energieeffizienter geworden. Bei gewerblichen Kühl- und Gefriergeräten und –anlagen ist eine ähnliche Entwicklung noch nicht zu beobachten [LZD2005]. Dabei sind Kühl-/Gefriermöbel die wesentlichen Stromverbraucher im Supermarkt mit einem Anteil von 40 bis 60 % [BEK2007a] der durchschnittlich 500 kWh/($m^2$ a) für einen Supermarkt mit mehr als 2000 $m^2$ Verkaufsfläche [Manz2008]. Tabelle 6.1 zeigt eine typische Verteilung des elektrischen Energieverbrauchs in einem deutschen Supermarkt [BEK2007a]. Insgesamt werden vom deutschen LEH für die Kälteanwendungen 24 Mrd. kWh pro Jahr verbraucht [Jakobs2006]. Die Kälteanlage verbraucht in einem deutschen Discounter ca. 0,6 kWh/$m^2$ Verkaufsfläche am Tag [Jakobs2007]. Für große kanadische Supermärkte gibt Minea 1,37 kWh/$m^2$ Verkaufsfläche am Tag an [Minea2007]. Wobei ein Teil des Unterschieds sicherlich in den längeren Ladenöffnungszeiten in Nordamerika begründet ist. Ein deutscher Einzelhändler rechnet bei den bisherigen Ladenöffnungszeiten in Deutschland von 8 bis 20 Uhr von Montag bis Samstag mit einem Mehrverbrauch an elektrischer Energie von 3,5 % pro Stunde längerer Ladenöffnung [Schmidt2007b].

Tabelle 6.1: Typischer Verbrauch an elektrischer Energie in einem deutschen Supermarkt [BEK2007a].

| **Kühlung** | **48**% |
|---|---|
| Beleuchtung | 26% |
| Bürogeräte | 11% |
| Elektr. Kleingeräte | 9% |
| Kraft | 6% |

Bild 6.1 zeigt die typischen Kosten für die verschiedenen Energieverbraucher eines Supermarktes. Die Kosten für den Energieverbrauch können höher sein als der Gewinn, den der Supermarkt abwirft - typischerweise 1,2 % vom Umsatz. Dennoch werden die Kälteanlagen allein auf Grund der Investitionskosten ausgewählt [Faramarzi2004].

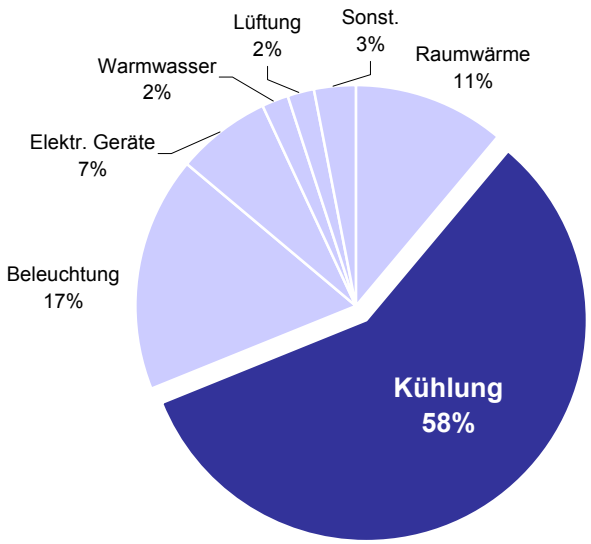



Bild 6.1: Energiekosten im deutschen Lebensmitteleinzelhandel [KBW1996].

In Bezug auf den Beitrag eines Supermarktes zum Treibhauseffekt sind Energieeinsparungen wichtig, da je nach Kältemittel, Leckagerate und Kälteanlage der Anteil am Treibhauseffekt für Energiebedarf zwischen 50 und 80 % (R404A

Verbundanlage [IPCC/TEAP2005]) und nahezu 100 % (R290 steckerfertige Tiefkühltruhe oder R744 Verbundanlage) schwankt.

Initiativen zum Energiesparen in Supermarktkälteanlagen gibt es sehr viele, insbesondere von den verschiedenen Energieversorgern. Darüber hinaus gibt es ein EU-Projekt, welches die Weiterentwicklung von energieeffizienten steckerfertigen Kühl- und Tiefkühlgeräten für den gewerblichen Anwendungsbereich unterstützt: ProCool ist ein internationales, im Rahmen des Förderprogramms LIFE der Europäischen Kommission unterstütztes Projekt. ProCool zielt auf die Entwicklung marktgerechter, qualitativ hochwertiger Geräte für den Getränke- und Lebensmittelhandel, die zugleich energieeffizient und umweltfreundlich sind. Im Zentrum des Projektes steht ein Wettbewerb, der Herstellern die Möglichkeit bietet, sich als Entwickler innovativer und umweltfreundlicher Geräte zu präsentieren. Nutzer von Kühl- und Tiefkühlgeräten können sich ebenfalls am Projekt beteiligen und von der in Entwicklung befindlichen Informations- und Präsentationsplattform profitieren. ProCool wird in Österreich von der Österreichischen Energieagentur und dem Verein für Konsumenteninformation abgewickelt. In Deutschland sind die Deutsche Energie-Agentur und das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie für das Projekt zuständig.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Möglichkeiten der Energieeinsparung lassen sich zum Großteil auf alle oben beschriebenen Modelltechnologien anwenden. Es werden die folgenden Möglichkeiten zur Energieeinsparung beschrieben:

- Auslegung / Installation
    - Glasdeckel / Glastüren
    - Lüftermotor außerhalb des Gerätes
    - Verbesserter Verdampfer-Lüfter und/oder -Lüftermotor
    - Verbesserte Luftströmung in offenen Kühlregalen
    - Infrarot reflektierende Schirme oder Baldachine
    - Kantenheizung / Taupunktregelung
    - Siphon im Tauwasserablauf der Kühlmöbel
    - Heißgasabtauung
    - Drehzahlregelung von Verdichter, Pumpe, Ventilator
    - Zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung

  - Verbesserte Expansionsventile
  - Expansionsmaschinen
  - Verbesserte Verdampfer
  - Überflutete Verdampfer
  - Bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer
  - Verbesserte Beleuchtung
  - Absenkung der Verflüssigertemperatur
    - Anpassung der Verflüssigungs- an die Außenlufttemperatur
    - Verdunstungskühlung des Verflüssigers
    - Wärmeabgabe an das Erdreich
    - Flüssigkeitsunterkühler
  - Innerer Wärmeaustausch
  - Freie Kühlung
  - Wärmerückgewinnung
  - Kältespeicher
  - Intelligente Anlagenregelung unter Einbeziehung einer Vielzahl der vorgenannten Maßnahmen
- Betrieb
  - Korrektes Befüllen der Kühl-/Gefriermöbel.
  - Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum
  - Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger

## 6.1 Glasdeckel / Glastüren

Southern California Edison gibt für ein offenes Kühlregal die zu erzielende Reduzierung der Kühllast durch Nachtrollos zu 13 % an. Bei der Untersuchung wurde ein typisches amerikanisches Kühlregal für Fleischwaren in der Zeit von 0 Uhr bis 6 Uhr mit einem Aluminiumrollo verschlossen [Faramarzi2004]. Der Einsatz von Glastüren, die dann den ganzen Tag über geschlossen sind und nur von den Kunden zur Warenentnahme geöffnet werden, führt Faramarzi zu Folge zu einer 68 %-igen Reduzierung der Kühllast [Faramarzi2004]. Auch hier war der Supermarkt von 6 bis 24 Uhr geöffnet. Der Vergleich bezieht sich auf ein Kühlregal ohne Nachtrollo. Bei den meisten deutschen Supermärken sind bereits automatische Nachtrollos installiert.

Neue Märkte werden nach Auskunft der Firma Linde nur noch mit Nachtrollos ausgeführt. Hier ließe sich also nur durch den Übergang zu ganztägig angebrachten Glastüren Energie sparen. Die Energieeinsparung läge bei ca. 40 % für Glasdeckel auf TK-Truhen und ca. 70 % für Glastüren an NK-Regalen [Brouwers2007 und Kröger2007a]. Die Glastüren/-deckel sollten nach Möglichkeit mit einer dünnen Metallschicht bedampft sein, welche Wärmestrahlung (Infrarot Strahlung) wirkungsvoll reflektiert. Dies kann den Energieverbrauch nochmals senken [Quack2007]. Wenn es sich bei den umzurüstenden Kühlregalen um Kühlregale mit Nachtrollo und optimierter Luftströmung, z. B. in Form von CFD-Simulationen, handelt, wird die zu erzielende Energieeinsparung vermutlich niedriger ausfallen. Energieeinsparungen im Bereich von 25 bis 40 % dürften aber dennoch realisierbar sein. Eine deutsche Einzelhandelskette berichtet von einer Halbierung des Energieverbrauchs der 5 m langen Fleischwandkühlregale durch den Einsatz von Glastüren [Schmidt2007b].

Messungen der Firma KWN an einem Cash und Carry Markt in Österreich haben für offene Kühlregale mit Nachtrollos nach Umrüstung auf entsprechend beschichtete Glastüren eine Energieeinsparung von 86 % ergeben [KWN2004]. Verglichen wurde die Kühllast der offenen Regale mit denen derselben, jedoch mit einer Glasschiebetür nachgerüsteten Regale. Während des Nachtbetriebs dürften die Kühlregale mit Glastüren ebenfalls weniger Energie verbrauchen als solche mit Aluminiumnachtrollo, da die Glastüren mit Isolierverglasung ausgestattet sind. Die Wärmeleitfähigkeit des Standardisolierglases beträgt ca. 2,64 W/($m^2$ K), speziell beschichtetes Energieglas liegt bei ca. 1,28 W/($m^2$ K) [Kauffeld2000].

Neben der reduzierten Kühllast ergibt sich auch ein reduzierter Energieverbrauch für die Abtauung, da weniger feuchte Raumluft in das Kühlmöbel gelangt. Durch Glasdeckel oder Glastüren wird der Energiebedarf für die Abtauung bis zu 35 % reduziert [Enova2006].

Unterschiede bei den durch Glastüren erzielbaren Energieeinsparungen können sich z. B. dadurch ergeben, dass einige Quellen Messungen an geschlossenen Türen angeben, während sich andere auf Messungen bei Türöffnungen beziehen. So führt eine Türöffnung alle 100 Sekunden zu einem Energiemehrverbrauch bei einem TK-Regal von 28 % [Li2007].

Als Nachteil wurden in allen Gesprächen mit Supermarktbetreibern immer befürchtete Umsatzeinbußen angeführt. Untersuchungen zum Einfluss von Glastüren auf den Umsatz eines Marktes sind keine bekannt. Marktbetreiber von einzelnen umgerüsteten Märkten konnten keine Unsatzeinbußen feststellen. Die Lufttemperatur im Gang vor den Kühlregalen ist bei Kühlregalen mit Glastüren höher als bei solchen mit offenen Kühlregalen. Aus den USA wird berichtet, dass die Kunden durch angenehmeren Temperaturen vor den Kühlregalen mit Glastüren länger in den entsprechenden Gängen verweilen, und deshalb bei Glastüren der Umsatz steigt [Artwohl2008].

In einigen Ländern ist die Verwendung von Glastüren bzw. Glasdeckeln gesetzlich vorgeschrieben. So müssen z. B. in der Schweiz mindestens 90 % aller Tiefkühltruhen eines Marktes mit Glasdeckeln versehen werden [Minergie2007]. Bei Tiefkühltruhen ist auf Grund des geringeren Luftaustausches mit der Umgebung die Energieeinsparung durch den Einsatz von Glasdeckeln jedoch nicht so ausgeprägt wie beim Einsatz von Glastüren bei Kühlregalen. In einem nichtklimatisierten Verbrauchermarkt wurden 30 % Energieeinsparungen im Bereich der Tiefkühlung durch Einsatz von Glasdeckeln ermittelt [Post2007]. Die Glasdeckel auf den TK-Truhen haben dabei nicht zu einem Umsatzrückgang geführt [Post2007]. In den Niederlanden sind im Stadtgebiet von Amsterdam in allen Supermärkten bis 31. Dezember 2009 an mindestens 90 % der Gesamtlänge aller TK-Truhen und an allen Kühlregalen, bzw. an 90 % der Gesamtlänge aller Kühlregale, wenn diese mehr als 90 % der innerhalb des Marktes befindlichen Kühlmöbel ausmachen, Tagabdeckungen nachzurüsten [Amsterdam2007].

Die Temperaturverteilung in Regalen mit Glastüren ist gleichmäßiger und die Warentemperaturen lassen sich in einem engeren Temperaturbereich kontrollieren. Deshalb wurden z. B. in 1.500 Märkten eines deutschen Discounters an den Frischfleischkühlregalen Glastüren nachgerüstet [Sturm2008].

Auch bei Glastüren gibt es große energetische Unterschiede. Standardtüren erfordern zur Vermeidung eines Beschlagens eine Glas- sowie evtl. Kantenheizung. Neuere Entwicklungen kommen durch entsprechende Oberflächenbeschichtungen völlig ohne Glasheizung [Sturm2008] und z. T. sogar auch ohne Kantenheizung aus

[Artwohl2008]. So lassen sich pro Fullsize-Tür (180 bzw. 190 cm hoch) gegenüber beheizten Türen bis zu 200 W Energie sparen [Sturm2008]. Die Energieersparnis setzt sich aus der nicht benötigten elektrischen Heizenergie sowie der dadurch verminderten Kühllast im Kühlregal und dem deshalb reduzierten Energiebedarf der Kälteanlage zusammen.

## 6.2 Lüftermotor außerhalb des Gerätes

Traditionell wird der Lüftermotor des Verdampfers im gekühlten Teil des Verkaufsmöbels angebracht. Die gesamte vom Motor aufgenommene elektrische Leistung wird damit an den vom Verdampfer zu kühlenden Luftstrom abgegeben. Wird der Lüftermotor außerhalb des zu kühlenden Teils des Verkaufsmöbels platziert, wird der zu kühlenden Luft nur der bedeutend kleinere Teil der eigentlichen Ventilatorleistung zugeführt und die Kühllast sinkt dementsprechend.

## 6.3 Verbesserter Verdampfer-Lüfter und/oder -Lüftermotor

Bei Verbundanlagen benötigen Verdampferventilatoren ca. 6 % der insgesamt für die Kühlung aufgewendeten Energie [BEK2007b]. Durch den Einsatz von energiesparenden Motoren und durch aerodynamische Optimierung der Ventilatorschaufeln kann der Energieverbrauch für die Ventilatoren gesenkt werden. Gleichzeitig reduziert sich der Energieverbrauch der Kälteanlage, da diese weniger Wärme abführen muss.

In einem dänischen Entwicklungsprojekt wurden in einem Flaschenkühler effektive Gleichstrommotoren eingesetzt. Der Energieverbrauch des Flaschenkühlers konnte dadurch um ca. 10 % reduziert werden [Kauffeld2000].

Der Hersteller von Ventilatoren, Motoren und Steuer- und Regeleinrichtungen, ebm-papst, hat 2005 einen Industriepreis gewonnen. Die neuen energiesparenden Motoren (ESM) und EC-Ventilatoren der Firma sind mit dem Preis für das „Umweltfreundlichste Produkt des Jahres“ des „Refrigeration and Air Conditioning Magazine“ in England ausgezeichnet worden. Die Jury war sich einig, dass der vom Supermarktriesen ASDA gesponserte Preis an das Unternehmen aus Mulfingen verliehen werden solle, da dessen EC-Motoren und Ventilatoren neue Wege in der Energieeffizienz

eingeschlagen haben, die erhebliche Kostenvorteile für den Endkunden und einen positiven Beitrag zur Umwelt mit sich bringen [ki Produktnews 22.5.2005]. Die Lüfter verbrauchen ca. 70 % weniger Energie als herkömmliche Lüfter [Goetjes2007].

## 6.4 Verbesserter Verdichter

Insbesondere bei steckerfertigen Geräten mit ihren verhältnismäßig kleinen hermetischen Verdichtern, bieten sich noch zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten an. Messungen an einer steckerfertigen TK-Truhe ergaben einen um 9,5 % reduzierten Energieverbrauch, analoge Messungen an einem NK-Kühlregal eine Energieverbrauchsreduzierung um 17 % [Salem2007].

## 6.5 Verbesserte Luftströmung in offenen Kühlregalen

Bis zu 80 % der Kühllast eines offenen Kühlregals können aus Luftaustausch mit dem Verkaufsraum kommen [SCE2007]. Durch entsprechende Messverfahren (DPIV – Digital Particle Image Velocimetry) [Foster2007] und moderne Strömungssimulationsmethoden (CFD – Computerised Fluid Dynamics) lässt sich die Luftströmung so optimieren, dass der Austausch mit der Raumluft minimiert wird. Gänzlich reduzieren lässt er sich jedoch nur durch den Einsatz von Glastüren, siehe 6.1.

Die Optimierung eines offenen Kühlregals für Frischfleisch brachte ca. 6 % geringeren Energieverbrauch bei gleichzeitig verbesserter Temperaturkonstanz und –varianz [Schuster2007].

## 6.6 Infrarot reflektierende Schirme oder Baldachine

Bild 6.2. zeigt, dass ca. 15 % der Kühllast in einem offenen Kühlregal Strahlungswärme aus der Umgebung sind [Johansen2006]. Bei offenen Kühltruhen dürfte dieser Anteil noch größer sein. Infrarot reflektierende Schirme oder Baldachine können die Wärmestrahlung wirksam abschirmen und damit reduzieren.

Die Temperatur von in Klarsichtfolien eingepackten Waren wird durch eine Abschirmung von Strahlung reduziert. Die Klarsichtfolien lassen kurzwellige

Lichtstrahlung in die Verpackung hinein, langwellige Wärmestrahlung der Ware jedoch nicht wieder hinaus [Kaufmann1994].

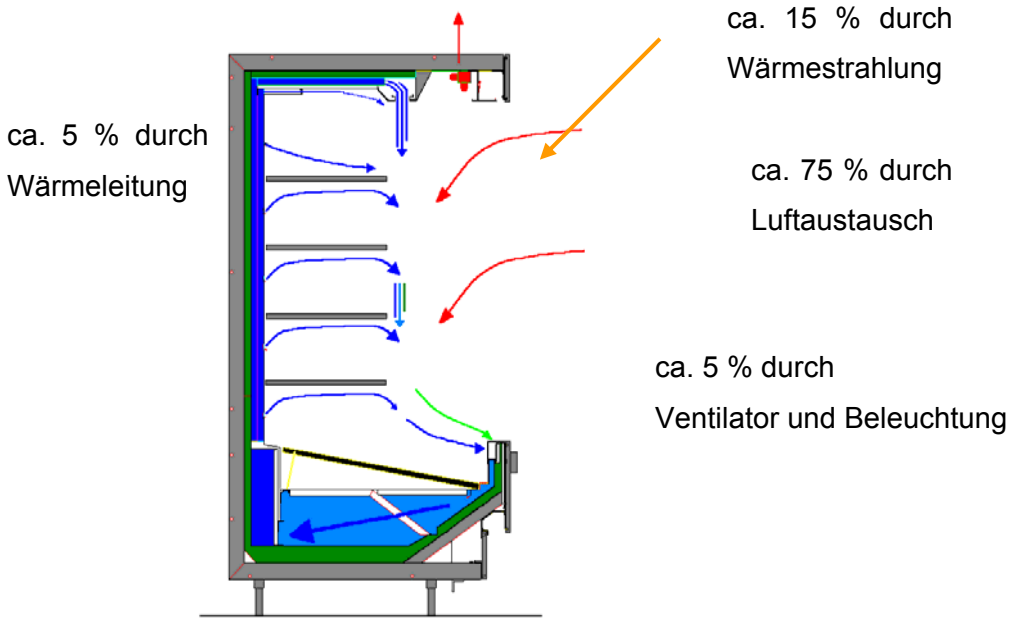



**Bild 6.2:** Anteilige Kühllast bei einem offenen Kühlregal [Johansen2006].

## 6.7 Kantenheizung / Taupunktregelung

Insbesondere bei Gefriertruhen werden zum Teil Kantenheizungen eingesetzt. Dadurch wird zum einen die Kondensation von Luftfeuchtigkeit vermieden und zum anderen bei Kontakt des Kunden mit dem Kühlmöbel durch eine erhöhte Kantentemperatur dessen Behaglichkeit gesteigert. Die Kantenheizung wird in der Regel elektrisch ausgeführt. Der Energieverbrauch für die Kantenheizung beträgt zwischen 8 und 18 % der gesamten in einem Supermarkt für die Kälte umgesetzten Energie [BEK2007b]. Ein Teil der Wärme der Kantenheizung wird über die Wand in das Gefriermöbel geleitet und muss dort vom Verdampfer zusätzlich abgeführt werden. Faramarzi beziffert die mögliche Reduzierung der Kälteleistung durch eine bedarfsgerechte Regelung der Kantenheizung mit 5 % [Faramarzi2004]. Bedarfsgerecht heißt, dass die Oberflächentemperatur der aktuellen Taupunkttemperatur der Raumluft angepasst wird.

## 6.8 Siphon im Tauwasserablauf der Kühlmöbel

Die meisten Kühlmöbel sind mit einem Wasserablauf versehen, über den anfallendes Kondensat abfließen kann. Ohne entsprechenden Siphon kann es über dieses Rohr zu einem Luftaustausch und damit erhöhter Kühllast für das Möbel kommen [Johansen2006].

## 6.9 Heißgasabtauung

Luftkühler (Verdampfer und solche mit Kälteträger), die Oberflächentemperaturen unter 0 °C aufweisen, gefrieren auf ihrer Luftseite Wasser der Luft. Dieser Reif muss in regelmäßigen Abständen oder energetisch besser, bedarfsgeregelt, abgetaut werden. Folgende Verfahren sind möglich:
Umluftabtauung (nur im Normalkühlbereich)
Elektroabtauung
Heißgas- bzw. Warmsoleabtauung mittels Abwärme der Kälteanlage.

Für alle Kälteverbraucher mit Temperaturen über +2 °C ist die wirtschaftlichste Methode die Umluftabtauung. Für Fleischkühlmöbel und -räume sowie im gesamten Tiefkühlbereich kommen nur Elektro- oder Heißgas- bzw. Warmsoleabtauung in Frage. Bei der Elektroabtauung werden die Verbraucher gruppenweise zeitlich versetzt abgetaut, um unerwünschte Stromspitzen zu vermeiden. Für Kälteträgeranlagen haben Messungen gezeigt, dass durch die notwendige Erwärmung der Sole in den Kühlmöbeln die Abtaudauer gegenüber Direktverdampfung um 10 bis 20 % ansteigt [Haaf1998].

Die Elektroabtauung ist besonders einfach zu realisieren allerdings energetisch sehr schlecht, da zum einen elektrisch geheizt wird und zum anderen hinterher die entstandene Wärme mit Hilfe der Kälteanlage wieder entfernt werden muss. Energetisch deutlich besser ist die Nutzung der warmen Seite der Kälteanlage für die Abtauung. In der Regel verwendet man hier Heißgas nach dem Verdichter und leitet dieses „rückwärts“ durch den abzutauenden Verdampfer.

Bei Kälteträgeranlagen wird anstelle von Heißgas in der Regel die bei der Unterkühlung des Kältemittels nach dem Verflüssiger anfallende Wärme zum Erwärmen des Kälteträgers verwendet. Dadurch ist die Temperatur des Kälteträgers hoch genug, um das Eis an den Kühleroberflächen zügig abzuschmelzen und niedrig genug, um den Korrosionsschutz des Kälteträgers nicht zu schädigen. Typische Temperaturen für den zur Abtauung verwendeten Kälteträger liegen bei 22 bis 25 °C [Kaltenbrunner2007].

Bei Warmsoleabtauung sind zwei verschiedene Methoden möglich:

a) Sektionsweises Abtauen einzelner Verbrauchergruppen mittels gespeicherter Warmsole von +30 bis +40 °C.
b) Erwärmung des gesamten Solenetzes auf eine Temperatur von ca. +5 °C mit gleichzeitiger Abtauung sämtlicher Verbraucher und anschließender Wiederabkühlung des Solenetzes.

Methode a) ist energetisch günstig und bewirkt kurze Abtauzeiten, erfordert jedoch einen beträchtlichen Mehraufwand insbesondere an Schaltarmaturen. Bei der Methode b) hängt die Abtaudauer und der für die Wiederabkühlung der Sole erforderliche Energieaufwand von der Gesamtlänge der Rohrleitungen ab. Berechnungen wie Messungen an einer indirekten R717-Anlage haben jedoch gezeigt, dass dieses Verfahren energetisch ebenfalls günstiger ist als die Elektroabtauung und dass auch hiermit akzeptable Abtauzeiten erreicht werden können [Haaf1998].

Bei R744-TK-Kaskadenkälteanlagen lohnt sich der Einsatz einer Heißgasabtauung nicht. Die Gastemperaturen am Verdichteraustritt der R744 TK-Stufe sind sehr viel niedriger als bei herkömmlichen R404A-Anlagen. Eine Heißgasabtauung mit R744 dauert deshalb bei einer R744-TK-Kaskadenkälteanlage sehr viel länger und braucht bis zu 20 % mehr Energie als eine elektrische Abtauung [Sawalha2007].

## 6.10 Drehzahlregelung von Verdichter, Pumpe, Ventilator

Durch Drehzahlregelung des Verdichters kann die Kälteleistung der Kälteanlage stufenlos an den Bedarf angepasst werden. Dabei reduziert sich die Antriebsleistung stärker als die Kälteleistung, weil sich bei gleichbleibenden Wärmeübertragungsflächen

an Verdampfer und Verflüssiger geringere Temperaturdifferenzen einstellen, die das Druckverhältnis am Verdichter verringern und damit die spezifische Kälteleistungszahl verbessern [Adolph1999]. Außerdem wird der Vereisungsgrad der Verdampfer reduziert und es ergeben sich längere Abtauintervalle [Bouchareb2003]. Darüber hinaus wird die Qualität des Kühlgutes durch geringeren Feuchteverlust verbessert, da Temperaturschwankungen reduziert werden und eine höhere und konstantere Luftfeuchte erzielt wird [Bouchareb2003]. Die Drehzahlregelung ist jedoch nach unten begrenzt durch zunehmende Ungleichförmigkeit (Hubkolbenverdichter), Ölversorgung und zunehmende Leckageverluste (Schraubenverdichter und z. T. auch Scrollverdichter) [Adolph1999].

Eine Drehzahlregelung des Verdichters bringt je nach Anlage bzw. Gerät 12 bis 18 % Energieeinsparung [Jürgensen2004, Sieber2006, Zeller2006]. Bouchareb et al. geben für Verbundanlagen sogar Energieeinsparungen von 16 bis 25 % an [Bouchareb2003]. Die Mehrkosten betragen bei Verbundanlagen ca. 1 % der Installationskosten [Sieber2006].

Früher (bis Mitte der 1990er Jahre) war die elektronische Verdichterdrehzahlregelung relativ teuer. Eine zumindest stufenweise Leistungsanpassung erfolgte deshalb über das An- und Abschalten einzelner Verdichter bzw. Zylinder in einem Verdichter. Toscano et al. haben gezeigt, dass mit einer 1 : 2 : 4-Stufung der Verdichter je nach Kältemittel, untersucht wurden R502 und R12, rechnerisch eine jährliche Einsparung von 15 % (R502) bis 26 % (R12) erwartet werden kann [Toscano1982]. Messungen an einem Laborsupermarkt ergaben für R12 Energieeinsparungen von 10 bis 12,5 %. Verglichen wurde die Anlage mit einer Anlage gleicher Kälteleistung mit drei gleichgroßen parallelen Verdichtern.

Heutzutage befinden sich elektronische Drehzahlregler für Verdichter in einem Preisbereich, der durch die Möglichkeit des Überdrehzahlbetriebs (60 Hz für Kolbenverdichter bzw. 75 Hz für Schraubenverdichter statt 50 Hz) und die damit mögliche Reduzierung der Gesamtzahl an Verdichtern im Verbund eine kostenneutrale Installation von elektronischen Drehzahlreglern bei Verbundanlagen ermöglicht [Bouchareb2003].

Auch bei den Pumpen von Kälteträgeranlagen oder dem evtl. vorhandenen Wasser- bzw. Glykolkreislauf auf der Verflüssigerseite lassen sich durch Drehzahlregelung der Pumpen Energie sparen. Für Kälteträgeranlagen sind keine Messungen bekannt. Für den Wasserkreislauf einer Heizungsanlage eines Einfamilienhauses gibt die Stiftung Warentest Energieeinsparungen von 50 bis 65 % durch bedarfsgesteuerte Drehzahlregelung an [test2007].

Bedarfsgerechte Drehzahlregelung der Lüfter von Verflüssigern und Verdampfern kann Energie sparen. Bei Walmart läuft im Zeitraum 2006 bis 2008 in zwei Supermärkten in USA ein entsprechender Test [MacDonald2007, Deru2007].

## 6.11 Zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung

Insbesondere für TK-Anlagen bietet sich eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung an. Mit einer derartigen Verdichtung lassen sich in einem TK/NK-Verbund ca. 6 % Energie einsparen [Zeller2006]. Bei einigen Anlagen, z. B. R744-Verbundanlagen wird die zweistufige Verdichtung auch eingesetzt um die Verdichtungsendtemperaturen unter den maximal zulässigen Werten zu halten, da es bei zu hohen Verdichtungsendtemperaturen z. B. zu Ölverkokungen im Verdichter kommen kann.

## 6.12 Verbesserte Expansionsventile

Thermostatische Expansionsventile, wie sie normalerweise für Direktverdampfungsanlagen eingesetzt werden, arbeiten mit einer linearen Regelcharakteristik. Dadurch ist der Überhitzungsanteil im Verdampfer insbesondere bei hoher und niedriger Kühllast evtl. unnötig groß mit der sich daraus ergebenden schlechteren Ausnutzung des Verdampfers, siehe auch 6.15 Überflutete Verdampfer. Elektronische Expansionsventile erlauben eine automatische adaptive Anpassung der Regelcharakteristik während des Betriebes. Eine Vernetzung aller elektronischen Expansionsventile und antisynchrone Regelung, d. h. Vermeidung von Lastspitzen wie sie bei gleichzeitigem Öffnen vieler Ventile entstehen können, verlängert dabei die Verdichterlebensdauer und kann den Energieverbrauch senken [Larsen2007].

Außerdem benötigen thermostatische Expansionsventile eine bestimmte Mindestdruckdifferenz zur Einhaltung der geforderten Kälteleistung. Elektronische Expansionsventile können mit deutlich niedrigerer Druckdifferenz arbeiten und erlauben dadurch eine Absenkung der Verflüssigungstemperatur [Bobbo2005], siehe 6.18 Absenkung der Verflüssigertemperatur. Allerdings reduziert sich dadurch die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung, siehe 6.20 Wärmerückgewinnung. In einem großen (4.430 $m^2$ Verkaufsfläche) italienischen Supermarkt (Mailand) konnten durch den Einsatz von elektronischen Expansionsventilen in den NK- und TK-Verdampfern je nach Jahreszeit zwischen 20 (Sommer) und 35 % (Winter) Energie im Vergleich zu einem vergleichbaren Supermarkt mit thermostatischen Expansionsventilen erzielt werden [Bobbo2005]. Dabei war die Energieeinsparung bei den NK-Verdampfern etwa 6 % größer als bei den TK-Verdampfern [Bobbo2005].

Elektronische Expansionsventile erlauben darüber hinaus eine bedarfsgerechte Anhebung der Verdampfungstemperatur. Werden bei der Regelung der elektronischen Expansionsventile noch der jeweilige lastabhängige Saugvolumenstrom und die damit verbundenen Druckverluste berücksichtigt, können ca. 4 % Energie eingespart werden [Zeller2006].

Für thermostatische Expansionsventile kann ein Zweidüsenmodell, eine Düse für Pulldown[1] und eine kleinere Düse für den normalen Betrieb, zu Energieeinsparungen führen. Faramarzi gibt eine um 2 Kelvin kleinere Überhitzung mit einer kleineren Düse an [Faramarzi2004]. Auch der Einsatz von internen Wärmeüberträgern (Sauggasüberhitzern) je Kühlstelle erlaubt eine deutlich kleinere Überhitzung mit thermostatischen Expansionsventilen [Schaller2008]. Optimal ausgewählte und eingestellte thermostatische Expansionsventile können so bis zu minimalen Verflüssigungstemperaturen von 15 bis 18 °C betrieben werden [Schaller2008]. Der energetische Vorteil zwischen elektronischen und thermostatischen Expansionsventilen reduziert sich so auf ca. 4 bis 6 % [Schaller2008].

[1] Mit „Pulldown“ wird die erstmalige Abkühlung in der Regel von Raumtemperatur auf Betriebstemperatur bezeichnet.

## 6.13 Expansionsmaschine

Anstatt in einem Expansionsventil kann man die Druckreduzierung in einer Kälteanlage auch in einer Expansionsmaschine durchführen. Es kann damit bei der Entspannung Arbeit gewonnen werden. Gleichzeitig erhöht sich die Kälteleistung, da bei der Entspannung in einer Expansionsmaschine weniger Dampf erzeugt wird und der Dampfgehalt nach der Entspannungsmaschine niedriger ist als nach einem Expansionsventil. Bisher gibt es keine serienmäßig hergestellten Expansionsmaschinen. Auch ist der Nutzen in Bezug auf den Aufwand, d. h. die Verbesserung der Kälteleistungszahl im Vergleich zu der zusätzlich erforderlichen Expansionsmaschine bei herkömmlichen Kältemitteln eher klein, in der Größenordnung von 8 bis 10 %. Bei transkritischen R744-Kälteanlagen sieht dies jedoch ganz anders aus und die Kälteleistungszahl kann mit einer Expansionsmaschine um bis zu 40 % zunehmen und der Energieverbrauch entsprechend abnehmen [Quack2004]. Bei unterkritischem Betrieb der R744-Kälteanlage, z. B. im Winter, ist der Gewinn durch Einsatz eines Expanders immer noch ca. 15 %, so dass sich im Jahresmittel unter Schweizer Klimabedingungen ca. 20 % Energieeinsparungen ergeben würden [Quack2007]. Entsprechende Expansionsmaschinen für R744 sind in der Entwicklung, jedoch (noch) nicht serienmäßig verfügbar.

Eine andere Art der Expansionsmaschine stellen Dampfstrahlverdichter dar. Mit dieser Kombination aus Expansionsorgan und Verdichter lässt sich z. B. die Kälteleistungszahl eines transkritischen R744-Kreislaufs um 7 % verbessern, die Kälteleistung nimmt gleichzeitig um 8 % zu [Elbel2007]. Andere Forscher berichten sogar von 20 bis 30 % größerer Kälteleistungszahl bei Einsatz eines Dampfstrahlverdichters in einer transkritischen R744-NK-Kälteanlage [Boulawz2007].

## 6.14 Verbesserte Verdampfer

Durch verbesserte Verdampfer kann die Verdampfungstemperatur höher gewählt werden, da durch den besseren Wärmeüberträger eine kleinere Temperaturdifferenz zur Übertragung der gleichen Kälteleistung erforderlich ist. Bei Kühlmöbeln kann eine höhere Verdampfertemperatur dazu führen, dass die Kühlmöbel nicht mehr oder nur

noch sehr wenig abgetaut werden müssen. Faramarzi berichtet von 3,3 K höheren Verdampfertemperaturen bei einem optimierten Verdampfer mit einem um 68 % höheren k·A-Wert [Faramarzi2004]. Jedes Kelvin höhere Verdampfungstemperatur reduziert den Energieverbrauch um ca. 3 % [Bouchareb2003 und Johansen2006]. Verbesserte Verdampfer sind z. B. in zwei Wal-Mart Supermärkten eingebaut; Ergebnisse werden für 2008 angekündigt [MacDonald2007].

Die durch eine Verbesserung des Verdampfers durch größere Flächen bzw. verbesserten Wärmeübergang erzielbare Energieeinsparung wird durch die vom Expansionsventil eingestellte und u. a. für einen sicheren Betrieb des Verdichters notwendige Überhitzung begrenzt. Durch die Verlagerung der Überhitzung in einen dem Verdampfer nachgeschalteten inneren Wärmeüberträger kann die Verdampfungstemperatur weiter angehoben werden. Idealerweise soll am Verdampferaustritt noch 2 bis 5 % flüssiges Kältemittel vorhanden sein [Tambovtsev2007]. Um ein stabiles Regelverhalten zu erzielen wird von Tambovtsev eine Gleichstromführung von den Verdampfer verlassendem und zu überhitzendem Kältemitteldampf und den Verflüssiger verlassendem zu unterkühlendem Kältemittelkondensat vorgeschlagen [Tambovtsev2007]. Die Verdampfungstemperatur ließ sich so um 2 K anheben was zu einer Energieeinsparung von ca. 5 % führte [Tambovtsev2007].

Auch in Kälteträgeranlagen kann mit verbesserten Wärmeüberträgern Energie gespart werden. Ein Wechsel zu Minichannel-Wärmeüberträgern brachte im NK-Bereich 14 % Energieeinsparung [Hoglund2007].

## 6.15 Überflutete Verdampfer

Anstelle der üblichen Betriebsweise mit Überhitzung des Kältemittels (Regelung der Überhitzung durch das in der Regel thermostatische Expansionsventil) können die Verdampfer auch überflutet betrieben werden. Diese Betriebsweise erfordert einen Kältemittelabscheider/-sammler und in der Regel eine Kältemittelpumpe und wird häufig bei industriellen Kälteanlagen eingesetzt. Insbesondere bei R744-Supermarktkälteanlagen sollen sich so 30 bis 40 % Energie sparen lassen [Johansen2006]. Die Einsparungen kommen aus der besseren Ausnutzung der

Verdampfer und der höheren Wärmeübergangszahl während der Verdampfung verglichen mit der Überhitzung.

Eine andere Möglichkeit überflutete Verdampfung anzunähern, ist die Verwendung eines thermostatischen Durchflussreglers in Kombination mit einer zweistufigen Entspannung und einem Sauggaswärmeüberträger. An einer steckerfertigen TK-Truhe ließen sich so 16 – 17 % Energie einsparen [Zimmermann2007].

## 6.16 Bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer

Verdampfer werden häufig über Zeitschaltuhren abgetaut. Häufig ist eine Abtauung zum von der Uhr vorgegebenen Zeitpunkt noch gar nicht notwendig. Bedarfsgesteuerte Abtauung kann z. B. über eine Beobachtung der Verdampfungstemperatur (bei Bereifung sinkt die Verdampfungstemperatur) oder einen gesteigerten Energieverbrauch des Verdampferlüftermotors registriert werden und es kann dann bedarfsgerecht abgetaut werden. Für die Abtauung werden in einem typischen Supermarkt zwischen 3 [Schaller2008] und 5 % [BEK2007b] der insgesamt für die Kälteanlage umgesetzten Energie verwendet.

Eine weitere Möglichkeit der Energieeinsparung bei der Abtauung stellen entsprechende motorisch gesteuerte Abtauklappen dar, die während des Abtauvorgangs den Luftaustausch mit dem Kühlraum unterbinden. Die für das Abtauen erforderliche Energie lässt sich so um 50 % reduzieren [Summerer2007].

## 6.17 Verbesserte Beleuchtung

Für eine gute Darstellung der Kühl- und Gefrierprodukte verwenden viele Kühl- und Gefriermöbel eine im Verkaufsmöbel integrierte Leuchte. Ein Großteil der der Leuchte zugeführten elektrischen Energie wird in Wärme umgewandelt, die zum Teil in die Umgebung abgegeben wird, aber auch als zusätzliche Kühllast am Verdampfer auftritt. Durch Verwendung von energiesparenden Leuchten ließe sich also doppelt Energie sparen. Zum einen durch reduzierten Energiebedarf für die Beleuchtung und zum anderen durch eine reduzierte Kühllast. Der Energieaufwand für die Beleuchtung beträgt ca. 6 % der gesamten für die Kühlung umgesetzten Energie [BEKb2007].

Derzeitiger Standard bei der Beleuchtung von Kühl-/Gefriermöbeln und in Kühl-/Gefrierräumen sind Leuchtstoffröhren. Der Energieverbrauch derartiger Leuchten setzt sich zusammen aus dem Energieverbrauch der eigentlichen Leuchte und dem des Vorschaltgerätes. Nach der EU-Richtlinie 2000/55/EG dürfen seit 21. November 2005 keine Vorschaltgeräte der Energieklasse C mehr in Umlauf gebracht werden. Bei diesen betrug die Leistungsaufnahme des Vorschaltgerätes bis zu 35 % der Gesamtleistung. Moderne elektronische Vorschaltgeräte benötigen nur noch einen Bruchteil der Leistung – die besten liegen bei 5 %. Die Lichtausbeute einer Leuchtstoffröhre liegt bei ca. 80 lm/W. Beleuchtungen auf Diodenbasis sind in der Entwicklung. LEDs konnten in den vergangenen 10 Jahren ihre Helligkeit nahezu verzehnfachen und erreichen heutzutage mit bis zu 100 lm/W hohe Wirkungsgrade. Walmart hat in einem Supercenter in Aurora, Colorado LEDs in den Kühlregalten eingebaut, die ungefähr halb so viel Energie verbrauchen wie Leuchtstoffröhren mit vergleichbarer Produktbeleuchtung [Deru2007]. Ein Vorteil der LED Technik gegenüber Leuchtstoffröhren ist die Tatsache, dass LEDs um so effizienter arbeiten, je kälter sie sind, wohingegen Leuchtstoffröhren bei niedrigen Temperaturen mehr Energie verbrauchen. Durch einen Wechsel von T8 Leuchtstoffröhren zu LEDs lassen sich an einem Fullsize-Kühlregal zwischen 50 und 70 W pro Öffnung sparen [Sturm2008].

Neben dem Einsatz entsprechender energiesparender Leuchten kann die Beleuchtung auch außerhalb der Kühlzone platziert werden oder es können Reflektoren oder Lichtleiter eingesetzt werden. In einem dänischen Projekt konnten durch eine Verlegung der Beleuchtung außerhalb des gekühlten Innenraumes an einem Flaschenkühler ca. 8 % Energie eingespart werden [Kauffeld2000]. Eine andere Möglichkeit ist das bedarfsgerechte Ein- und Ausschalten der Produktbeleuchtung. Walmart hat in einem Supercenter in Aurora, Colorado, die Produktbeleuchtung eines Ganges über einen Bewegungssensor geschaltet [Deru2007]. Die Abschaltung der Beleuchtung macht natürlich nur dort Sinn, wo die Kundenfrequenz an bestimmten Tagen bzw. zu bestimmten Uhrzeiten niedrig ist, wie z. B. in den USA während der Nachtstunden.

## 6.18 Absenkung der Verflüssigertemperatur

Die Verflüssigungstemperatur wird oft künstlich hochgehalten, um den einwandfreien Betrieb der thermostatischen Expansionsventile sicherzustellen. Wird die Verflüssigungstemperatur abgesenkt, werden mit jedem Kelvin niedrigerer Verflüssigungstemperatur ca. 3 % Energie gespart [Bouchareb2003]. Die Verflüssigungstemperatur lässt sich z. B. durch größere Wärmeüberträgerflächen, optimale Luftführung, Beschattung des Verflüssigers, Sprühbefeuchtung des Verflüssigers (s. 6.18.2) und häufigere Reinigung senken.

### 6.18.1 Anpassung der Verflüssigungs- an die Außenlufttemperatur

Durch entsprechende außenlufttemperaturgeführte elektronische Steuerung der Verflüssigungstemperatur und damit auch des Verflüssigungsdruckes lassen sich ca. 3 % Energie einsparen [Zeller2006]. Bei einem schwedischen Supermarkt wurden durch die Anpassung der Verflüssigungstemperatur ca. 20 % Energie eingespart [Arias2006]. In der Regel sind dafür elektronische Expansionsventile notwendig, da thermostatische Expansionsventile für einen geforderten Kältemitteldurchfluss, und damit eine geforderte Kälteleistung, eine bestimmte treibende Druckdifferenz benötigen.

### 6.18.2 Verdunstungskühlung des Verflüssigers

Durch die Besprühung oder Berieselung des Verflüssigers mit Wasser kann die Lufttemperatur je nach System bis nahe an die Feuchtkugeltemperatur (Kühlgrenztemperatur) abgekühlt werden. Durch die Verdunstung des Wassers lässt sich daneben die Verflüssigerleistung um das zwei- bis dreifache steigern [Raetz2003]. Es ist auf entsprechende Wasseraufbereitung zu achten, um z. B. Mineralablagerungen zu verhindern. Bei unsachgemäßem Betrieb können sich auch Gesundheitsprobleme ergeben (z. B. Legionellen).

### 6.18.3 Wärmeabgabe an das Erdreich

Insbesondere im Sommer ist das Erdreich kälter als die Außenluft. Es könnte also anstelle der Außenluft ein entsprechender Wärme- bzw. Kälteträger verwendet werden, der die Wärme des Verflüssigers an das Erdreich abgibt. Derartige Systeme eignen sich insbesondere in der Kombination Wärmeabgabe an das Erdreich im Sommer und

Wärmeentnahme über eine Wärmepumpenschaltung für die Heizung des Supermarktes im Winter. Derartige Verfahren eignen sich nur für Böden mit guter Wärmeleitfähigkeit. Dies sind insbesondere feuchte Böden. Dabei ist zu beachten, dass durch den Bau des Supermarktes und des dazugehörigen Parkplatzes sich evtl. die Eigenschaften des Erdreichs ändern. In der Regel hin zu einer schlechteren Wärmeleitung. Ausführliche Erläuterungen zur Erdwärmenutzung finden sich z. B. in [Loose2006]. Die durch die Wärmeabgabe an das Erdreich im Sommer erzielbare Energieeinsparung hängt von der möglichen Absenkung der Verflüssigungstemperatur ab und beträgt ca. pro Kelvin reduzierter Verflüssigungstemperatur 3 %.

Die Abwärme einer Supermarktkälteanlage ist in der Regel so groß, dass bei entsprechender Auslegung des Gebäudes und der Haustechnik für die Heizung im Winter relativ wenig Fläche im Erdreich erforderlich ist. Diese Fläche reicht dann nicht, um im Sommer die gesamte Verflüssigerwärme ins Erdreich abzuführen. Hier bietet sich die Unterkühlung des flüssigen Kältemittels nach dem Verflüssiger mittels der ins Erdreich abgebbaren Wärme an [Schaller2008]. Erfahrungen mit ca. 50 derartigen Anlagen belegen bis zu 20 % geringere Energieverbräuche bei gleichzeitig 20 % kleineren Verdichtern mit 20 % reduzierter Anschlussleistung [Schaller2008].

### 6.18.4 Flüssigkeitsunterkühlung

Neben der Absenkung der Verflüssigungstemperatur bietet sich auch die Möglichkeit der Flüssigkeitsunterkühlung des flüssigen Kältemittels nach dem Verflüssiger. Durch diese Maßnahme wird die Kälteleistung erhöht. Die Verdichterarbeit bleibt dabei unverändert. Die Kälteleistungszahl steigt bzw. es sinkt für eine geforderte Kälteleistung der Energieverbrauch der Anlage. Energetisch sinnvoller wäre jedoch die Senkung der Verflüssigungstemperatur, da bei dieser Maßnahme gleichzeitig der Energieaufwand für die Verdichtung sinken würde und die Kälteleistungszahl stärker ansteigen würde als bei einer Unterkühlung der Flüssigkeit bei hohem Verflüssigungsdruck. Die Energieeinsparung durch abgesenkte Verflüssigungstemperatur wäre also höher als diejenige welche bei einer Flüssigkeitsunterkühlung erzielbar ist.

Die Flüssigkeitsunterkühlung bietet sich dort an, wo eine Wärmesenke mit niedrigem Temperaturniveau aber begrenzter Leistung zur Verfügung steht oder wenn der

Verflüssigungsdruck und damit die Verflüssigungstemperatur z. B. für die einwandfreie Funktion der thermostatischen Expansionsventile einen bestimmten Wert nicht unterschreiten darf, die Außenlufttemperatur jedoch eine weitere Abkühlung zulassen würde. Der erste Fall, d. h. die Wärmesenke mit begrenzter Leistung findet sich z. B. bei Erdwärmesonden oder Erdkollektoren. Durch eine der Verflüssigung mit Hilfe der Umgebungsluft nach geschalteten Flüssigkeitsunterkühlung mittels Wärmeabgabe ins Erdreich lassen sich zwischen 18 und 22 % Energie einsparen [Schaller2008]. Beim zweiten Fall, dem Einsatz eines zusätzlichen luftgekühlten Unterkühlers liegen die Einsparungen bei 8 bis 12 % [Schaller2008].

Flüssigkeitsunterkühlung lässt sich auch durch einen Wärmeaustausch mit einem abgezweigten verdampfenden Kältemittelteilstrom realisieren. Der zur Kondensatunterkühlung verwendete vollständig verdampfte Teilstrom wird dem Verdichter auf einem zwischen dem Verflüssigungs- und Verdampfungsdruckniveau liegenden Druck zugeführt. Der Verdichter muss für solch einen Kältemittelstrom auf einem mittleren Druckniveau ausgelegt sein. Ein Flüssigkeitsunterkühler dieser Bauart wird auch als Economizer bezeichnet. Je nach eingesetztem Kältemittel können sich Energieeinsparungen ergeben.

## 6.19 Innerer Wärmeaustausch

Eine Flüssigkeitsunterkühlung lässt sich außerdem durch einen Wärmeaustausch zwischen dem den Verdampfer verlassenden Kältemitteldampf und dem den Verflüssiger verlassenden Kältemittelkondensat realisieren. Je nach Kältemittel und dessen thermodynamischen Eigenschaften kann ein derartiger innerer Wärmeaustausch zu einem Energiemehr- oder –minderverbrauch führen. Förster [2008] gibt insbesondere den isentropen Exponenten des Kältemitteldampfes am Verdampferaustritt als Kriterium an. Ein Energiemehrverbrauch ergibt sich demnach in der Regel bei Verwendung eines Sauggaswärmeübertragers bei R717. Energieeinsparungen ergeben sich z. B. bei R290 und R404A [Förster2008].

Beachtliche Energieeinsparungen von bis 45 % sind bei R404A durch die Kombination eines sogenannten Economizers, s. 6.18.4, mit einem nachgeschaltetem Sauggaswärmeübertrager möglich [Förster2008].

## 6.20 Freie Kühlung

In Norwegen gibt es Systeme, die im Winter die Verdichter der Kälteanlage vollständig abschalten und das an den Kühlstellen verdampfende Kältemittel direkt bei gleichem Druck wieder verflüssigen. Diese Anlagenschaltungen werden in Skandinavien „freie Kühlung“ genannt. Diese Art der „freien Kühlung“ funktioniert deutlich einfacher in Kälteträgeranlagen und wird deshalb häufig in Nordeuropäischen Ländern eingesetzt, wo zahlreiche Kälteträgeranlagen eingesetzt werden [Hellsten2007].

Eine andere Art der freien Kühlung besteht darin im NK-Bereich direkt die kalte Außenluft in die Möbel einzublasen. Entsprechende Untersuchungen an NK-Regalen ergaben während der kalten Jahreszeit in China bis zu 80 % Energieeinsparungen [Chen2007].

## 6.21 Wärmerückgewinnung

Durch eine konsequente Nutzung der Abwärme durch Wärmerückgewinnung (WRG) lässt sich ein großer Teil der zum Heizen eines Supermarktes erforderlichen Energie einsparen. Direkte Nutzung der Verflüssigerwärme zur Luftheizung der Raumluft ist in der Regel effektiver als der Umweg über einen Wasserkreislauf. Allerdings sind Systeme mit zwischengeschaltetem Wasserkreislauf flexibler und leichter regelbar [Johansen2006]. WRG-Systeme mit zusätzlichem luftgekühltem Verflüssiger in der Zuluftleitung der Lüftungsanlage benötigen zwischen 50 und 100 kg zusätzliches Kältemittel [Görner2007]. Es gibt auch Systeme die die Wärmerückgewinnung der Kälteanlage mit einer umschaltbaren Klimaanlage kombinieren. Diese verwendet dann im Heizbetrieb Wärme aus der Außenluft. Gegenüber einer separaten Heizungsanlage lassen sich damit z. B. bis zu 23 % Energie einsparen [Zeller2006].

Um die Verflüssigungstemperatur der Kälteanlage trotz Wärmerückgewinnung niedrig zu halten, kann eine Wärmepumpe die Wärme des Verflüssigers auf ein für das Heizen erforderliches Temperaturniveau transformieren [Minea2007]. Neben Kanada [Minea2007] gibt es eine derartige Anlage auch in Österreich [Kaltenbrunner2007]. Jedoch auch ohne zusätzliche Wärmepumpe kann die Verflüssigungstemperatur trotz Wärmerückgewinnung niedrig gehalten werden. Dazu wird die Verbundkälteanlage in einzelne Kreise aufgeteilt, von denen einzelne heizwärmebedarfsgerecht mit

angehobener Verflüssigungstemperatur die Heizwärme des Marktes decken, während die anderen Kreise im Winter mit reduzierter Verflüssigungstemperatur arbeiten [Arias2006]. Der Energieverbrauch der Kälteanlage konnte dadurch trotz Wärmerückgewinnung um ca. 20 % reduziert werden [Arias2006]. Gleichzeitig sank der Energieaufwand für die Heizung um 70 % [Arias2006]. Arias weist in dem Zusammenhang darauf hin, dass Wärmerückgewinnung nur dann energetisch sinnvoll ist, wenn die gesamte Verflüssigungswärme (des betreffenden Kreises) auch tatsächlich genutzt werden kann.

Es gibt inzwischen eine Vielzahl von Supermärkten in Europa, die ihren gesamten Heizwärmebedarf aus der Kälteanlage decken sowie einzelne [Manz2008, Nüssle2008], die neben der Deckung des eigenen Heizwärme- und Brauchwarmwasserbedarfs noch benachbarte Gebäude mit Wärme beliefern.

## 6.22 Kältespeicher

Supermarktkälteanlagen haben einen über den Tagesverlauf sehr stark schwankenden Kältebedarf. Während der Laden geschlossen ist, sind in der Regel die sonst offenen Kühlregale mit entsprechenden Rollos verschlossen. Der Energieverbrauch dieser Kühlregale sinkt dabei auf 10 bis 20 % des Bedarfs während der Öffnungszeiten. Besondere Kühllastspitzen ergeben sich darüber hinaus morgens beim Einbringen neuer, zum Teil warmer Ware[1], und nachmittags während der Hauptverkaufszeiten. Die Kälteanlage muss für diese Lastspitzen ausgelegt sein und arbeitet den meisten Teil des Tages im Teillastbereich. Je nach Art der Kälteanlage ergeben sich im Teillastbereich mehr oder weniger große Verluste. Energetisch wäre es sinnvoller, die Kälteanlage für einen mittleren Kältebedarf auszulegen und bei dieser konstanten Last 24 Stunden am Tag zu betreiben. Dazu wäre ein Kältespeicher notwendig, der jedoch selbst wieder z. B. über Wärmeeinfall an der Oberfläche einen Energieverbraucher darstellt.

[1] Warme Ware kann im Supermarkt zubereitete Ware, z. B. Leberpasteten oder andere Gerichte sein, manchmal kommt es jedoch auch trotz des HACCP zu einem längeren Aufenthalt angelieferter kalter Waren und damit zu einem Aufwärmen derselben. HACCP steht für „**H**azard **A**nalysis **C**ritical **C**ontrol **P**oints“ und meint die Gefahrenanalyse und Kontrolle kritischer Punkte - und zwar auf allen Stufen der Zubereitung, Verarbeitung, Herstellung, Verpackung, Lagerung, Beförderung, Verteilung, Behandlung und des Verkaufs von gekühlten Produkten.

Mit einem Kältespeicher kann auch ein großer Teil der Kälteerzeugung in die Nachtstunden verlegt werden, in denen die Außenlufttemperatur in der Regel kälter ist. Bei luftgekühlten Verflüssigern und entsprechender Regelung (siehe dort) ließen sich in der Nacht zum Teil deutlich reduzierte Verflüssigungstemperaturen und damit niedrigere Energieverbräuche erzielen.

## 6.23 Intelligente Anlagenregelung unter Einbeziehung einer Vielzahl der vorgenannten Maßnahmen

Mit Hilfe computergestützter Regelungskonzepte können viele der bisher genannten Maßnahmen sinnvoll in den Anlagenbetrieb integriert werden. So lassen sich niedrige Verflüssigungs- und hohe Verdampfungstemperaturen realisieren, mit denen in der Praxis zwischen 12 und 20 % Energieeinsparung erzielt werden [Schauer2008]. Außerdem kann eine geringe Schalthäufigkeit der Verdichter realisiert werden, was die Lebensdauer der Verdichter erhöht [Schauer2008].

## 6.24 Korrektes Befüllen der Kühl-/Gefriermöbel

Korrektes Befüllen von Kühlregalen und –truhen sowie Gefriertruhen sichert nicht nur eine korrekte Produkttemperatur, sondern hilft auch Energie zu sparen. Faramarzi gibt einen bis zu 6 % höheren Energieverbrauch für überfüllte, offene Kühlregale an [Faramarzi2004]. Gleichzeitig steigt die Temperatur der wärmsten Produkte um 6 K. Die maximalen Stapelhöhen sind einzuhalten und die Luftkanäle freizuhalten.

## 6.25 Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum

Faramarzi hat gezeigt, dass eine reduzierte Luftfeuchte (35 statt 55 % relative Luftfeuchte) im Verkaufsraum bei offenen Kühlregalen bis zu 18 % Energieeinsparung durch reduzierte latente Wärme (62 % weniger Kondensation von Luftfeuchtigkeit) an den Verdampfern der Kühlregale bringen kann [Faramarzi2004]. Wird die Raumluft mit einer Klimaanlage entfeuchtet steigt der Energieverbrauch der Klimaanlage durch die größere Entfeuchtung. Allerdings wird das in der Luft enthaltene Wasser in der Klimaanlage nur kondensiert wohingegen es im Verdampfer der Kälteanlage kondensiert und gefriert. Der Energiebedarf für die Entfeuchtung in einer Klimaanlage dürfte deshalb ca. 15 % niedriger sein.

## 6.26 Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger

Luftbeaufschlagte Wärmeüberträger neigen zur Verschmutzung, insbesondere die Verflüssiger von steckerfertigen Geräten. Eine regelmäßige Reinigung aller Wärmeüberträgerflächen reduziert den Energieverbrauch. Auch hier gilt: Jedes Kelvin tiefere Verdampfungstemperatur bzw. höhere Verflüssigungstemperatur erhöht den Energieverbrauch um ca. 3 %.

Die Maßnahmen 6.1 bis 6.23 sind alle bereits während der Planung zu berücksichtigen bzw. einzubauen, wohingegen der Supermarktbetreiber die Maßnahmen 6.24 bis 6.26 selbst während des Betriebs beeinflussen kann. Fachleute schätzen, dass durch bessere Möbelbeladung, Pflege und Wartung rund 10 bis 15 % des Energieverbrauchs von Kühlmöbeln eingespart werden könnten [Kaufmann1994].

Bild 6.3 zeigt einen Vergleich der mit einzelnen Maßnahmen erzielbaren Energieeinsparungen. Einige Maßnahmen schöpfen das gleiche Potential aus, z. B. elektronische Expansionsventile und überflutete Verdampfung. Die meisten Maßnahmen sind jedoch miteinander kombinierbar und es ergibt sich dadurch eine entsprechend größere Energieeinsparung.

In einer mehrjährigen Studie (2005 bis 2007) an zwei gleichen Verbundanlagen in zwei EC-Centern in der gleichen Klimazone wurden in einem Markt durch die Kombination von einer Anhebung der Verdampfungstemperatur, Absenkung der Verflüssigungstemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur bis hinab zu einer minimalen Verflüssigungstemperatur von 15 °C, Verwendung von elektronischen Expansionsventilen, Drehzahlregelung der Verdichter sowie Einsatz von intelligenten kommunikationsfähigen Regelungssystemen im Vergleich zur traditionellen Verbundanlage mit Standardregelung im Referenzmarkt 22 % Energie eingespart [Wendelborn2008].

Bei der Beschreibung der einzelnen Modelltechnologien, siehe Technologiedatenblätter, wird im Einzelfall darauf eingegangen, welche Möglichkeiten bei der jeweiligen Technologie miteinander kombiniert werden können.

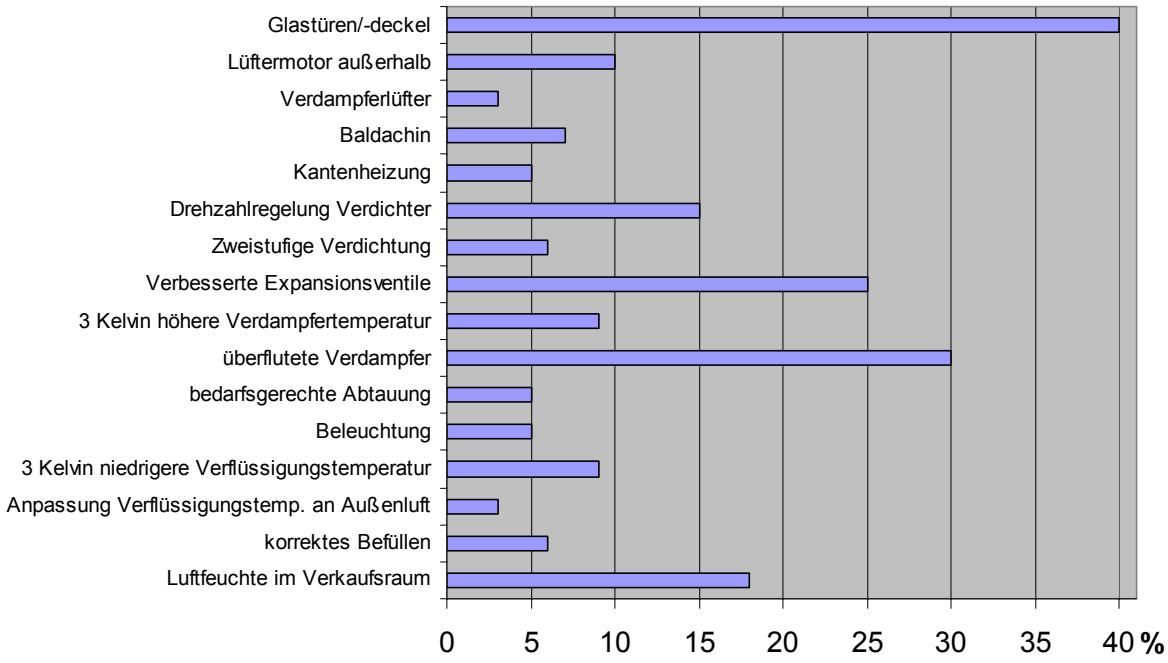



Bild 6.3: Energieeinsparung in Prozent vom Energieverbrauch der Kälteanlage durch verschiedene Maßnahmen sofern diese in der Literatur durch Zahlen belegt sind. Quellen siehe Text. Es wurde bei weit streuenden Angaben ein realistisch erscheinender Wert angesetzt.

# 7. Kältemittelverluste

Kältemittelverluste treten an nahezu allen Kälteanlagen auf. Der Umfang der Kältemittelverluste hängt von der Komplexität der Kälteanlage, den Betriebsbedingungen, der Wartung und vielen weiteren Faktoren ab. So neigen fabrikgefertigte Systeme weniger zur Leckage als solche, die vor Ort aus Komponenten zusammengebaut werden. Insbesondere wenn bei letzteren Schraubverbindungen eingesetzt werden. Bei einer Untersuchung des Forschungsrats Kältetechnik an 62 gewerblichen Kälteanlagen in Deutschland (davon 19 Verbundanlagen und 43 dezentrale Kälteanlagen, Baujahre 1990 bis 1999, Kältemittefüllmengen von 0,7 bis

360 kg) traten 83 % der Kältemittelverluste an Montage-Fügestellen auf [FKT2003], siehe Bild 7.1. Der mittlere spezifische Kältemittelverlust lag bei 3,2 %. 99 % des Gesamtkältemittelverlustes kam von „großen“ Leckagestellen mit Leckageraten über 30 g/a [FKT1999].

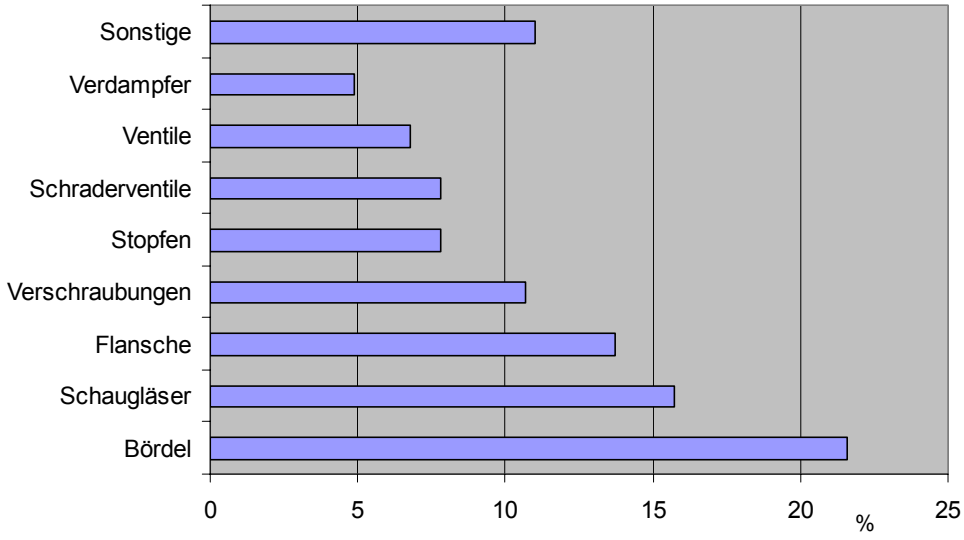



Bild 7.1: Orte der Kältemittelverluste (nach Anzahl der Leckagen, nicht nach Menge!) an 62 Gewerbekälteanlagen in Hessen und Sachsen im Jahr 1999 [FKT1999].

Bei neuen Verbundkälteanlagen sind die Anzahl der Schraubverbindungen stark reduziert sowie Problemstellen für Schwingungsrisse beseitigt [Görner2007, Huchet2007]. Einer französischen Studie zu Folge sind die Ventile, insbesondere die Serviceventile, die Hauptleckagestellen [Huchet2007]. Dabei weisen 40 % aller Leckstellen eine Leckagerate von weniger als 5 Gramm Kältemittel pro Jahr auf und 45 % aller Leckstellen eine Leckagerate von 5 bis 10 Gramm Kältemittel pro Jahr auf [Huchet2007], d. h. die Mehrzahl der Emissionen rührt von vielen sehr kleinen Leckagen.

Kältemittelverluste von Verbundkälteanlagen in Deutschland (Bestand) liegen heute in der Größenordnung von 5 bis 10 % [Görner2007, Bucher2007]. Eine Studie bei 21 amerikanischen Supermärkten zeigte für das Jahr 2006 eine durchschnittliche Verlustrate von ca. 8 % [Perti2007]. Neuere Anlagen (1 bis 4 Jahre alt) lagen in der Regel (deutlich) unter diesem Wert. Ausnahmen stellten Anlagen mit Leitungsbrüchen

dar; eine Anlage hatte deshalb 27 % (5 Jahre alte Anlage) eine andere 25 % Kältemittelverluste (2 Jahre alte Anlage). Überraschend wiesen jedoch auch eine zehn und eine elf Jahre alte Anlage Verlustraten um die 5 % auf [Perti2007]. Das Anlagenalter ist also nicht gleichbedeutend mit steigender Leckagerate.

Eine schwedische Untersuchung von ca. 450 Supermärkten über den Zeitraum von 1996 bis 2003 zeigt jährliche Kältemittelverlustraten von 12,2 % (1996) bis 11,2 % (2003), siehe Bild 7.2 [Engsten2004].

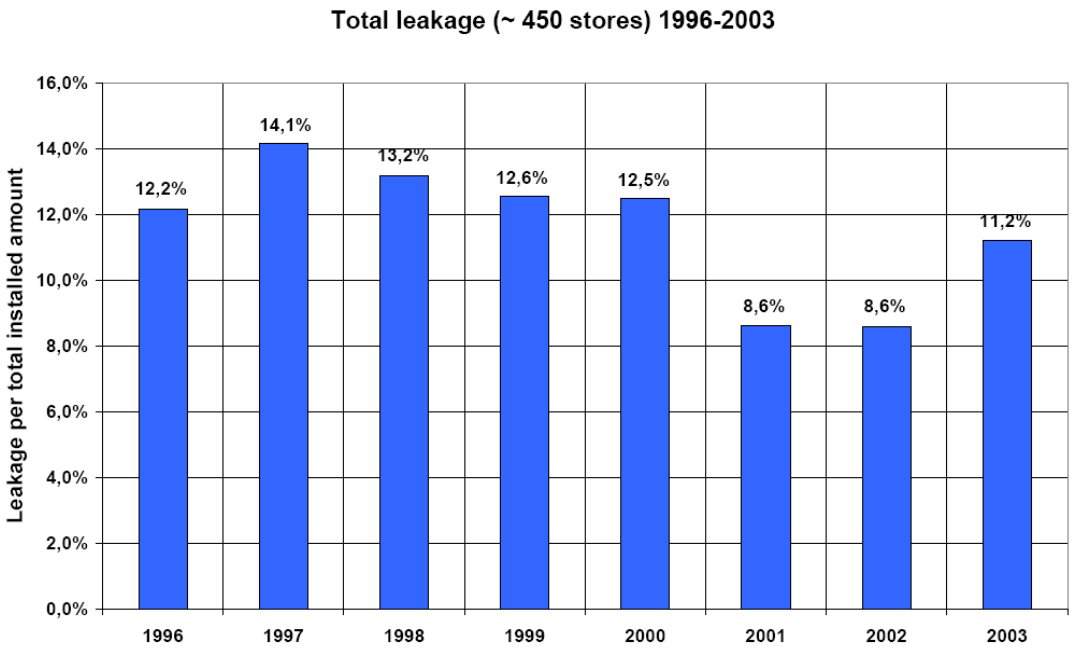



Bild 7.2: Kältemittelleckagen in zentralen Supermarktkälteanlagen zweier Supermarktketten in Schweden [Engsten2004].

Eine englische Studie gibt für Supermarktverbundkälteanlagen die in Bild 7.3 gezeigten Leckageorte mit ihrer jeweiligen Leckagehäufigkeit an [Colbourne2004] und kommt im Prinzip zu einem ähnlichen Ergebnis wie die Studie des Forschungsrats Kältetechnik [FKT1999]: Die überwiegende Anzahl der Leckagen tritt an mechanischen Verbindungsstellen auf. „Die Ursache dafür, dass Bördelverbindungen am häufigsten undicht waren, dürfte in erster Linie daran liegen, dass die Bördel nicht

ordnungsgemäß hergestellt wurden und dass in zu vielen Fällen keine genügend empfindliche Lecksuche durchgeführt wurde“ [FKT1999].

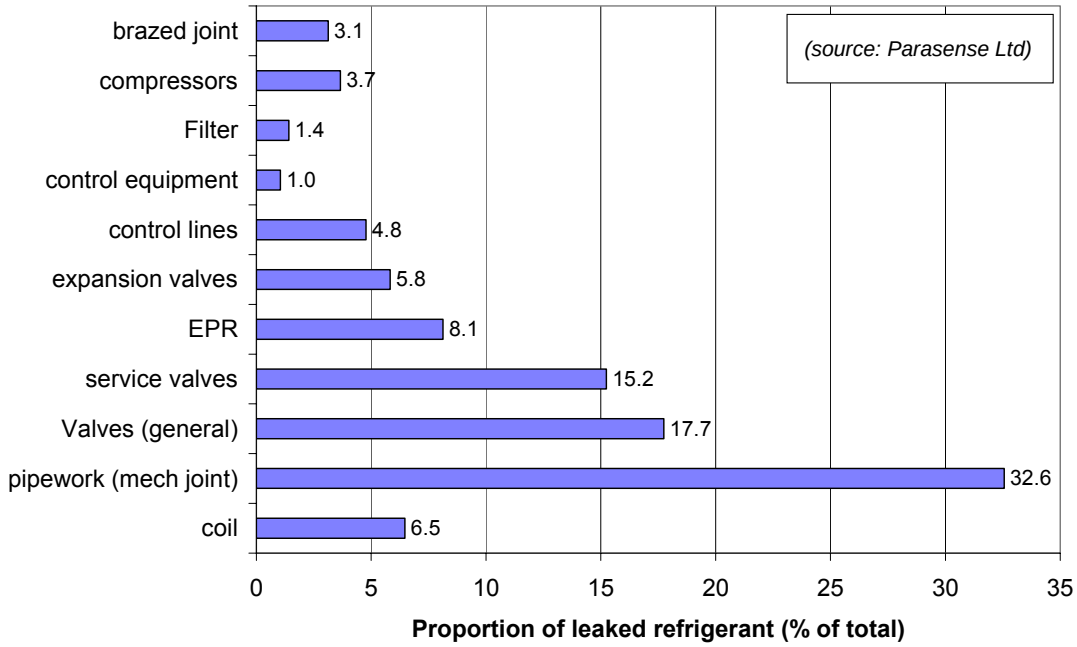



Bild 7.3: Kältemittelleckagen in zentralen Supermarktkälteanlagen in Großbritannien [Colbourne2004].

brazed joint – Lötverbindung; compressors – Verdichter; filter – Filter/Trockner; control equipment – Regelorgane, z. B. Druckwächter, Manometer etc.; control lines – Verbindungsleitungen zu den Regelorganen; expansion valves – Expansionsventile; EPR – Verdampferdruckregler; service valves – Serviceventiel; valves (general] – andere Ventile, z. B. Magnetventile oder Absperrventile; pipework (mech joint) – Rohrleitungssystem (mechanische Verbindungen, z. B. Bördelverschraubungen); coil – Wärmeüberträger, d. h. Verdampfer und Verflüssiger.

Eine amerikanische Studie gibt für Supermarktverbundkälteanlagen die in Bild 7.4 gezeigten Leckageorte mit ihrer jeweiligen Leckagehäufigkeit an.

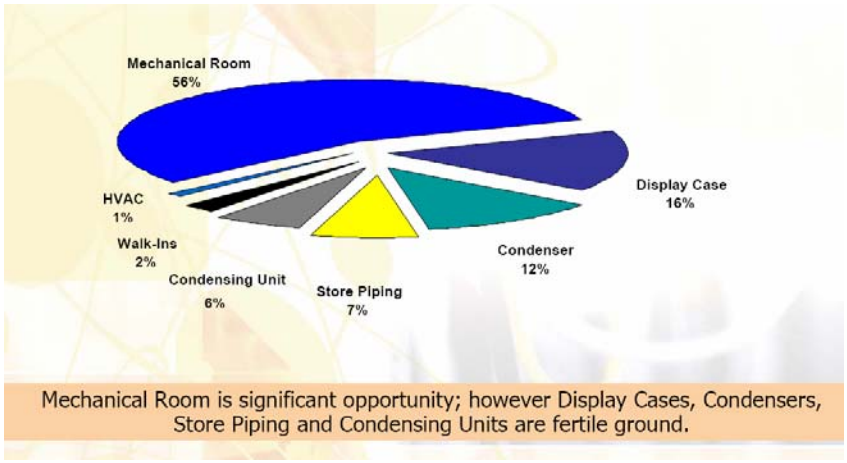



Bild 7.4: Kältemittelleckagen in zentralen Supermarktkälteanlagen in USA [Hoglund2006].

Mechanical room – Maschinenraum; HVAC – Klimaanlage; Walk-Ins – Kühlräume; Condensing unit – Verflüssigungssatz; Store piping – Rohrleitungen im Verkaufsraum; Condenser – Verflüssiger; Display case - Verkaufsmöbel.

Bild 7.5 zeigt noch einmal genauer wo die Leckagen auftreten. Es wird deutlich ersichtlich, warum nach EN378 soweit möglich Lötverbindungen eingesetzt werden sollten. Über 30 % der insgesamt festgestellten Leckagen kommen auch bei den amerikanischen Anlagen von fehlerhaften mechanischen Verbindungen (Loose fitting: ca. 55 % von 64 %).

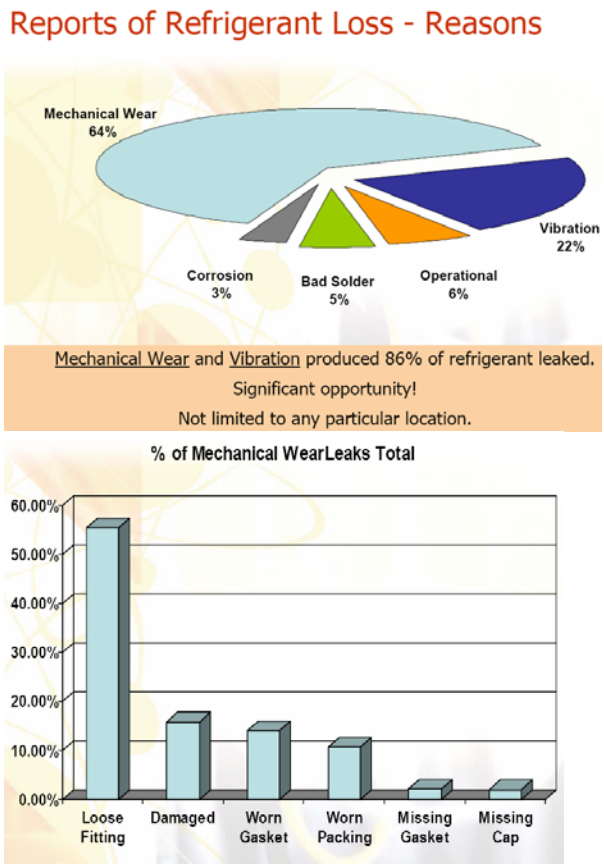



Bild 7.5: Kältemittelleckagen in zentralen Supermarktkälteanlagen in USA [Hoglund2006]. 86 % der Leckagen stammen von mechanischem Verschleiß (Mechanical Wear) und Vibrationen (Vibrations). Beim mechanischen Verschleiß machen lose Verschraubungen den Hauptteil aus. Lose Verschraubungen beinhaltet Bördelverschraubungen, Schraederventile, Rotolockventile, Kappen auf Serviceventilen und andere.

Da sich Kältemittelleckagen an Anlagen mit einer reduzierten Kältemittelfüllmenge eher bemerkbar machen und bei einer Havarie potentiell weniger Kältemittel austreten kann, wenn weniger in der Anlage drin ist, kommt der Kältemittelfüllmengenreduzierung im Hinblick auf eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine große Bedeutung zu. Kältemittelfüllmengen lassen sich zum Beispiel durch den Einsatz von Minichannel-Wärmeüberträgern oder Plattenwärmeüberträgern reduzieren. So lassen sich bei Versuchsanlagen mit Plattenwärmeüberträgern spezifische Kältemittefüllmengen von 18 g pro kW Kälteleistung realisieren [Litch1999] und für Anlagen im Serienbau 28 g/kW [Behnert2003]. Einleitende Untersuchungen mit dem Kältemittel R290 in

Verbindung mit Minichannelverflüssiger und –verdampfer ergaben für eine Kälteanlage mit 1 kW Kälteleistung 120 g Kältemittelfüllmenge mit einer Prognose für eine optimierte Kälteanlage von 50 g pro kW für Anlagen kleiner Leistung [Hoehne2004].

# 8. Umbau bestehender Anlagen

In Deutschland gibt es ca. 40.000 bis 50.000 Supermärkte, je nach Definition, siehe Kapitel 3. Alle 7 bis 10 Jahre wird ein Supermarkt umgebaut und dabei auch die Kälteanlage geändert. Ca. alle 14 Jahre, oder bei jedem zweiten Umbau, kommt eine komplett neue Kälteanlage in den Supermarkt [Schmidt2007a, Schneider 2007]. Ältere Supermärkte verwenden R22 in Direktverdampfungssystemen. Eine Schätzung geht davon aus, dass R22 noch in ca. 25 % aller bestehenden Supermarktkälteanlagen enthalten ist [Kröger2007b] – das wären ca. 10.000 Anlagen. In Neuanlagen darf R22 seit einigen Jahren nicht mehr verwendet werden. Für bestehende Anlagen werden sogenannte Drop-in Kältemittel, z. B. R417A (46,6 % R125, 50 % R134a, 3,4 % R600) oder R422D (65,1 % R125, 31,5 % R134a, 3,4 % R600a), angeboten, die ohne größere Umbauten eingesetzt werden können. Die beiden Kältemittel haben ein GWP von 2.300 bzw. 2.700 [UNEP2006], d. h. mehr als das R22 (GWP = 1810 [UNEP2006]), welches sie ersetzen. Durch einen geringen Kohlenwasserstoffanteil im Kältemittel, z. B. 3,4 % R600 bei R417A bzw. 3,4 % R600a bei R422D, können diese Drop-in Kältemittel auch mit Mineralöl betrieben werden. Eine Umstellung einer Anlage dauert je nach Anlagengröße ca. fünf [Kröger2007b] bis 15 Stunden [Schauer2008]. Der Servicemonteur erhält damit aber ein weiteres Kältemittel. In der Regel wird deshalb bei einem umfassenden Umbau auf das Kältemittel R404A umgestellt. Dazu sind in der Regel alle Bauteile mit Elastomer-Dichtungen auszutauschen. Des Weiteren muss das Kältemaschinenöl gewechselt werden und die Expansionsventile angepasst werden. Ein derartiger Umbau kostet von daher fast soviel wie ein kompletter Neubau [Görner2007]. Eine Umstellung auf R744 kommt auf Grund der deutlich höheren Drücke mit R744 nicht in Frage.

Ebenso ist ein Umbau einer bestehenden Anlage in eine gut funktionierende Kälteträgeranlage nicht möglich. Die Verdampfer sollten durch speziell für Sole gebaute Wärmeüberträger ersetzt werden. Die Rohrleitungen sind in der Regel zu klein und die Kältemittelflüssigkeitsleitung normalerweise nicht isoliert. Bei einer

Kälteträgeranlage ist jedoch eine Isolation aller Rohrleitungen nötig. Auch der manchmal in der Fachpresse propagierte Einsatz von Eisbrei in bestehenden Direktverdampfungsanlagen, bei denen nur die Expansionsventile gegen Regelventile ausgetauscht werden und eine zusätzliche Pumpe eingebaut wird, führt nicht zu energetisch optimalen Lösungen.

Einzelne Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs lassen sich vorteilhaft bei einem Umbau einer bestehenden Kälteanlage realisieren. Glasschiebedeckel auf TK-Truhen und/oder Glastüren bei NK-Regalen sind derartige Maßnahmen, die sich innerhalb kurzer Zeit amortisieren. Aber auch die Nachrüstung von elektronischen Expansionsventilen oder einer elektronischen Drehzahlregelung von Verdichter- und/oder Wärmeüberträgermotoren sind solche während eines Umbaus relativ einfach zu realisierende Maßnahmen. Siehe Kapitel 6 „Möglichkeiten der Energieeinsparung“ für die Einsparpotentiale der einzelnen Maßnahmen sowie die entsprechenden Quellen.

Die EU F-Gase Verordnung versucht durch ihre strengen Dichtheitskontrollen auch die Dichtheit von bestehenden Kälteanlagen zu erhöhen, siehe Kapitel 4 „Gesetzgebungen zu F-Gasen“. Einen anderen Ansatz haben die Länder Dänemark und Norwegen mit Ihren z. T. sehr hohen Treibhausgassteuern auf Kältemittel gewählt. Details dazu finden sich ebenfalls in Kapitel 4.

## 9. Initiativen von Supermarktketten

Umweltthemen sind in. Verbraucher achten vermehrt auf umweltfreundliche Produkte. Eine internationale Studie von Weber Shandwick Worldwide aus dem Jahr 2000 belegt: Das Verhalten eines Unternehmens gegenüber Gesellschaft und Umwelt wird für Verbraucher immer wichtiger, wenn es darum geht, Entscheidungen für oder gegen Produkte und Marken zu treffen. Neben Qualität und Preis achten immer mehr Verbraucher beim Produktkauf darauf, dass sich der Hersteller korrekt gegenüber der Gesellschaft und der Umwelt verhält. So würden weit über die Hälfte der deutschen Verbraucher in Betracht ziehen, ein anderes Produkt zu kaufen, weil der Hersteller ihrer bevorzugten Marke ein mangelndes Umweltbewusstsein besitzt, seine Mitarbeiter schlecht behandelt oder Kinderarbeit zulässt [Weber2000].

Inzwischen, Jahr 2007, wollen 70 Prozent der Verbraucher wissen, wie viel Kohlendioxid für Produktion und Transport eines Produkts anfällt. Nachhaltigkeit rückt also auch im Supermarkt zunehmend in den Fokus. Das ergab eine Umfrage von Accenture unter bundesweit 1.000 Personen zwischen 14 und 70 Jahren im Mai 2007 [Accenture2007]. Demnach wäre die Angabe, wie viel klimaschädliches $CO_2$ für Herstellung, Logistik und Verpackung einer Ware ausgestoßen wird, für 70 Prozent der Deutschen ein wichtiges Kriterium beim Lebensmittelkauf [Accenture2007]. 75 Prozent gehen eher zu Händlern, denen sie umweltbewusstes Verhalten unterstellen. Besonders ausgeprägt ist das Nachhaltigkeitsbewusstsein bei den über 60-Jährigen. 79 Prozent von ihnen würden eine Kennzeichnung begrüßen, wie die $CO_2$-Bilanz eines Produkts aussieht. Fast jeder der so genannten Best-Ager legt Wert auf Lebensmittel, die aus der Umgebung stammen (97 Prozent). Das Umwelt-Image des Händlers beeinflusst knapp 80 Prozent der Befragten in dieser Altersgruppe [Accenture2007].

Paul Spoonley prognostizierte bereits 1999, dass die Verbraucher in Zukunft die Richtung angeben [Spoonley1999]. Insbesondere Firmen, die Produkte für Endverbraucher herstellen, haben diesen Trend erkannt und versuchen sich ein „grünes“ Image zu geben.

Im Supermarktbereich hat deshalb fast jede Kette inzwischen mindestens einen HFKW-freien bzw. treibhausgasemissionsreduzierten Markt erstellt bzw. setzt energiesparende Konzepte ein. Anhand dieser im eigenen Haus ausgeführten Beispiele werden die Auswirkungen auf nachhaltige Verbesserungen, den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen, das Kaufverhalten der Verbraucher, die Kosten spezifischer Technologien etc. erprobt [MacDonald2007]. Sofern sich eine Technologie unter Umwelt- und Kostengesichtspunkten bewährt, wird sie freiwillig auf breiter Basis eingeführt, wie z. B. steckerfertige Tiefkühltruhen mit drehzahlregelbarem Verdichter, Glasdeckeln und R290 als Kältemittel [Schneider2007].

Beispiele für freiwilliges Engagement auf dem Gebiet des Umweltschutzes im Sinne von Vermeidung von $CO_2$-Emissionen findet sich u. a. bei: Aldi Süd, Edeka (einzelne Edeka-Händler), Lidl, Marks & Spencer (Lebensmittel überwiegend als Bestellware, daneben LEH unter dem Namen Simply Food), Metro, Migros, Tesco und Wal-Mart.

Aldi Süd hat maßgeblich die Entwicklung und Markteinführung von steckerfertigen TK-Truhen mit Glasschiebedeckeln, drehzahlregelbaren Verdichtern und R290 als Kältemittel mitgeprägt. Durch einen von Aldi Süd angeregten Austausch der Verflüssigerlüfter ist der Energieverbrauch dieser Truhen weiter gesenkt worden. Aldi Süd hat bisher 8 transkritische R744-NK-Anlagen in verschiedenen Discount-Märkten installiert und mit Linde einen Kooperations- und Entwicklungsvertrag bzgl. R744-Kälteanlagen geschlossen. Für Kühlregale setzt Aldi Süd Energiesparlüfter und eine von Aldi Süd patentierte Energiesparbeleuchtung ein, die weniger Wärme in das Kühlregal einbringt. Verflüssiger der Kälteanlagen werden mit größerer Wärmeüberträgerfläche ausgelegt, um den Energieverbrauch zu senken. Alle Angaben zu Energiesparmaßnahmen bei Aldi Süd stammen von Aldi Süd.

Coop Schweiz will seinen eigenen $CO_2$-Ausstoß für Heizung, Transport usw. bis 2010 um 16 %, jenen der Verkaufsfilialen sogar um 30 % reduzieren [Quelle: WWF CLIMATE GROUP[1]].

Koch Edeka Aktiv Märkte erhielten im Jahr 2006 für ihren 2.781 $m^2$ großen Lebensmittelmarkt in Schömberg den Umweltpreis des Landes Baden-Württemberg, da der Markt

- ohne die Verbrennung von fossilen Brennstoffen (damit emissionsfrei und klimaneutral) wirtschaftlich betrieben wird,
- den Energiebedarf durch die intelligente Verknüpfung der Kälte- und Wärmequellen und der Kälte- und Wärmeabnehmer unter Einbezug eines geothermischen Pendelspeichers um 25 % senkt, ohne dass dies sich auf die Leistungsfähigkeit der Anlagen ausgewirkt hätte,
- durch den intelligenten Kälte/Wärmeverbund eine Energieeinsparung von umgerechnet 30.000 l Heizöl im Jahr erzielt und diese Technologie in Herstellung und Betrieb einfach und kostengünstig ist, und damit das System in der Breite angewendet werden kann [Koch2007].

[1] In der WWF Climate Group schließen sich Unternehmen zusammen, die einen Beitrag zum Klimaschutz leisten wollen. Sie verpflichten sich, die $CO_2$-Emissionen ihres Unternehmens und ihrer Produkte tief zu halten und vereinbaren individuell mit dem WWF, in welchen Bereichen sie Klimaschutzmaßnahmen umsetzen [www.wwf.ch]

Im Jahr 2007 wurden darüber hinaus an allen Tiefkühltruhen Glasschiebedeckel nachgerüstet [Koch2007].

Lidl setzt bereits seit 2001 in zahlreichen Märkten verschiedene Wärmepumpentechniken zum Heizen und Kühlen ein. In einem am 08. Oktober 2007 eröffneten Markt kann durch Einsatz einer Geothermischen-Energieverbundanlage gänzlich auf einen Gasanschluss verzichtet werden. Als Wärme-/Kältequelle dienen sechs 100 m tiefe Erdsonden. Die Raumtemperierung (Heizen u. Kühlen) erfolgt über Betonkerntemperierung. Des Weiteren wird die Geothermie zur Unterkühlung des Kältemittels genutzt. Die Warenkühlung erfolgt innerhalb der Verbundanlage durch eine R404A/R744 Kaskade. Im Vergleich zum Standard wird die $CO_2$-Emission bei diesem Markt um fast 35 % gesenkt. Seit Mitte 2006 betreibt Lidl eine NK-Verbundanlage mit R744 (TK über steckerfertige Truhen mit R290) als Pilotanlage. Derzeit befinden sich weitere Pilotanlagen mit verschiedenen Modelltechnologien in der Projektierung, die bis Mitte 2008 in Betrieb genommen werden sollen. In den Zentrallagern speist Lidl bei allen ab 2003 errichteten Neubauten die Abwärme der Kälteanlagen über ein Industriefußbodenheizungssystem ein und reduziert hierdurch den Gasverbrauch um bis zu 50 %. Aktuell wurde zudem die Entscheidung getroffen, für neue Großkälteanlagen unternehmensweit nur noch natürliche Kältemittel einzusetzen. Im Bereich der Photovoltaik betreibt Lidl mehrere Anlagen, wobei die größte Einzelanlage eine installierte Leistung von ca. 1,3 MWp besitzt. Alle Informationen zu Lidl von [Schadt2007].

Marks & Spencer bezieht für die 200 Simply Food Supermärkte in England und Wales nur noch Strom aus erneuerbarer Energie [M&S2007]. Bis 2008 sollen bei allen Marks & Spencer Geschäften 20 % $CO_2$-Emissionen eingespart werden [M&S2007]. Marks & Spencer ist Mitglied der °Climate Goup[1].

[1] Die °Climate Group ist eine unabhängige, international operierende nonprofit Organisation mit Sitz in Australien, Großbritannien und USA, der öffentliche und privatwirtschaftliche Organisationen angehören, die sich im Bereich Klimawandel positiv im Sinne von $CO_2$-Reduzierung engagieren. Die °Climate Group wurde 2004 von einer Gruppe unterschiedlichster Firmen, Regierungs- und Nicht-Regierungs-Organisationen gegründet, um neue Impulse in die internationalen Bemühungen zur Begrenzung des Klimawandels zu bringen. Mitglieder aus dem LEH sind Marks & Spencer und Tesco [www.theclimategroup.org].

Metro testet laut eigenem Umweltbericht an einigen Standorten den Einsatz von natürlichen Kältemitteln und „die bisher verwendeten Kältemittel sollen nach und nach durch umweltfreundlichere Alternativen ersetzt werden“ [Metro2007]. Die Tiefkühltruhen und –regale sind inzwischen zum größten Teil mit Deckeln bzw. Türen versehen [Metro2007]. Der Energieverbrauch pro Quadratmeter Verkaufsfläche konnte von 2002 bis 2005 um 10 % reduziert werden. Seit Anfang 2007 bezieht Metro an über 250 Standorten in Deutschland Strom aus umweltfreundlichen Energiequellen [Metro2007].

Migros (CH) engagiert sich nachhaltig für Energieoptimierung und den Klimaschutz [Migros2007]. So sind z. B. alle Tiefkühlmöbel mit Glasschiebedeckeln ausgerüstet und in vielen Märkten energiesparende Beleuchtungskonzepte installiert und es werden verschiedenste Labels zur Kennzeichnung von nachhaltigen Produkten verwendet [Migros2007]. Am 1. Juli 2007 ist die Migros der WWF Climate Group[1] beigetreten, einem Verbund von Firmen, die sich aktiv für den Klimaschutz einsetzen. In Zusammenarbeit mit der Energieagentur der Wirtschaft (EnAW) hat sich die Migros verpflichtet, den $CO_2$-Ausstoß ihrer Filialen und Industriebetriebe bis ins Jahr 2010 um 16 % zu senken. Als Partnerunternehmen der WWF Climate Group will der Großverteiler zudem sein Angebot an energieeffizienten Haushaltgeräten, Lampen und Leuchten markant ausbauen [Migros2007].

Rewe will in seinen neuen City-Märkten (500 bis 1000 $m^2$ Verkaufsfläche) für den TK-Bereich nur noch R744 einsetzen [Rewe2007], in Kaskade zu einer R134a-Anlage für den NK-Bereich [Schmidt2007a].

Tesco hat drei Supermärkte mit natürlichen Kältemitteln ausgerüstet, um Alternativen zu HFKW zu erproben [Tesco2007]. Bis 2010 will Tesco den Energieverbrauch aller Märkte um 50 % gegenüber 2000 gesenkt haben. Dazu sollen alle neuen Märkte über 50 % weniger Energie verbrauchen als ein typischer Supermarkt im Jahr 2006. Tesco

[1] Die „WWF CL!MATE GROUP“ existiert bisher in der Schweiz und Österreich. In anderen Ländern läuft das WWF Programm unter dem Namen „climate *savers*“. Mitglieder sind in Österreich Ikea und in der Schweiz u. a. Coop, Ikea und Migros. In der WWF Climate Group schließen sich Unternehmen zusammen, die einen Beitrag zum Klimaschutz leisten wollen. Sie verpflichten sich, die $CO_2$-Emissionen ihres Unternehmens und ihrer Produkte tief zu halten und vereinbaren individuell mit dem WWF, in welchen Bereichen sie Klimaschutzmaßnahmen umsetzen [www.wwf.at und www.wwf.ch].

setzt dabei u. a. auf LEDs als Beleuchtungsquelle, Solarpanele und Windgeneratoren [Tesco2007]. Tesco ist Mitglied der internationalen °Climate Group.

Walmart hat in den USA zwei Versuchsmärkte gebaut. Es handelt sich dabei um sogenannte Supercenter mit jeweils 19.000 $m^2$ Fläche [MacDonald2007]. Die beiden Märkte wurden in zwei klimatisch unterschiedlichen Gegenden platziert; ein Markt in McKinney, Texas (heiß) und ein Markt in Aurora, Colorado (kalt). In den Märkten wurde eine Vielzahl innovativer Technologien eingebaut, u. a. Glastüren, vergrößerte/verbesserte Wärmeüberträger und drehzahlgeregelte Ventilatoren an bzw. in allen NK-Kühlmöbeln, Glykolkreisläufe für NK-Kühlmöbel, LED-Beleuchtung in den Kühlregalen, Verdunstungsverflüssiger bzw. Kühlturm, Absorptionskälteanlagen, Windgeneratoren, Solarpanele, Gasturbinen für Kraft-Wärme-Kopplung [MacDonald2007, Deru2007]. Die beiden Supercenter werden im Zeitraum 2006 bis 2008 von zwei unabhängigen Instituten messtechnisch begleitet. Im Bereich der Kälteanlagen liegen noch keine eindeutigen Ergebnisse vor [MacDonald2007]. Walmart plant bis 2012 in allen bestehenden Supermärkten 20 % weniger Energie zu verbrauchen und in neuen bereits ab 2009 bis zu 30 % weniger Energie zu verbrauchen [Wal-Mart2007]. Ein wichtiger Bestandteil sind bedarfsgesteuerte LED-Beleuchtungen in allen Kühlregalen. Bis 2008 sollen diese in 500 Wal-Mart Supermärkten eingebaut sein [Wal-Mart2007]. Langfristig will Wal-Mart 100 % auf erneuerbare Energien setzen [Wal-Mart2007].

In die gleiche Richtung geht die von Greenpeace im Rahmen der Olympischen Spiele 2000 angestoßene und im Jahr 2004 umgesetzt Initiative „Refrigerants, Naturally!“ von Coca-Cola, McDonald und Unilever in Zukunft HFKW-freie Technologien einzusetzen. Inzwischen haben sich dieser von der UNEP unterstützten Initiative auch die Firmen Carlsberg, IKEA und PepsiCo angeschlossen. Im Jahr 2005 hat die US EPA die Initiative ausgezeichnet. Laut Umweltreport 2006 von The Coca-Cola Company hat die Firma Ende 2006 6.000 Flaschenkühler mit R744 im Einsatz, von insgesamt über 9 Millionen dieser Geräte [Coca-Cola2006]. MacDonald hat 2003 ein erstes Restaurant in Vejle, Dänemark eröffnet bei dem alle Kälte- und Klimaanlagen HFKW-frei arbeiten [McDonald’s2004]. Die zentrale Klimaanlage arbeitet mit R744.

So löblich die hier erwähnten Initiativen der einzelnen Supermarktketten in Bezug auf den Treibhauseffekt sind, so gibt es dennoch einige Ketten, die auch heute noch in Ländern mit entsprechender Gesetzgebung, z. B. China, Indien, USA, in großem Umfang Supermärkte mit R22 betreiben bzw. noch neu erstellen. R22 hat ein GWP von 1810, also in etwa die Hälfte von R404A aber es hat auch ein Ozonabbaupotential von 0,04. In der EU ist es deshalb für Neuanlagen verboten und darf nur noch zur Wartung an bestehenden Anlagen eingesetzt werden, siehe Kapitel 8 „Umbau bestehender Anlagen“.

# 10. Zusammenfassung

Die folgenden Punkte stellen eine Zusammenfassung des im AP1 erarbeiteten Materials dar. Manche Punkte beziehen sich auf die ausführlichen Informationen der Technologiedatenblätter, die in Tabelle 5.5, 5.6 und 5.8 auszugsweise wiedergegeben sind.

- Den Herstellern und Anwendern von F-Gasen ist es bislang nur in sehr wenigen Einzelfällen (z. B. Holland[1]) gelungen, zu demonstrieren, dass Systeme zur Dichtheit von F-Gasen in der Kältetechnik wirksam sein können - bei z. T. sehr hohen Systemkosten.

- HFKW sind zwar zur Zeit die Basis der meisten kommerziell verfügbaren technischen Lösungen im Bereich Supermarktkälte, können aber mittlerweile prinzipiell mit in der Regel vertretbaren Kosten in fast allen relevanten Anwendungen durch Kältemittel mit sehr niedrigem oder Null-GWP ersetzt werden. Für eine Bewertung der Technologien ist unbedingt neben dem Treibhauspotential der Kältemittel eine ganzheitliche Betrachtung mit Hilfe des TEWI, siehe AP 2, oder besser LCCP durchzuführen.

- Einbußen bei der Energieeffizienz von Anlagen sind auf dem heutigen Stand der Technik bei einer Substitution von fluorierten Kältemitteln durch alternative Kältemittel nicht zu befürchten.

[1] Und selbst in den Niederlanden werden die Zahlen zum Teil bezweifelt.

- Manche der beschriebenen Technologien findet sich bisher nur in wenigen, technisch besonders betreuten Märkten. Ein Nachweis durch entsprechende Feldtests, ob sich diese Anlagen auch im rauen Alltagsbetrieb (z. B. Umbauten in kurzer Zeit) bewähren und zu ähnlich guten Ergebnissen wie die bisher gebauten Demonstrationsanlagen führen, steht noch aus.

- In Ländern mit entsprechender Gesetzgebung, z. B. Dänemark, Norwegen und Schweden, werden inzwischen sehr viele Anlagen mit deutlich reduzierten F-Gasfüllmengen oder mit natürlichen Kältemitteln erstellt. Diese Anlagen erzielen vergleichbare Energieeffizienzen wie herkömmliche Direktverdampfungsanlagen mit F-Gasen.

- Viele Supermarktketten haben einzelne Märkte mit alternativen Technologien in Betrieb genommen, um den Einsatz dieser Technologien zu untersuchen. Manche Ketten haben im Rahmen von freiwilligen Umweltverpflichtungen zum Teil ambitiöse $CO_2$-Vermeidungsstrategien angekündigt.

- Im Bereich der steckerfertigen Geräte gibt es zumindest bei Kälteleistungen bis ca. 1000 Watt verglichen mit Geräten mit HFKW energetisch bessere Lösungen mit Kältemitteln mit sehr niedrigem GWP. Bei einer Erweiterung der Füllmengenbegrenzung für brennbare Kältemittel von derzeit 150 g auf z. B. 500 g könnten alle steckerfertigen Geräte mit dieser Technologie ausgestattet werden.

- Es bestehen in den kältetechnischen Anwendungen in heutigen Supermärkten noch erhebliche Potenziale zum Einsparen von Energie (bis weit über 50 %) bei vertretbaren Kosten. Je nach Maßnahme ergeben sich zum Teil Amortisationszeiten von wenigen Jahren.

- Bei transkritischen Anlagen mit R744 ergibt sich ein sehr gutes Potential zur Wärmerückgewinnung, da R744 überkritisch einen dem zu erwärmendem Wasser ähnlichen Temperatur- und Wärmeinhaltverlauf zeigt. Auch steht im überkritischen Betrieb deutlich mehr Wärme bei hohem Temperaturniveau zur Verfügung als dies bei der Enthitzung von z. B. R404A der Fall ist. Es lassen

sich somit mit R744 größere Wassermengen auf Brauchwasserniveau (ca. 60 °C) erwärmen.

- Möglicherweise bestehen einzelne Anwendungen, in denen HFKW basierte Lösungen bei ausoptimierten Systemen bei gleichen Kosten dauerhaft bessere TEWI-Werte erreichen. In der Realität des deutschen Einzelhandels ist es sehr unwahrscheinlich, dass dieser Optimierungsgrad in der Breite erreicht wird. Gleiches gilt für aufwändige alternative Lösungen, weshalb langfristig einfache Lösungen mit guter Umweltverträglichkeit gefragt sind.

- Ein Verbot von HFKW in Supermärkten ist eine technisch und wirtschaftlich gangbare (siehe Dänemark) wenn auch ökologisch derzeit (noch) nicht zwingende Option. Verluste einer theoretisch erreichbaren Energieeffizienz bieten in der Praxis kein schwerwiegendes Argument gegen solche Verwendungsverbote.

# 11. Literatur


[Accenture2007] Accenture: $CO_2$-Bilanz bei Lebensmitteln? Ja bitte! Pressemitteilung der Fa. Accenture vom 15. Juni 2007, http://www.accenture.com/Countries/Germany/About_Accenture/Newsroom/News_Releases/2007/CO2Jabitte.htm

[Adolph1999] Adolph, U.: Vorteile durch Frequenzstellung und Softstart. Die Kälte & Klimatechnik 52, 10 (1999), S. 90 – 97

[AirLiquide2007] Air Liquide Sicherheitsdatenblätter für technische Gase. Online Ausgabe 2007.

[Amsterdam2007] Amsterdamer Verwaltungsgericht, Kammer 2 – Umwelt – Sonstiges, Urteil zu den Amsterdamer Vorschriften für die Abdeckung von Kühl- und Tiefkühlmöbeln im Lebensmitteleinzelhandel. Sachnummer: 200607377/1 bis einschließlich 200607428/1, 200609174/1 bis einschließlich 200609176/1, 200609178/1, 200609180/1, 200609181/1, 200702366/1 und 200702367/1, Urteil vom 12.9.2007

[Anderson2005] Anderson, J.: Is STEK as good as reported? Institute for European Environmental Policy (IEEP), Brussels 2005

[ARCD2007] ARCD: Auto & Reise. 4 (2007), S. 6

[Area2008] Area: Informationen der Fa. Area Cooling Solutions auf der EUROSHOP 2008 in Düsseldorf am 26.2.2008

[Arias2006] Arias, J.; Claesson, J.: Effektivare butikskyla – värme ur kylanläggningar samt system med flytande kondensering. Aktiviteter 2006, KTH Februar 2007

[Artwohl2008] Artwohl, T.: Informationen zu Glastüren der Fa. Anthony International auf der EUROSHOP 2008 am 27.2.2008 in Düsseldorf

[ASHRAE2002] ASHRAE Handbook 2002: Refrigeration, Chapter 47 Retail Food Store Refrigeration and Equipment. ASHRAE 2002, S. 47.1 – 47.19

[Bader2007] Bader, T.: Email vom 08.12.2007 zum Energieverbrauch von R744-Kälteanlagen in Märkten von Aldi Süd.

[Bakken2007] Bakken, K.: Email von Knut Bakken, vormals Norild AS vom März 2007 zum Thema „Natürliche Kältemittel in norwegischen Supermärkten“

[Behnert2003] Behnert, T., König, H.: Entwicklung eines NH3-Standard-Flüssigkeitskühlsatzes mit minimaler Füllmenge, KK Die Kälte & Klimatechnik, 56. Jahrgang (2003) Heft 6, S. 32 – 37

[BEK2007a] Bremer Energie-Konsens: Lebensmittelhandel aktuell – Energiekosten senken – Umwelt schonen. Ein praktischer Leitfaden für die effiziente Nutzung von Kühlmöbeln. www.energiekonsens.de, 5. Januar 2007

[BEK2007b] Bremer Energie Konsens: Checkliste – Kühlmöbel. www.internet-energie-check.de am 5. 1. 2007

[Bertelsen2002] Bertelsen, P.; Christensen, K.G.; Gøttsch, T.: Anvendelse af naturlige kølemidler i supermarkeder. Miljøprojekt Nr. 658 2002

[Bobbo2005] Bobbo, S.; Camporese, R.; Fedele, L.; Scattolini, M.; La manna, B.: Energetic Performance of Different Expansion Valves in a Supermarket. IIR Commercial Refrigeration Conference, Vicenza, Italien, 30. – 31. August 2005

[Bouchareb2003] Bouchareb, M.; Gibson, J.P.; Lubich, F.: Drehzahlregulierung von Kälteverdichtern mit intelligenten Frequenzumrichtern. Ki Luft- und Kältetechnik 39, 9 (2003), S. 400 – 404

[Boulawz2007] Boulawz Ksayer, E.; Clodic, D.: $CO_2$ ejector refrigeration cycle design, tests and results. IIR $22^{nd}$ International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Brouwers2007] Brouwers, C.: Trends in Supermarket Technology within the EU. International $Co_2$ol Food Conference, Berlin, 23. Mai 2007

[Bucher2007] Gespräch mit Erik Wolfgang Bucher, Linde Kältetechnik GmbH & Co. KG am 14. Februar 2007

[BVL2007] Bundesverband des Deutschen Lebensmittelhandels e.V. (BVL): Lebensmitteleinzelhandel 2006/2007. Berlin 2007

[Cecchinato2007] Cecchinato, L.; et al.: An experimental analysis of a supermarket plant working with carbon dioxide as refrigerant. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Chen2007] Chen, T.; et al.: The realisation and evaluation of utilizing natural cold source in display cabinets system. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Coca-Cola2006] The Coca-Cola Company: 2006 Environmental Performance report. www.thecoca-colacompany.com am 22.11.2007

[Colbourne1999] Colbourne, D.; Blacklock, P.: Limiting HFC-emissions through the use of non-HFC technologies. IPCC-TEAP 1999

[Colbourne2004] Colbourne, D.: Hydrocarbon Refrigerant Safety Short Course. 6th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Glasgow, 2004

[Colbourne2007] Information von Daniel Colbourne per Email am 4. März 2007

[Deru2007] Deru, M.; MacDonald, M.: The Wal-Mart Experience, Part 2. ASHRAE Journal 49, 10 (2007), S. 22 – 27

[DKV2002] Statusbericht de Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr.22: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte. Juni 2002

[DuPont2007] DuPont und Honeywell: HFO-1234yf – A low GWP Refrigerant for MAC. 2nd Int. Workshop on Mobile Air Conditioning and Auxiliary Systems. Turin, Italien, 29. November 2007

[Ecofys2003] Harnisch, J.; et al: Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsischen Eigenschaften. Abschlussbericht 15. Dezember 2003 Z 1.6 – 50 422/195

[EHI2001] EHI – EuroHandelsinstitut GmbH: Handel aktuell 2001. ISBN 3-87257-241-5, 2001

[EHI2007] EHI Retail Institute GmbH: Handel aktuell 2007/8. ISBN 978-3-87257-310-0, 2007

[Elbel2007] Elbel, S.; Hrnjak, P.: Experimental Investigation of Transcritical $CO_2$ Ejector System Performance. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[Engsten2004] Engsten, K.; Lindh, L.: Refrigerant Management: The Issue of Minimizing Refrigerant Emissions. Department of Energy Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2004

[Enova2006] Enova: Kan dere beskrive noen enøktiltak spesielt for dagligvarebutikker? Kulde Scandinavia, 5/2006, S. 18

[Eurostat2004] Eurostat Datenabfrage zu Anzahl Lebensmitteleinzelhandel in EU27. NACE g5211 „Einzelhandel mit Waren verschiedener Art, Hauptrichtung Nahrungsmittel, Getränke und Tabakwaren“ sowie NACE g522 „Facheinzelhandel mit Nahrungsmittel, Getränke und Tabakwaren“ für das Jahr 2004. Abfrage am 22. Februar 2007

[Eurostat2006] Sura, W.: Einzelhandel in der Europäischen Union. Eurostat 2006

[Eurostat2007] Eurostat Pocketbooks: Living Conditions in Europe 2002 – 2005. 2007 Edition, ISBN 92-79-03262-3, 2007

[Faramarzi2004] Faramarzi, R.: Showcasing Energy Efficient Emerging Refrigeration Technologies. Emerging Technologies in Energy Efficiency Summit 2004, 14. – 15. Oktober 2004, San Francisco, CA, USA

[FKT1999] Forschungsrat Kältetechnik e.V.: Dichtheit von Kälteanlagen. Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11340, Dezember 1999

[FKT2003] Forschungsrat Kältetechnik e.V.: Verbesserung der Dichtheit kältetechnischer Erzeugnisse. Studie des FKT, Januar 2003

[FKT2007] Forschungsrat Kältetechnik e.V.: Automatische Dichtheitskontrolle basierend auf den Forderungen der F-Gase-Verordnung. Bericht zum Forschungsvorhaben FKT 118/05, Mai 2007

[Förster2008] Förster, H.: Einsatz von Wärmeübertragern – Energieeffizienzreserven von Kälteanlagen. Die Kälte + Klimatechnik 61, 3 (2008), S. 24 – 34

[Foster2007] Foster, A.M.; Evans, J.A.: Advanced Techniques to understand and improve open-fronted vertical refrigerated display cabinets. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Frogner2005] Frogner, V.: $CO_2$ i dagligvarehandelen. FOKU Seminar, 29.11.2005

[Frommann2006] Frommann, A.: Wie man Betriebskosten halbiert. Kälte Klima Aktuell 1 (2006), S. 50 – 53

[Garry2007] Garry, M.: Split Refrigeration. Supermarket News, Juli 2007, S. 43 – 48

[Gernemann2003] Gernemann, A.: Konzeption, Aufbau und energetische Bewertung einer zweistufigen $CO_2$-Kälteanlage zur Kältebereitstellung in gewerblichen Normal- und Tiefkühlanlagen (Supermarkt). Dissertation Uni Duisburg-Essen, Juni 2003

[Görner2007] Görner, U.: Beitrag von Udo Görner, EPTA beim ersten Treffen des Expertenkreises am 28. Februar in Berlin

[Goetjes2007] Goetjes, H.: Verändern neue AC-Lüfter die Gebäudetechnik? HK-Gebäudetechnik, 3 2007, S. 62 – 63

[Haaf1998] Haaf, S.: Ammoniak Kälteanlagen für Supermärkte. Die Kälte- und Klimatechnik , 8 (1998), S. 520 – 533

[Hägg2005] Hägg, C.: Ice Slurry as secondary fluid in refrigeration systems. KTH Stockholm, Schweden, ISBN 91-7178-192-7

[Haglund2007] Haglund Stignor, C.; Fahlén, P.; Sundén, B.: Design of different types of secondary loop cooling systems in supermarkets – comparison of energy use and cost. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Heinbokel2005] Heinbokel, B.; Gernemann, A.: Eine neuentwickelte $CO_2$-Kälteanlage für den Normal- und Tiefkühlbereich in einem Schweizer Hypermarkt. DKV Jahrestagung 2005, Würzburg

[Heinbokel2006] Heinbokel, B.: Transkritische CO2-Anlagen im Supermarkt. ÖKKV-Jahrestagung, Bregenz 27. – 28. April 2006

[Hellsten2007] Hellsten, J.: Gespräch mit Jan Hellsten von Temper am 7. März 2007

[Hoehne2004] Hoehne, M.; Hrnjak, P.: Charge minimization in hydrocarbon systems. IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids 2004, Glasgow, UK

[Höpfer2007] Höpfer, A.: Emails von Albrecht Höpfer von Bitzer am 12. und 22.10.2007

[Hoglund2006] Hoglund, R.: FMI/CRMD Supermarket refrigerant leak reduction taskforce. FMI 2006 Energy and Technical Services Conference

[Huchet2007] Huchet, A.; Hermon, C.; Morio, Y.: Containment of Refrigeration Installations - Results of Studies. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[IPCC1996] Climate Change 1995 – The Science of Climate Change, IPCC Second Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge 1996

[IPCC/TEAP2005] IPCC/TEAP Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. Cambridge University Press 2005, ISBN 978-0521682060

[IRI2006] Information Resources Inc.: Grundgesamtheiten Deutschland 2006. verantwortlich S. Öhring, Information Resources GmbH (2006).

[IRI2007] Information Resources Inc.: Perspektiven 2007 – Die Herausforderungen für den LEH.

[Jakobs2006] Jakobs, R.: Ein Beitrag zur Marktentwicklung von Supermärkten. DKV-Tagung 2006, Dresden

[Jakobs2007] Jakobs, R.: Country presentation DE - Characteristic Quantities. IEA Annex 31 supermarket short course / Workshop während des 22. Internationalen Kältekongresses des IIR in Peking, China, 25. 8. 2007

[Jansson2004] Jansson, D.: Vem är Vem. ICA Förlaget AB, Schweden (2004)

[Jensen2007] Jensen, F.: Telefongespräch mit Frank Jensen, Miljøstyrelsen zum Thema „dänische $CO_2$-Steuern“, April 2007

[Johansen2006] Johansen, E.: Energiriktige kuldeleveranser til dagligvarehandelen. FOKU 5.12.2006

[Jürgensen2004] Jürgensen, H., Nielsen, O.K., Tiedemann, T.: Application Related Design of Hermetic Propane Compressors for Small Refrigeration Systems. Proc. IIR Compressors Conference 2004, Castá Papiernicka, 29.9. – 1.10.2004

[Kaltenbrunner2007] Gespräch mit Bernd Kaltenbrunner, KWN KÄLTE-WÄRME-NUTZUNG Engineering GmbH, Sommerweg 13, A 5201 Seekirchen, Österreich, Tel +43 (0) 6212 7833, Fax +43 (0) 6212 7833 14, Email: office@kwn.at, am 10.1.2007 und am 13.7.2007

[Kauffeld1993] Kauffeld, M.: Untersuchung von Kaltluftprozessen unter besonderer Berücksichtigung kleiner Kompressions- und Expansionsmaschinen. DKV-Forschungsbericht Nr. 39, 1993, ISBN 3-922-429-40-8

[Kauffeld1996] Kauffeld, M.: Anwendung von Kohlenwasserstoffen in der Transportkälte. Ki Luft- und Kältetechnik 32, 3 (1996), S. 107 – 110

[Kauffeld1998a] Kauffeld, M., Hansen, S.: Kleine Ammoniak-Kälteanlage. Ki Luft- und Kältetechnik 34, 6 (1998), S. 278 – 283

[Kauffeld1998b] Kauffeld, M.; Indirekte Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik, 9 (1998), S. 702 – 712

[Kauffeld1999] Kauffeld, M.; Christensen, K.G.; Lund, S.; Hansen, T.: Experience with ice slurry. XXth Int. Cong. of Refr., Sydney, Australia, 19. – 24. September 1999

[Kauffeld2000] Kauffeld, M.: Energiesparsamer Getränkekühler. ki Luft- und Kältetechnik, 11 (2000), S. 563 – 564

[Kauffeld2002] Kauffeld, M.; Bertelsen, P.; Hansen, T.M.; Christensen, K.G.: $CO_2$-Anwendungen in Dänemark. Ki Luft- und Kältetechnik, 38, 1 (2002), S. 27 – 32

[Kauffeld2004] Kauffeld, M.: $CO_2$ als Kältemittel in Klimasystemen und Wasserkühlern. CCI, Juni 2004

[Kauffeld2005] Kauffeld, M.; Kawaji, M., Egolf, P.W.; et al.: Handbook on Ice Slurries. International Institute of Refrigeration, (2005) ISBN 2-913149-42-1

[Kaufmann1994] Kaufmann, U.; Walter, A.; Ackermann, R.: Kühlmöbel und Kälteanlagen in Lebensmittelgeschäften – Energie und Kosten

sparen. Impulsprogramm RAVEL. Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1994

[KBW1996] Klimaschutzagentur Baden-Württemberg: Energieeinsparung im Lebensmitteleinzelhandel, 1996

[Khmelnyuk2007] Khmelnyuk, M.; et al.: Experimental research of the refrigerating machine working on mixes on the basis of ammonia. IIR Ammonia Refrigeration Technology for Today and Tomorrow Conference, Ohrid, Macedonia, 19. – 21. April 2007

[Koch2007] Koch Edeka Aktiv Märkte: Umwelterklärung 2007

[Krauss2007] Krauss, D.: Use of ammonia/dimethyl ether (Schick R723®) blend in medium refrigeration plants. IIR Ammonia Refrigeration Technology for Today and Tomorrow Conference, Ohrid, Macedonia, 19. – 21. April 2007

[Kröger2007a] Kröger, J.: Fortschritte in der Kältetechnik – geringer Energieverbrauch ist gefragt. Kälte Klima Aktuell, 1 (2007), S. 70

[Kröger2007b] Kröger, J.: Schneller R22-Ersatz mit R422D. Die Kälte- und Klimatechnik, 11 (2007), S. 28 - 32

[Kusakari2006] Kusakari, K.: The spread situation and the future view of the $CO_2$ Refrigerant Heat Pump Water Heater in Japan. 7$^{th}$ IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, 28. – 31. Mai 2006, Trondheim, Norwegen

[KWN2004] KWN Engineering: Testreihe Glastüren für Wandkühlregale REMIS bei AGM Österreich. 2004

[Lagrabette2005] Lagrabette, O.: Kältetechnik im Einzelhandel – Carrefour setzt auf die “grünen” Medien. KKA 1 (2005), S. 20 – 24

[Lambertz2008] Lambertz, W.: Mehrwert mit System. Stores + Shops 1 (2008), S.42 – 48

[Larsen2007] Larsen, L.F.S.; et al.: Anti-synchronizing control for supermarkte refrigeration systems. IIR 22$^{nd}$ International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Li2008] Li, X.; Zhu, D.S.; Wang, N.; Zeng, X.C.: Influence of door openings on temperature fluctuation and energy consumption of refrigerated

display cabinet. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[Litch1999] Litch, A., Hrnjak, P. (1999): Condensation of Ammonia in Microchannel Heat Exchangers University of Illinois, Air Conditioning and Refrigeration Center, ACRC CR-22

[Loose2006] Loose, P.: Erdwärmenutzung. C.F. Müller Verlag, 1. Aufl. (2006), ISBN 3-7880-7796-4

[LZD2005] Lebensmittel Zeitung Direkt: Cooler Wettbewerb, 1 (2005)

[M&S2007] Marks & Spencer: Climate Change. http://www.marksandspencer.com/gp/browse.html/ref=sc_fe_c_9_1_51360031_1?ie=UTF8&node=54763031&no=51360031&mnSBrand=core&me=A2BO0OYVBKIQJM am 30.11.2007

[Maaten2007] Maaten, H.v.d.: Reduzierung von Leckagen. Kälte Klima Aktuell 2 (2007), S. 58 - 59

[MacDonald2007] MacDonald, M.; Deru, M.: The Wal-Mart Experience, Part 1. ASHRAE Journal 49, 9 (2007), S. 14 – 25

[McDonald's2004] McDonald's: COOL – The world's first HFC-free McDonald's restaurant. (2004), http://www.refrigerantsnaturally.com/docs/20060425090000.pdf am 30.11.2007

[Madsen2007] Madsen, K.B.: Persönliches Gespräch am 11.4.2007 in Aarhus, Dänisches Technologisches Institut

[Mali1995] Mali, M.: Erfahrungen und Besonderheiten von Kälteanlagen und Wärmepumpen, die mit dem Kältemittel R290 arbeiten. in Petz, M.: Kohlenwasserstoffe als Kältemittel, Expert-Verlag 1995, ISBN 3-8169-1186-2, S. 59 – 69

[Manz2008] Manz, K.: Heizenergie aus der Kälte. Stores + Shops, 1 (2008), S. 116 - 118

[Melinder1997] Melinder, Å.: Thermophysical Properties of Liquid Secondary Refrigerants. Int. Inst. Refr. 1997

[Melinder2007] Melinder, Å.: Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids, Königliche Technische Hochschule Stockholm, Schweden, Verteidigung im Juni 2007

[Metro2007] Metro Group: Beispielhaft – Corporate Social Responsibility. 2007, http://www.metrogroup.de/servlet/PB/show/1133540/Verantw-Beispielhaft.pdf am 30.11.2007

[Migros2007] Migros Magazin: Nachhaltigkeit in der Migros – Wir tun was! Sonderheft 2007

[Minea2007] Minea, V.: Energy Efficiency of a Supermarket Refrigeration/Heat Recovery System with Secondary Fluids. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[Minergie2007] Anwendungshilfe Minergie, Teil 2 – Kapitel 2, Stand Januar 2007

[Minor2007] Minor, B.H.: DuPont DP-1 Next Generation Refrigerant MAC Global Industry Solution. VDA Winter Meeting, Saalfelden, 14. Februar 2007

[Møller2003] Møller, J.B.: $CO_2$ is keeping Supermarkets Cool. The NEWS. 8. 12. 2003

[Nüssle2008] Nüssle, F.: Energie im Doppelpack. Vortrag auf der Vortragsveranstaltung Energieeffizienz im Lebensmittel-Einzelhandel. 19.02.2008, Haus der Wirtschaft Baden Württemberg, Stuttgart

[Perti2007] Perti, D.; Baxter, V.: US Summary Tasks 1 and 2. IEA Annex 31 supermarket short course während des 22. Internationalen Kältekongresses des IIR in Peking, China, 25. 8. 2007

[Post2007] Post: Gespräch mit Herrn Post, Linde am 7.2.2007 im Gebauer EDEKA aktiv Markt Filderstadt.

[Pries2008] Pries, A.: Energieeffizienz-Steigerung. Was ist in bestehenden Märkten wirtschaftlich sinnvoll? Vortrag auf der Vortragsveranstaltung Energieeffizienz im Lebensmittel-Einzelhandel. 19.02.2008, Haus der Wirtschaft Baden Württemberg, Stuttgart

[Quack2004] Quack, H., Riha, J.: $CO_2$ Expander. IIR Gustav Lorentzen Conf., Glasgow, 2004

[Quack2007] Quack, H.: Persönliches Gespräch am 11.1.2007. TU Dresden

[Radermacher2007] Radermacher, R., Yang, B.; Hwang, Y.: Integrating Alternative and Conventional Cooling Technologies. ASHRAE Journal, 10 (2007), S. 28 - 35

[Raetz2003] Raetz, M.: Hybridkühler. Kälte Klima Aktuell 6 (2003), S. 42 – 46

[Rees2007] Rees, B.; Rohrer, C.; Shapiro, D.; Trachta, J.: Performance testing and comparison of liquid overfeed and cascade $CO_2$ systems with R404A primary. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007, B2-123

[Rewe2007] Rewe: REWE startet neues Kleinflächenkonzept. Pressemeldung der Rewe Group vom 4.12.2007

[Rivet2007] Rivet, P.: Move to HFC 410A in Refrigeration Applications. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[RP2007] Die Rheinpfalz Nr. 215, 15. September 2007, S. 4

[Salem2007] Salem, K.M.: Energiemanagement in der Kälte- und Klimatechnik und Maßnahmen zur Energieeinsparung. ki Luft- und Kältetechnik 43, 5 (2007), S. 32 – 34

[Sawalha2007] Sawlha, S.; et al.: Experimental investigation of $NH_3/CO_2$ cascade system and comparison to R404A system for supermarket refrigeration. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[SCE2007] Southern California Edison – SCE: Diverse Dokumente zu Energiesparen im Supermarkt unter http://www.sce.com/RebatesandSavings/DesignandEngineering/RTTC/ResearchProjects/SupermarketSummaries/

[Schadt2007] Schadt, J.: Informationen zu verschiedenen Lidl Aktivitäten zum Klimaschutz per Email am 30.11.2007 und 12.12.2007

[Schauer2007] Schauer, A.: Informationen von Andi Schauer, Hauser GmbH via Email am 2. April 2008

[Schenk2007] Schenk, M.: Informationen von Mats Schenk, Fa. Frigotech bei einem Besuch in zwei Supermärkten in Stockholm, Schweden am 8. Juni 2007

[Schmidt2007a] Schmidt, R.: Schmidt von der Firma REWE beim ersten Expertenkreistreffen am 28. Februar 2007 in Berlin sowie in diversen Emails

[Schmidt2007b] Schmidt, R.: Technologieauswahl aus Sicht der REWE Group. Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2007, Hannover, 22. – 23. November 2007

[Schmutz2007] Schmutz, B.: Informationen von Beat Schmutz, Schmutz, Starkl und Partner via Email im März und September 2007

[Schnase2007] Schnase, B.: Email von Berthold Schnase, Bock, vom 15. November 2007

[Schneider2007] Schneider, H.: Gespräch mit Holger Schneider, Geschäftsführer Aldi Süd Mönchengladbach am 18.1.2007 während der Besichtigung zweier Aldi-Supermärkte mit R744

[Schuster2007] Schuster, M.; Krieger, T.: Open Vertical Cabinet (Multi-Deck) with sequential air curtain for better temperature and merchandizing performance. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Sieber2006] Sieber, F.: Energiesparender Verdichterbetrieb durch innovatives Zubehör. ki Luft- und Kältetechnik 42, 4 (2006), S. 128 - 132

[Sienel2007] Sienel, T.; Finckh, O.: $CO_2$-DX Systems for medium- and low-temperature refrigeration in supermarket applications. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[SN2008] Supermarket News: SN's Top 75 Retailers for 2008 – Top 75 North American Food Retailers. http://supermarketnews.com/profiles/2008-top-75/index.html am 21.02.2008

[Spoonley1999] Spoonley, P.: Technological and social changes into the third millennium.
20th IIR International Congress of Refrigeration, Sydney, 1999

[Stenhede2007] Stenhede, C.: Heat Exchangers in Carbon Dioxide Cascade Systems. ScanRef 3 (2007), S. 36 – 41

[Sturm2008] Sturm, T.: Informationen zu Glastüren der Fa. Schott Thermofrost auf der EUROSHOP 2008 am 27.2.2008 in Düsseldorf

[Summerer2007] Summerer, F.: Energiesparen auf der Niederdruckseite. ki Luft- und Kältetechnik 43, 10 (2007), S. 18 – 23

[Tambovtsev2007] Tambovtsev, A.; Quack, H.: COP improvement by transfer of the superheat into the internal heat exchanger. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007, B2-1406

[Tesco2007] Tesco: We're doing more to use less energy. http://www.tesco.com/greenerliving/what_we_are_doing/reducing_energy_use/default.page? am 30.11.2007

[test2007] Stiftung Warentest: Sparen beim Pumpen. test 9 (2007), S. 76 - 79

[Toll2007] Toll- og Afgiftsdirektoratet: Avgift på Hydrofluorkarboner (HFK) og Perfluorkarboner (PFK) 2007. Rundskriv nr. 7/2007 S, Oslo 12. Januar 2007

[Toscano1982] Toscano, W.M.; et al.: Design and laboratory testing of an unequal parallel multicompressor supermarket refrigeration system with a microprocessor-based electronic control system. ASHRAE Summer Meeting, Toronto, Kanada, 27. Juni – 1. Juli 1982

[UNEP2006] Kuijper, L. et al: 2006 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC) – 2006 Assessment. UNEP März 2007

[VDA2007] Verband der Automobilindustrie: Alternative Refrigerant Winter Meeting. Saalfelden, Österreich, 14. – 15. Februar 2007. http://www.vda-wintermeeting.de/

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 – 33

[Vogelbacher2007] Vogelbacher, Steffen, Fa. Daikin, persönliches Gespräch am 20. März 2007

[Walker1999] Walker, D.: Development and demonstration of an advanced supermarket refrigeration system. Oak Ridge National Laboratory, ORL-SX363C-FM-97163-1231, März 1999

[Wal-Mart2007] Wal-Mart: Sustainability Progress to Date 2007-2008. 15. November 2007

[Warthmann2006] Warthmann, P.: Magnetische Kühlung bei Raumtemperatur. HK-Gebäudetechnik 4, 4 (2006), S. 26 – 30

[Weber2000] Weber Shandwick Worldwide: What Consumers want from a brand; Daten für Deutschland durch: Infratest Burke, 6.-9. Oktober 2000, http://www.umweltservice.de/news/2001/372.html

[Wendelborn2008] Wendelborn, H.: Vorausberechnung und Messung der Energieeffizienz - Optimierung der Arbeitstemperaturen $t_0$ und $t_C$. Die Kälte und Klimatechnik 61, 4 (2008), S. 36 - 38

[Yellen2002] Yellen, D. et al.: Assessment of the Costs & Impact on Emissions of Potential Regulatory Frameworks for Reducing Emissions of HFCs, PFCs & $SF_6$. Enviros Consulting Ltd., 2002

[Zeller2006] Zeller, A.: Energiesparendes Kälte-Klima-Kombisystem für den Convenience-Store. KK , 5 (2006) S. 22 – 30

[Zimmermann2007] Zimmerman, L.: Low-cost, energy-saving, flooded-evaporator-technology. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Zoughaib2005] Youghaib, A.; Clodic, D.: Energy performances using ammonia as refrigerant in a large supermarket. IIR Ammonia Refrigerating Systems Conference, Ohrid, Macedonia, 2005

# „VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER KLIMARELEVANZ VON KÄLTEANLAGEN UND -GERÄTEN FÜR DEN SUPERMARKT“ (FKZ 206 44 300)

## Bilanzierung und Bewertung

Jan-Martin Rhiemeier, Dr. Jochen Harnisch

Ecofys Germany GmbH, Nürnberg

# Inhalt

**1. Einleitung** **155**
2. Formate und Vorgehensweise 156
2.1 Auslegungsvarianten der Ladenformate 156
2.2 Entwicklung von Politikszenarien zur Abbildung verschiedener Verlustraten 158
2.3 TEWI-Berechnungen - Methoden 163
2.4 Unsicherheitsbetrachtung 164
3. Datenbasis 166
3.1 Datenbasis im Discounter 168
3.2 Datenbasis Verbrauchermarkt 172
3.3 Datenbasis SB-Warenhaus 177
4. Kostendaten 180
5. Ergebnisse 185
5.1 TEWI-Analysen 185
5.2 Klimarelevanz des deutschen Lebensmitteleinzelhandels 213
5.3 Vermeidungskosten 217
5.4 Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die EU-27 227
6. Zusammenfassung 229
7. Literaturverzeichnis 232

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| COP | Kälteleistungszahl (coefficient of performance) |
| $CO_2$-Äqu. | Kohlendioxidäquivalente |
| GWP | Global Warming Potential |
| HFKW | Teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe |
| kWh | Kilowattstunde |
| LCCP | Life Cycle Climate Performance |
| LEH | Lebensmitteleinzelhandel |
| NK | Normalkühlung |
| R290 | Propan |
| R717 | Ammoniak ($NH_3$) |
| R744 | Kohlendioxid ($CO_2$) |
| R125 | Pentafluorethan, $C_2HF_5$ |
| R134a | 1, 1, 1, 2-Tetrafluorethan ($C_2H_2F_4$) |
| R143a | 1, 1, 1-Trifluorethan |

| | |
|---|---|
| R404A | Gemisch aus R125 (44 %), R134a (4 %) und R143a (52 %) |
| t | metrische Tonnen |
| TEWI | Total Equivalent Warming Impact |
| THG | Treibhausgas |
| TK | Tiefkühlung |

# 1. Einleitung

Die Bilanzierung und Bewertung wird für drei definierte Ladenformate und verschiedene Kälteanlagen durchgeführt. Sowohl Ladenformate als auch die betrachteten Modelltechnologien wurden im Vorfeld bei einem ersten Fachgespräch im Rahmen des Projektes mit Experten aus Einzelhandel und Kältetechnik abgestimmt. Ziel dieses Abschnittes ist es, eine vergleichende Übersicht der Klimarelevanz verschiedener Kühlkonzepte im Einzelhandel zu erstellen. Hierfür wird für die verschiedenen Kälteanlagen der so genannte „Total Equivalent Warming Impact“ (TEWI) berechnet. Der TEWI-Wert einer Kälteanlage beschreibt die indirekten Emissionen der Anlage aus ihrem Energieverbrauch und die direkten Emissionen der Anlage, die aus dem Einsatz klimarelevanter Kältemittel resultieren. Im Rahmen des Projektes werden darauf spezifische Vermeidungskosten für ausgewählte Emissionsreduktions-maßnahmen abgebildet.

Sämtliche Inputdaten der TEWI-Analysen und Vermeidungskostenberechnungen wurden auf einem zweiten Fachgespräch Anfang Oktober 2007 in Bonn mit den bereits beim ersten Treffen in Berlin anwesenden sowie weiteren Vertretern aus Kältetechnik und Einzelhandel abgestimmt.

Die Emissionen des deutschen Lebensmitteleinzelhandels (LEH) in Verbindung mit Stromverbrauch und Kältemittelemissionen machen derzeit etwa 1 % der bundesdeutschen Treibhausgasemissionen aus (vgl. Kapitel 5.2). Neben dem hohen Energieverbrauch kältetechnischer Anlagen (gut 50 % des Gesamtenergieverbrauchs eines Marktes [Bremer2006]), stammt ein Großteil der Emissionen aus der Verwendung HFKW-haltiger Kältemittel mit ihrem Treibhauspotential.

# 2. Formate und Vorgehensweise

Die Struktur des Lebensmitteleinzelhandels in Deutschland ist heterogen. Die Marktlandschaft reicht vom kleinen Supermarkt im Stadtkern bis zum SB-Warenhaus auf der grünen Wiese. Dementsprechend unterschiedlich ist auch die installierte Kältetechnik in den unterschiedlichen Ladenformaten. Um einen möglichst repräsentativen Blick auf die Treibhausgasemissionen in Verbindung mit Supermarktkälteanlagen zu gewinnen, werden die Betrachtungen dieser Studie für drei gängige Ladenformate ausgeführt. Diese wurden gemeinsam mit Vertretern des Lebensmitteleinzelhandels während des ersten Fachgesprächs Ende Februar 2007 in Berlin abgestimmt (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Ausgewählte Ladenformate**

| Ladenformat | Verkaufsfläche | Food-Anteil | Lfd. Meter Kühlmöbel NK | Lfd. Meter Kühlmöbel TK |
|---|---|---|---|---|
| Discounter | 800m$^2$ | Ca. 95% | 22,5 m | 40 m |
| Verbrauchermarkt | 1.500m$^2$ | Ca. 95% | 50 m | 40 m |
| SB-Warenhaus | 6.000m$^2$ | Ca. 70% | 95 m | 150 m |

## 2.1 Auslegungsvarianten der Ladenformate

Um die Klimarelevanz der verschiedenen Ladenformate je nach verwendeter Kältetechnologie aufzuzeigen, wird für jedes Ladenformat die Verwendung unterschiedlicher Kälteanlagen betrachtet.

Discountmärkte heben sich nicht nur durch ihr schmaleres Sortiment von anderen Formaten des Lebensmitteleinzelhandels ab, sondern auch durch eine relativ standardisierte Kältetechnik, vor allem für den Tiefkühlbereich.
Es finden in der Regel zentrale Direktverdampfungsanlagen mit HFKW für Pluskühlung und Tiefkühlräume Anwendung.
Zur Tiefkühlung im Verkaufsraum werden steckerfertige, hermetische Tiefkühltruhen verwendet. Als Kältemittel für diese bei Discountern eingesetzten Truhen hat sich in

den letzten Jahren R290 (Propan) durchgesetzt. Tabelle 3 zeigt die relevanten Kälteanlagen für die Untersuchungen dieser Studie.

**Tabelle 3: Betrachtete Kälteanlagen für Discounter**

| | |
|---|---|
| **I.** | Direktverdampfungsanlage mit R404A für Normalkühlung (NK) + steckerfertige R290 Kühltruhen für Tiefkühlung (TK) |
| **II.** | Direktverdampfungsanlage mit R134a für NK + steckerfertige R290 Kühltruhen für TK |
| **III.** | Indirekte Kälteanlage mit Kohlenwasserstoff (R290) und flüssigem Kälteträger für NK + steckerfertige R290 Kühltruhen für TK |
| **IV.** | R744 ($CO_2$) Direktverdampfungsanlage für NK + steckerfertige R290 Kühltruhen TK |

Klassische Supermärkte, Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser bieten in der Regel ein deutlich breiteres Sortiment an kühlbedürftigen Waren als Discounter. Entsprechend umfangreicher und komplexer sind auch deren kältetechnischen Anlagen. Heutiger Standard in der deutschen Marktlandschaft sind für diese Ladenformate üblicherweise direkt-verdampfende Verbundkälteanlagen, die größtenteils den HFKW R404A als Kältemittel verwenden. Die Kälte wird außerhalb des Verkaufraumes in der eigentlichen Kälteanlage erzeugt und dann über ein häufig weit verzweigtes Rohrleitungssystem zu den Kühlmöbeln in den Verkaufsraum transportiert.

In Tabelle 4 sind die jeweiligen Kälteanlagen für Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser zusammengefasst, deren Klimarelevanz im Rahmen der vorliegenden Studie untersucht wird.

**Tabelle 4: Betrachtete Kälteanlagen für Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser**

| | |
|---|---|
| **Ia.** | R404A Direktverdampfungsanlage für NK und TK |
| **Ib.** | Direktverdampfungsanlage mit R134a für NK und R404A für TK |
| **IIa.** | R404A Direktverdampfung für NK und R744-Kaskade für TK |
| **IIb.** | R134a Direktverdampfung für NK und R744-Kaskade für TK |
| **III.** | Ammoniak indirekt mit flüssigem Kälteträger |
| **IVa.** | R717 (Ammoniak)/$CO_2$ Kaskade mit Verteilung NK über verdampfendes $CO_2$ |
| **IVb.** | KW/$CO_2$ Kaskade mit Verteilung NK über verdampfendes $CO_2$ |
| **V.** | Direktverdampfung R744 ($CO_2$) für NK und TK |

## 2.2 Entwicklung von Politikszenarien zur Abbildung verschiedener Verlustraten

Kältemittelverluste treten an allen Kälteanlagen auf. Der Umfang der durch Leckagen hervorgerufenen Verluste hängt von der Komplexität der Kälteanlage, den Betriebsbedingungen, der Wartung und vielen weiteren Faktoren ab. So neigen fabrikgefertigte Systeme weniger zur Leckage als solche, die vor Ort aus Komponenten zusammengebaut werden, insbesondere wenn bei letzteren Schraubverbindungen eingesetzt werden. Bei neuen Verbundkälteanlagen sind die Anzahl der Schraubverbindungen stark reduziert, sowie Problemstellen für Schwingungsrisse beseitigt [Görner2007].

Neben Leckagen treten, vor allem an großen Verbundkälteanlagen, immer wieder auch Havarien auf, die zu einem Totalverlust des Kältemittels führen. Havarien entstehen beispielsweise aufgrund von unsachgemäßer Behandlung von Anlagen oder durch Materialermüdung von Bauteilen besonders alter Anlagen.

Durch Havarien verursachte Kältemittelverluste sind in den Politikszenarien mit berücksichtigt, sodass im Folgenden der Begriff Verlustrate verwendet wird.

Schaut man sich berichtete Verlustraten in der Literatur an, findet man Werte von 3-22 % für unterschiedliche Länder. Eine Übersicht über berichtete Verlustraten aus verschiedenen Staaten ist im „*IPCC/TEAP Special Report on Safeguarding the Ozone Layer an the Global Climate System*“ zu finden. Demnach sind in Deutschland jährliche Kältemittelverlusten von 5 – 10 % zu verzeichnen [IPCC/TEAP2005]. Eine dänische Studie aus dem Jahr 2003 berichtet für Dänemark Verlustraten für Supermarktkälteanlagen von 10 % [Pedersen2003]. Aus Norwegen werden 14 % gemeldet [Bivens2004]. Ebenfalls 14 % stehen für Großbritannien und Zahlen aus den Vereinigten Staaten von Amerika variieren zwischen 13 % und 22 % [IPCC/TEAP2005].

Im Jahr 1999 wurden im Auftrag des Forschungsrat Kältetechnik e. V. 62 gewerbliche Kälteanlagen, insbesondere in Supermärkten, in Hessen und Sachsen bezüglich ihrer spezifischen Kältemittelverluste untersucht. Hier wurde ein mittlerer spezifischer Kältemittelverlust von 10,5 % pro Jahr ermittelt [FKT1999].

Mit besonders niedrigen Werten fallen die Niederlande mit einer berichteten Verlustrate von 4,5 % pro Jahr auf. Diese im Vergleich zu den anderen Werten sehr geringe Verlustrate ist dem Vernehmen nach das Ergebnis eines seit 1992 in den Niederlanden angewandten Programms zur Regulierung von Kältemitteln namens STEK [Yellen2002].
Die Effektivität von STEK und die berichteten Verlustraten sind jedoch nicht unumstritten. Je nach Interpretation der berichteten spezifischen Kältemittelverluste steigen die berichteten 4,5 % auf bis zu 12,6 % an [Anderson2005].

Eine vollkommen dichte Anlage gibt es nicht. Prinzipiell sind Verlustraten einer einzelnen Anlage von unter 1 % bis weit über 100 % im Jahr möglich, da bei unvorhersehbaren Havarien das komplette Kältemittel entweichen kann. Hauptaugenmerk muss es daher sein, potentielle Leckagen so gering wie möglich zu halten und Havarien so gut wie möglich zu vermeiden.
Aufgrund der großen Differenzen der Literaturdaten werden hier für die einzelnen Szenarien plausible, aber für Deutschland nicht repräsentativ empirisch abgesicherte Annahmen für Kältemittelverlustraten getroffen.

### 2.2.1 Szenario 1 – Aktuelle Situation im Jahr 2006

Szenario 1 spiegelt die Referenzsituation vor erfolgreicher Umsetzung des neuen EU Rahmens in Deutschland wieder. Die jährlichen Verlustraten einer Kälteanlage mit HFKW liegen bei 10 % der Kältemittelfüllmenge.
Ein Bewusstsein für den verantwortungsvollen Umgang mit kältetechnischen Anlagen ist bereits vorhanden. Regelmäßige Wartungen finden maximal einmal pro Jahr statt, wodurch mögliche Leckagen erst sehr spät entdeckt werden.

Der Entsorgungsverlust bei Demontage der Anlagen wird mit etwa 15 % der erstmaligen Füllmenge angenommen (entspricht bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren einem jährlichen Verlust von 1,5 %). Bei der Befüllung der Anlagen kommt es zu geringen Verlusten, die aber 1,5 % nicht überschreiten dürften. Bezogen auf eine Lebensdauer von 10 Jahren ergeben sich 0,15 % jährlich. Jährliche Verlustraten, Entsorgungsverluste und geringe Kältemittelverluste bei der Befüllung von Anlagen ergeben zusammen eine jährliche Verlustrate von **11,65 %** der Kältemittelfüllmenge.

Für steckerfertige Systeme wird für alle drei gezeigten Politikszenarien eine Verlustrate von jährlich 1,5 % angenommen. Diese Systeme werden fabrikgefertigt ausgeliefert und sind vom Prinzip sehr dicht. Zu größeren Verlusten kommt es in der Regel nur bei Beschädigung der Rohrleitungen durch unsachgemäße Behandlung. Auch bei der Entsorgung der Geräte kann es zu weiteren Verlusten kommen.

### 2.2.2 Szenario 2 – Verbesserte zukünftige Situation mit optimaler Dichtigkeit aufgrund der am 4. Juli 2006 in Kraft getretenen EU-F-Gas-Verordnung

In Szenario 2 wird für diese Studie angenommen, dass durch die konsequente Umsetzung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase vom 17. Mai 2006 (F-Gas-Verordnung) in naher Zukunft jährliche Verlustraten von kältetechnischen Einrichtungen mit HFKW von bisher 10 % auf 5 % zurückgehen werden.

Die niedrigere jährliche Verlustrate resultiert aus der in der F-Gas Verordnung verankerten, verpflichtenden Dichtheitsprüfung für Anlagen ab einer Füllmenge von 3 kg fluorierter Treibhausgase. Anwendungen mit 30 kg fluorierten Treibhausgasen oder mehr werden mindestens einmal alle sechs Monate auf Dichtheit kontrolliert. Anwendungen mit 300 kg fluorierten Treibhausgasen oder mehr werden mindestens einmal alle drei Monate auf Dichtheit kontrolliert (Art. 3 Abs. 2-4) und mit einem Leckage-Erkennungssystem versehen.
Zudem muss zukünftig sichergestellt sein, dass Wartungsarbeiten durch zertifiziertes und somit qualifiziertes Personal durchgeführt werden (Art. 5).
Weiterhin sind Betreiber von Anlagen mit einer Füllmenge > 3 kg gemäß Art. 3 Abs. 6 ab Juli 2007 verpflichtet, sog. Anlagen-Logbücher zu führen. In den Logbüchern sind von Anlagenbetreibern Menge und Typ des Kältemittels, nachgefüllte Mengen sowie die bei Wartung, Instandhaltung oder Entsorgung zurückgewonnenen Mengen zu dokumentieren. Ferner führen Sie darin Aufzeichnungen zur Identifizierung des Unternehmens oder des technischen Personals, das die Wartung oder Instandhaltung vorgenommen hat. Außerdem werden Aufzeichnungen über die Termine und Ergebnisse der Kontrollmaßnahmen gemäß den Absätzen 2, 3 und 4 der Verordnung geführt.

Art. 4 der Verordnung schreibt die Kältemittelrückgewinnung durch zertifiziertes Personal vor. Daher sinkt unter konsequenter Umsetzung der EU-F-Gas-Verordnung in unseren Annahmen auch der Entsorgungsverlust bei Demontage der Anlagen auf 10 % der erstmaligen Kältemittelfüllmenge (jährlich 1,0 %). Befüllungsemissionen bei Installation der Anlagen bleiben mit 1,5 % der Anfangsfüllmenge gleich (0,15 % jährlich). Entsprechend der oben getroffenen Annahmen ergibt sich für Szenario 2 damit eine jährliche Verlustrate von 6,15 %.

### 2.2.3 Szenario 3 – Verbesserte Situation mit optimaler Dichtigkeit gemäß VDMA Einheitsblatt 24243-1

Im VDMA Einheitsblatt 24243-1 werden in einem Zweistufenplan zulässige spezifische Kältemittelverluste für neue Kälteanlagen nach DIN EN 378-1 mit HFKW-Kältemitteln empfohlen. Dies sieht vor, die zulässigen jährlichen Verluste wie folgt zu reduzieren:

**Erste Stufe verbindlich seit 30.06.2005**

- Füllmenge < 10 kg - zulässiger spez. Kältemittelverlust ≤ 6 %
- Füllmenge 10-100 kg - zulässiger spez. Kältemittelverlust ≤ 4 %
- Füllmenge >100 kg - zulässiger spez. Kältemittelverlust ≤ 2 %

**Zweite Stufe verbindlich ab 30.06.2008**

- Füllmenge < 10 kg - zulässiger spez. Kältemittelverlust ≤ 3 %
- Füllmenge 10-100 kg - zulässiger spez. Kältemittelverlust ≤ 2 %
- Füllmenge >100 kg - zulässiger spez. Kältemittelverlust ≤ 1 %

Aufgrund der Empfehlungen des VDMA-Einheitsblatts wird daher für Szenario 3 angenommen, dass sich die jährliche Verlustrate weiter reduziert und bei 2 % liegt.

Auch wenn VDMA Einheitsblatt 24243-1 keine speziellen Anforderungen an die Demontage der Kälteanlagen stellt, nimmt Szenario 3 eine weitere Reduzierung der Entsorgungsverluste auf 5 % an (jährlich 0,5 %). Emissionen bei Befüllung der Anlagen bleiben allerdings konstant und werden mit 1,5 % angenommen (jährlich 0,15 %). In der Summe ergibt sich entsprechend der oben getroffenen Annahmen somit für Szenario 3 eine jährliche Verlustrate von 2,65 %.

In den Vorgaben des VDMA wird nicht näher auf unvorhersehbare Kältemittelverluste durch Havarien eingegangen. Grundsätzlich sind diese jedoch nie vollkommen zu vermeiden (vgl. Kapitel 2.2). Im vorliegenden Szenario wird allerdings die Annahme getroffen, dass in einem Szenario mit optimaler Anlagendichtigkeit auch das Risiko möglicher Havarien bis auf ein Minimum gesenkt wird, da durch verbesserte Anlagenkonstruktion, regelmäßige, in kurzen Abständen durchgeführte präventive Wartungen und verantwortungsvollen Umgang durch qualifiziertes Personal Havarien nur noch sehr selten auftreten. Um das sehr ambitionierte Ziel einer Verlustrate von lediglich 2,65 % im Jahr zu erreichen, ist daher ein hohes Maß an Einsatz und technischem Know-how aller Anlagenbetreiber, Kälteanlagenbauer und des Wartungspersonals unentbehrlich.

## 2.3 TEWI-Berechnungen - Methoden

Der sog. **T**otal **E**quivalent **W**arming **I**mpact (TEWI) einer kältetechnischen Anlage beschreibt die Summe aus indirekten Emissionen der Anlage aus dem Energieverbrauch und direkten, durch Kältemittelverlust verursachten Emissionen. Im Gegensatz zu einer Life Cycle Climate Perfomance (LCCP) Betrachtung bei der auch die Emissionen aus dem Energieaufwand für die Produktion der Anlage und weitere bei der Produktion der Kälteanlage verursachten Treibhausgasemissionen einbezogen werden, konzentriert sich eine TEWI-Analyse auf die Emissionen aus dem Betrieb der Anlage. Der Unterschied von LCCP zu TEWI ist jedoch meist nur gering, da die Klimarelevanz der Produktion der Anlage gegenüber den Emissionen während der Betriebs der Anlage nur sehr gering ist. Die Berechnungen werden nach DIN 378-1 wie folgt durchgeführt:

$$TEWI = GWP * L * n + GWP * m * (1 - \alpha_R) + n * E_a * \beta$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | GWP: | Global Warming Potential | [-] |
| | L: | Verlustrate | [kg/a] |
| | n: | Betriebszeit | [a] |
| | m: | Kältemittelfüllmenge | [kg] |
| | $\alpha_R$: | Rückgewinnungsanteil bei Entsorgung | [-] |
| | $E_a$: | jährlicher Energieverbrauch | [kWh/a] |
| | B: | $CO_2$-Emissionen aus Energieverbrauch | [kg/kWh] |

Der berechnete Wert wird durch die Betriebszeit der kältetechnischen Anlage dividiert und somit als jährlicher Wert angegeben. Im Rahmen dieser Studie werden sämtliche Angaben auf eine Anlagenlebensdauer von 10 Jahren bezogen. Häufig sind Anlagen in deutschen Märkten jedoch erheblich länger im Einsatz. Die verwendeten GWP-Werte beziehen sich auf einen Zeithorizont von 100 Jahren (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5: Verwendete GWPs** *Quelle: [IPCC1996, UNEP 2006]*

| **Kältemittel** | **IPCC 1996** | **UNEP 2006** |
|---|---|---|
| R404a | 3.260 | 3.900 |
| R134a | 1.300 | 1.430 |
| R744 ($CO_2$) | 1 | 1 |
| R717 (Ammoniak) | <1 | <1 |
| R290 (Propan) | ~20 | ~20 |

Für die Berechnungen dieser Studie werden ausschließlich die GWP-Werte von 1996 verwendet, da diese im Protokoll von Kyoto verwendet werden und somit politisch verbindlich sind. Zu beachten ist, dass die Verwendung der alten, niedrigeren GWP-Werte sich allerdings zu Gunsten der TEWI-Ergebisse der herkömmlichen Anlagen mit HFKW-haltigen Kältemittel auswirkt. Tabelle 5 zeigt, dass nach neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen die GWPs für R404A und R134a bis zu 20 % höher sind.

Jährliche Verlustraten und Rückgewinnungsanteil entsprechen den in den politischen Szenarien beschriebenen Werten für jährliche Kältemittelverluste.
Im Gegensatz zu herkömmlichen Supermarktanlagen mit HFKW (im Wesentlichen R404A und R134a) gibt es im LEH zu Anlagentechnologien mit natürlichen Kältemitteln aufgrund deren geringer Marktdurchdringung bislang nur wenige empirisch abgesicherte Daten. Daher werden, wenn keine besseren Daten verfügbar sind, prozentuale Werte in Bezug auf herkömmliche Anlagen mit HFKW verwendet. Als „Referenzanlage“ wurde bei allen drei Ladenformaten eine direkte Verbundanlage mit R404A gewählt.

## 2.4 Unsicherheitsbetrachtung

Insbesondere der Energieverbrauch, aber auch Kältemittelfüllmengen von kältetechnischen Anlagen im Lebensmitteleinzelhandel unterliegen großen Schwankungen (vgl. Kapitel 3). Um die Schwankungen in geeigneter Form in die

TEWI-Analysen einzubeziehen, werden die Ergebnisse der TEWI-Analysen mittels sogenannter Monte-Carlo-Simulationen als Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt.

Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen lassen sich die Auswirkungen der Kombination von Unsicherheiten in komplexeren Berechnungen simulieren. Eine Monte-Carlo-Simulation ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente die Basis darstellen. In der angewendeten Simulation werden für die Inputvariablen „Energieverbrauch“ und „Kältemittelfüllmenge“ entsprechende Zufallszahlen erzeugt. Die Zufallsvariablen „Energieverbrauch“ und „Kältemittelfüllmenge“ werden als normal verteilt angesehen, da sie durch Überlagerung einer großen Zahl von Einflüssen entstehen (Anlagenstandort, Anlagengröße, Kälteleistung, Verbraucherverhalten, Umgebungstemperatur, Alter der Anlage, etc.).

Durch die Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen kann verdeutlicht werden, in welchem Bereich der TEWI-Wert einer Modelltechnologie variieren kann. Die Gesamtunsicherheit des TEWI-Werts ist über den sogenannten Variationskoeffizient der jeweiligen Monte-Carlo Simulation bestimmt. Der Variationskoeffizient ist definiert als der Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert der Messreihe und wird in der Regel in Prozent angegeben.

In Anbetracht der großen Schwankungsbreiten der Inputgrössen ist es nicht sinnvoll, einen einzelnen TEWI-Wert für eine bestimmte Modelltechnologie anzugeben, ohne die Schwankungsbreiten anzugeben. Daher werden die Ergebnisse der TEWI-Analysen zum einen als Verteilungskurven dargestellt. Zum anderen werden die aus der Simulation bestimmten Unsicherheiten in die Darstellung des TEWI-Wertes als Balkendiagramm in Form von Fehlerbalken übertragen, die zwei Standardabweichungen symmetrisch um den Mittelwert entsprechen und damit 95% aller möglichen Werte umfassen.

## 3. Datenbasis

Für die TEWI-Berechnungen sollen soweit wie möglich empirische Daten verwendet werden, die durch verschiedene Vertreter aus Einzelhandel sowie von Kälteanlagenbauern und Kältetechnikern zur Verfügung gestellt werden sollten. Liegen keine empirischen Daten vor, wird auf Daten aus der durch Prof. Kauffeld erarbeiteten Marktübersicht und auf Literaturwerte zurückgegriffen.

Ein entscheidender Faktor für die Robustheit der berechneten TEWI-Werte ist insbesondere eine breite Datenbasis realer Energieverbräuche aus dem Einzelhandel. Die folgenden Einzelhandelsketten haben dankenswerterweise empirische Daten für die Ausarbeitung zur Verfügung gestellt:

- Rewe-Gruppe, Köln
- Metro-Gruppe, Düsseldorf
- Tengelmann-Gruppe, Mülheim an der Ruhr
- Tegut, Fulda
- Lidl, Neckarsulm
- Aldi Süd, Mönchengladbach

Die Mittelwerte der übermittelten Daten sind in Tabelle 6 wiedergegeben und wurden im Rahmen des zweiten Fachgesprächs Anfang Oktober 2007 in Bonn von den anwesenden Einzelhandelsvertretern als repräsentative Energieverbräuche für Deutschland validiert.

**Tabelle 6: Mittelwerte der vom Einzelhandel übermittelten Energieverbrauchswerte**

| **R404A Referenzanlage [kWh/m]** | |
|---|---|
| | **Mittel** |
| Discounter (NK) | **3.263** |
| Verbrauchermarkt (NK+TK) | **2.992** |
| SB-Warenhaus (NK+TK) | **3.292** |

Die Mehrheit des deutschen Einzelhandels verwendet in allen drei Ladenformaten R404A Direktverdampfungsanlagen. Gemessene und in einer ausreichenden Breite verfügbare Daten gibt es in der Regel daher nur für diese Technologie. Für die anderen hier betrachteten Technologien stehen häufig nur Messwerte von sehr wenigen oder einzelnen Anlagen zur Verfügung.

Demzufolge werden für die TEWI-Analysen die verschiedenen Modelltechnologien jeweils auf die gemittelten Energieverbrauchswerte einer R404A Referenzanlage bezogen. Die Tabellen 7, 9 und 11 zeigen, wie Energieverbräuche der Modelltechnologien je Ladenformat prozentual zu der R404A Referenzanlage liegen.[1]

Des Weiteren werden in den Tabellen 8, 10 und 12 die jeweiligen Kältemittelfüllmengen der betrachteten Technologien aufgeführt, die in die Berechnungen eingegangen sind.

[1] Die prozentualen Werte stammen aus der umfangreichen Literaturrecherche von Prof. Kauffeld im Kapitel Marktübersicht.

## 3.1 Datenbasis im Discounter

**Tabelle 7: Jährliche Energieverbräuche verschiedener Kälteanlagen im Discounter**

| **Energieverbrauch** | | | |
|---|---|---|---|
| **Auslegungsvariante** | **Verhältnis zu R404A** | **Energieverbrauch [kWh/m]** | **Unsicherheit[2] [%]** |
| **I** R404A dir. NK | **0 %** | **3.263** | **+/- 17,5** |
| **II** R134a dir. NK | -10 % | 2.937 | **+/- 17,5** |
| **III** ind. R290 NK | +10 % | 3.589 | **+/- 17,5** |
| **IV** dir. 744 NK | 0% | 3.263 | **+/- 17,5** |
| **R290** Steckerfertig TK | | 2.400 | **+/- 17,5** |

**Tabelle 8: Kältemittelfüllmengen verschiedener Kälteanlagen im Discounter**

| **Kältemittelfüllmenge** | | |
|---|---|---|
| **Auslegungsvariante** | **Kältemittelfüllmenge KM [kg/m]** | **Unsicherheit[3] [%]** |
| **I** R404A dir. NK | **2,9** | **+/- 5,0** |
| **II** R134a dir. NK | 3,3 | +/- 5,0 |
| **III** ind. R290 NK | 1,0 | +/- 5,0 |
| **IV** dir. 744 NK | 2,0 | +/- 5,0 |
| **R290** Steckerfertig TK | < 0,1 | - |

**Auslegungsvariante I NK:**

In den Energieverbrauch sind Daten von vier großen deutschen Discount-Ketten eingeflossen. Übermittelt wurden jeweils durchschnittliche Energieverbräuche einer unterschiedlichen Anzahl deutscher Märkte **mit R404 Anlagen**. Tabelle 7 zeigt den mittleren Energieverbrauch dieser Werte. Die Unsicherheiten und Schwankungsbreiten der Energiedaten werden in Kapitel 3.1.1 näher erläutert.

[2]Schwankungsbreiten der Energieverbräuche wurden anhand von Daten aus dem Einzelhandel ermittelt. Vergleiche hierzu Kapitel 3.1.2

[3] Schwankungsbreiten der Energieverbräuche wurden anhand von Daten aus dem Einzelhandel ermittelt. Vergleiche hierzu Kapitel 3.1.2

Robuste gemittelte Kältemittelfüllmengen (s. Tabelle 8) der R404A Referenzanlage stehen lediglich von einer Kette zur Verfügung. R404A Direktverdampfungsanlagen im Discounter sind allerdings vergleichsweise uniform, sodass die Unsicherheit der angegeben Kältemittelfüllmengen bei lediglich 10% liegt.

**Auslegungsvariante II NK:**

Messungen an **R134a Direktverdampfungsanlagen** eines großen deutschen Einzelhändlers haben ergeben, dass der jährliche Energieverbrauch dieser Technologie etwa 10% niedriger ist als für vergleichbare R404A Anlagen. Dies liegt daran, dass R134a als Einstoffkältemittel einen besseren Wärmeübergang als Kältemittelgemische wie R404A hat. Dadurch ist die Kälteleistungszahl (COP) besser und es kommt zu einem niedrigeren Energieverbrauch.
Mittlere Kältemittelfüllmengen der R134a Direktverdampfungsanlage wurden von der gleichen Einzelhandelskette übermittelt.

**Auslegungsvariante III NK:**

Energieverbräuche einer **indirekten Kälteträgeranlage mit R290** liegen im NK-Bereich etwa 10 % höher als die der R404A Referenzanlage. Wird auch der TK-Bereich durch die R290 Kälteträgeranlage versorgt, liegt der Energieverbrauch 20 % über dem einer R404A Referenzanlage. Daher wird, wie bei den anderen Auslegungsvarianten im Discounter, die Tiefkühlung durch steckerfertige Truhen mit R290 bereitgestellt.

**Auslegungsvariante IV NK:**

In deutschen Discountern sind seit einiger Zeit die ersten **R744-Direktverdampfungsanlagen** für die Normalkühlung im Einsatz. Gemessene Energieverbräuche von einzelnen Anlagen gibt es leider bisher nur über sehr kurze Zeiträume. Erste Erfahrungen zeigen, dass der Energieverbrauch je nach Außentemperatur erheblich schwankt. Unter deutschen Klimabedingungen ist der Energieverbrauch der R404A-Anlage jeweils von Mai bis September niedriger; von Oktober bis April ist der Energieverbrauch der R744-Anlage niedriger (vgl. Technologiedatenblatt C13).
Diese Erfahrungen wurden durch gemessene Energieverbräuche zweier Discount-Ketten bestätigt. In der Messreihe eines großen deutschen Discounters wurden von

November 2006 bis Oktober 2007 die Energieverbräuche einer $CO_2$-Anlage ermittelt. Für die Wintermonate lag der Energieverbrauch deutlich unter dem einer vergleichbaren R404A Anlage. In den Sommermonaten leicht darüber. Über das Jahresmittel ergab sich dadurch ein 3% niedrigerer Energieverbrauch gegenüber der Referenzanlage mit R404A. Der Betreiber erwartet anhand dieser ersten Erfahrungen und Messwerte, dass eine $CO_2$-Anlage in der Discountanwendung über den Jahreszyklus langfristig eine Energieeinsparung von 5-6% gegenüber herkömmlichen Anlagen mit R404A erreichen kann.
Eine weitere Messreihe einer anderen deutschen Discount-Kette liegt nur für die Sommermonate April bis September 2007 vor. In dieser Messreihe weist die $CO_2$-Anlage im Mittel einen deutlich höheren Energieverbrauch für den untersuchten Zeitraum auf.
In den folgenden Berechnungen wird aufgrund der unterschiedlichen Messergebnisse ein der R404A Anlage identischer Energieverbrauch angesetzt, was zu gunsten der HFKW-Technologie spricht.

**Steckerfertige TK-Truhen mit R290:**
Zur Tiefkühlung werden in allen vier Auslegungsvarianten steckerfertige, hermetische Tiefkühltruhen verwendet. Diese Form der Tiefkühlung hat sich für den Discountbereich in den letzten Jahren durchgesetzt. Vorteile sind vor allem der geringere Flächenverbrauch (Wegfall von Maschinenräumen) und die hohe Flexibilität für den Einsatz im Discounter.
Zeitweise waren R134a und R404A die vorherrschenden Kältemittel der steckerfertigen Tiefkühltruhen. In den letzten Jahren hat sich jedoch R290 (Propan) durchgesetzt. Neben dem deutlich geringeren GWP von Propan weisen neuartige TK-Truhen mit Propan auch einen geringeren Energieverbrauch als herkömmliche Truhen mit HFKW auf.
Der jährliche Energieverbrauch der R290-Truhen liegt nach Angaben eines großen deutschen Einzelhändlers bei 2.400 kWh/m. Der Verbrauch von R404A-Truhen liegt jährlich etwa 20 % höher bei 3.000 kWh/m. In den hier gezeigten Szenarien werden nur noch TK-Truhen mit R290 berücksichtigt.
Ein Merkmal steckerfertiger Tiefkühltruhen ist der Verbleib der Abwärme, die anders als bei Verbundanlagen ins Innere des Marktes abgegeben wird. Über das Jahresmittel dürfte der zusätzliche Klimatisierungs- bzw. Lüftungsbedarf in den Sommermonaten

jedoch durch die eingesparte Heizungsenergie während der Wintermonate überkompensiert werden. Entsprechende Daten lagen nicht vor, dennoch wird im Folgenden nicht näher darauf eingegangen.

### 3.1.1 Unsicherheitsanalyse der Energieverbräuche

Aus bereits aus einer früheren UBA-Studie [Harnisch 2004] vorliegenden Verbrauchsdaten eines Einzelhändlers wird deutlich, dass Energieverbräuche ähnlicher Anlagentechnologien im Discounter aus einer Vielzahl von Gründen erhebliche Unterschiede aufweisen können.
Da für TEWI-Analysen ein repräsentativer Energieverbrauchswert in die Berechnung einfließen soll, ist es wichtig, die Variationsbreite des Energieverbrauches adäquat zu berücksichtigen. Hierfür muss zunächst die Schwankungsbreite der Datenreihe ermittelt werden. Bezieht man alle Messwerte der früheren Messreihe der R404A Daten in die Betrachtung ein, ergäbe sich eine Schwankungsbreite von 47 %. Extreme Ausreißer am unteren und oberen Rand der Messreihe wurden jedoch nicht berücksichtigt, wodurch eine Schwankungsbreite der Energieverbräuche von 35 % ermittelt wurde. Die extremen Ausreißer können verschiedene Ursachen wie falsche Anschlüsse der Stromzähler oder zeitweiligen Stillstand einzelner Anlagen haben.

Abbildung 3 zeigt mittels des orangefarbenen Unsicherheitsbalkens die Schwankungsbreite der Energieverbräuche der verschiedenen Modelltechnologien. Die R404A-Referenzanlage wird als grüner Balken dargestellt.

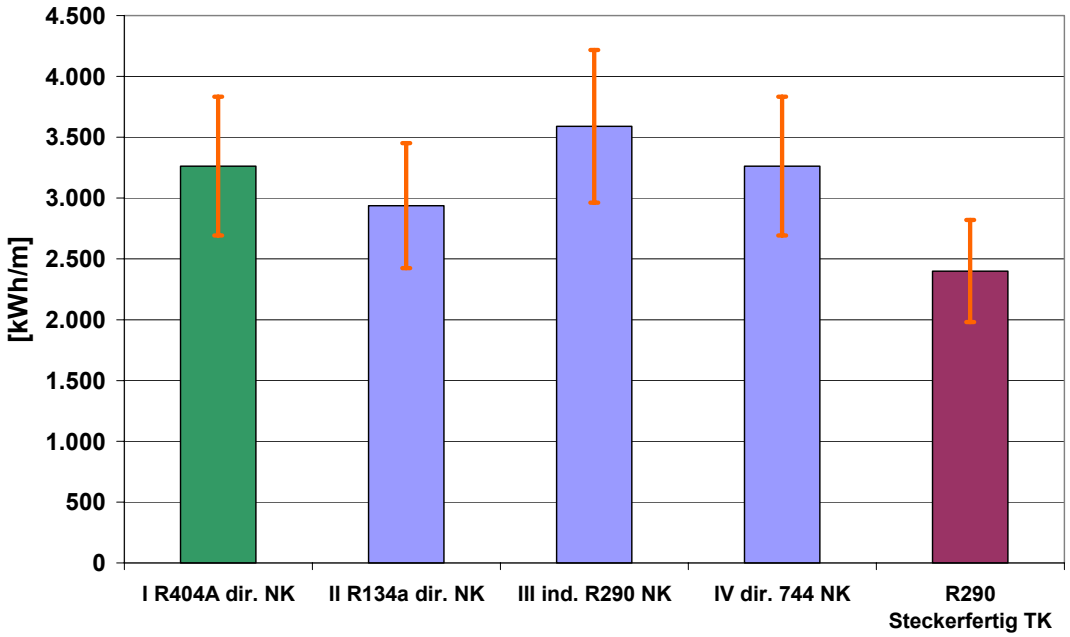



**Abbildung 3: Jährlicher Energieverbrauch der verschiedenen Kälteanlagen des Discounters – Daten aus Tabelle 7**

## 3.2 Datenbasis Verbrauchermarkt

Wie eingangs bereits erläutert sind heute hauptsächlich zentrale, direkt verdampfende Verbundanlagen mit R404A im LEH im Einsatz. Für die übrigen im Rahmen dieser Studie abgebildeten Technologien des Verbrauchermarkts gibt es daher teilweise nur einzelne Literaturwerte zu Energieverbrauch und Kältemittelfüllmengen. Dies trifft hier vor allem auf die Auslegungsvarianten IVa und IVb zu. Diesbezüglich wird für diese beiden Technologien eine erhöhte Unsicherheit von 25 % für den Energieverbrauch angenommen (vgl. Kapitel 3.2.1).

Tabelle 9 und 10 zeigen die Werte für Energieverbrauch und Kältemittelfüllmenge der verschiedenen Technologien im Verbrauchermarkt.

**Tabelle 9: Jährliche Energieverbräuche verschiedener Kälteanlagen im Verbrauchermarkt**

| **Energieverbrauch** | | | |
|---|---|---|---|
| **Auslegungsvariante** | **Verhältnis zu R404A** | **Energieverbrauch [kWh/m]** | **Unsicherheit[4] [%]** |
| **Ia** dir. R404A NK+TK | **0 %** | **2.992** | **+/- 7,5** |
| **Ib** dir. R134a NK+ R404A TK | -7 % | 2.783 | +/- 7,5 |
| **IIa** R404A NK + R744 TK | 0% | 2.992 | +/- 7,5 |
| **IIb** R134a NK + R744 TK | -7 % | 2.783 | +/- 7,5 |
| **III** ind. R717 | +15 % | 3.441 | +/- 7,5 |
| **IVa** R717/R744 NK+TK | -13 % | 2.603 | +/- 12,5 |
| **IVb** R290/R744 NK+TK | 0% | 2.992 | +/- 12,5 |
| **V** dir. R744 | 0% | 2.992 | +/- 7,5 |

**Tabelle 10: Kältemittelfüllmengen verschiedener Kälteanlagen im Verbrauchermarkt**

| **Kältemittelfüllmenge** | | |
|---|---|---|
| **Auslegungsvariante** | **Kältemittelfüllmenge KM [kg/m]** | **Unsicherheit [%]** |
| **Ia dir. R404A NK+TK** | **2,5** | **+/- 8,0** |
| **Ib** dir. R134a NK+R404A TK | 2,4 kg R134a<br>+ 0,8 kg R404A | +/- 8,0 |
| **IIa** R404A NK + R744 TK | 2,7 kg R404A<br>0,5 kg R744 | +/- 8,0 |
| **IIb** R134a NK + R744 TK | 2,45 kg R134a<br>0,5 kg R744 | +/- 8,0 |
| **III** ind. R717 | 0,75 | +/- 8,0 |
| **IVa** R717/R744 NK+TK | 0,5 kg R744<br>0,15 kg R717 | +/- 13,0 |
| **IVb** R290/R744 NK+TK | 1,1 kg R290<br>0,8 kg R744 | +/-13,0 |
| **V** dir. R744 | 3,0 | +/- 8,0 |

[4] Schwankungsbreiten der Energieverbräuche wurden anhand von Daten aus dem Einzelhandel ermittelt. Vergleiche hierzu Kapitel 3.2.1

**Auslegungsvariante Ia:**

Die Energieverbräuche der **direktverdampfenden R404A-Anlage** basieren auf gemittelten Werten von Verbrauchermärkten dreier großer deutscher Lebensmitteleinzelhandelsketten. Aktuelle Datenreihen aus einzelnen Anlagen stehen nicht zur Verfügung. Es wurden von den Betreibern jeweils repräsentative Mittelwerte für das entsprechende Ladenformat übermittelt. Die Unsicherheiten und Schwankungsbreiten der Energiedaten werden in Kapitel 3.2.1 näher erläutert. Kältemittelfüllmengen der R404A-Anlage stehen nur von einer LEH-Kette zur Verfügung.

**Auslegungsvariante Ib:**

Der Energieverbrauch einer **R134a-Anlage** ist nach Aussagen einer großen deutschen LEH-Kette und den Angaben in den Technologiedatenblättern etwa 10 % niedriger als der von einer Anlage mit R404A. Bei zentralen Verbundanlagen mit R134a wird die Tiefkühlung mit R404A betrieben. Dadurch liegt der Gesamtenergieverbrauch für NK und TK etwa 7% unter dem Energieverbrauch eines Marktes der sowohl NK als auch TK durch eine R404A Verbundanlage bereitstellt. Mittlere Kältemittelfüllmengen wurden durch eine LEH-Kette zur Verfügung gestellt.

**Auslegungsvariante IIa:**

Entsprechend der Ergebnisse von Prof. Kauffeld ist der Energieverbrauch der **R404A/R744-Kaskadenanlage** mit dem der R404A-Referenzanlage gleich zu setzen (vgl. Technologiedatenblätter C 5). Kältemittelfüllmengen sind Literaturwerte aus einer Ökoeffizienzbetrachtung der Firma Solvay [Diehlmann2006].

**Auslegungsvariante IIb:**

Durch den Einsatz von R134a in der Normalkälte ist der Energieverbrauch der **R134a/R744-Kaskade** 7 % günstiger als bei der R404A-Referenzanlage. Dieser Wert deckt sich auch mit Ergebnissen der Ökoeffizienzbetrachtung der Firma Solvay. Die verwendeten Kältemittelfüllmengen stammen aus der Ökoeffizienzbetrachtung der Firma Solvay [Diehlmann2006].

**Auslegungsvariante III:**

Der hier verwendete 15 % höhere Energieverbrauch für eine **indirekte R717-Anlage** liegt am oberen Ende der in den Technologiedatenblättern angegebenen Verbrauchsspanne. Die dort angegebene Spanne liegt bei 8-15 % Mehrverbrauch gegenüber der R404A-Referenztechnologie (vgl. Technologiedatenblatt C 8). Hier wird im Folgenden mit 15 % gerechnet, da dies eher den Erfahrungen deutscher Anlagenbetreiber entspricht, so Vertreter einer großen deutschen Einzelhandelskette. Um den Energieverbrauch einer indirekten Ammoniakanlage zu verbessern, würden die ohnehin schon sehr kostenintensiven Anlagen noch einmal 20-30 % teurer werden.

**Auslegungsvariante IVa:**

Der Energieverbrauch einer **R717-Anlage in Kaskade mit R744** ist etwa 13 – 18 % niedriger als der einer vergleichbaren R404A-Referenzanlage. Hier wird im Folgenden ein 13 % niedriger Energieverbrauch verwendet. Aufgeführte Kältemittelfüllmengen stammen aus der bereits erwähnten Ökoeffizienzbetrachtung der Firma Solvay [Diehlmann2006].

**Auslegungsvariante IVb:**

Der Energieverbrauch einer Modellanlage mit **10 kg R290, 6 kg R744** und 140 kg Propylenglykol-Wasser-Gemisch als Kälteträger in einem dänischen Discounter entspricht dem einer R404A-Anlage (vgl. Technologiedatenblatt C 12). Wird als Kälteträger jedoch verdampfendes $CO_2$ genutzt liegt der Energieverbraucher einer entsprechenden Anlage etwa 5 % niedriger als der einer R404A-Referenzanlage.

**Auslegungsvariante V:**

Gemessene Energieverbräuche für eine **R744-Direktverdampfungsanlage** im Verbrauchermarkt wurden nicht vom Einzelhandel zur Verfügung gestellt. Erste Erfahrungen zeigen, dass der Energieverbrauch je nach Außentemperatur erheblich schwankt. Unter deutschen Klimabedingungen ist der Energieverbrauch der R404A-Anlage jeweils von Mai bis September niedriger; von Oktober bis April ist der Energieverbrauch der R744-Anlage niedriger (vgl. Technologiedatenblatt C 13). Hier wird mit dem gleichen Energieverbrauch wie bei einer R404A-Anlage gerechnet (vgl. hierzu auch Kapitel 3.1).

### 3.2.1 Unsicherheitsanalyse der Energiedaten

Auch im Verbrauchermarkt variieren entsprechend des bereits in [Harnisch2004] verwendeten Datensatzes eines deutschen Einzelhändlers die Energieverbräuche gleicher Anlagentechnologien relativ stark. Um Schwankungen der Energieverbräuche in den TEWI-Analysen mit abzubilden, wurde mittels vorhandener, gemessener Datenreihen aus dem Jahr 2001 die Schwankungsbreite für Energieverbräuche bestimmt. Nach Eliminierung von Ausreißern wurde für die R404A-Referenzanlage eine Schwankungsbreite der Energieverbräuche von 15 % ermittelt. Abbildung 4 stellt die Energieverbräuche der einzelnen Modelltechnologien grafisch gegenüber. Die R404A-Referenzanlage ist grün gekennzeichnet. Jeweilige Schwankungsbreiten werden anhand der orangefarbenen Fehlerbalken dargestellt. Zu beachten ist, dass für die Varianten IVa und IVb eine größere Unsicherheit von 25 % angenommen wird, da die Inputdaten dieser Varianten nur auf Punktwerten einzelner Anlagen beruhen. Weitere Angaben zu dieser Technologie stehen leider nicht zu Verfügung.

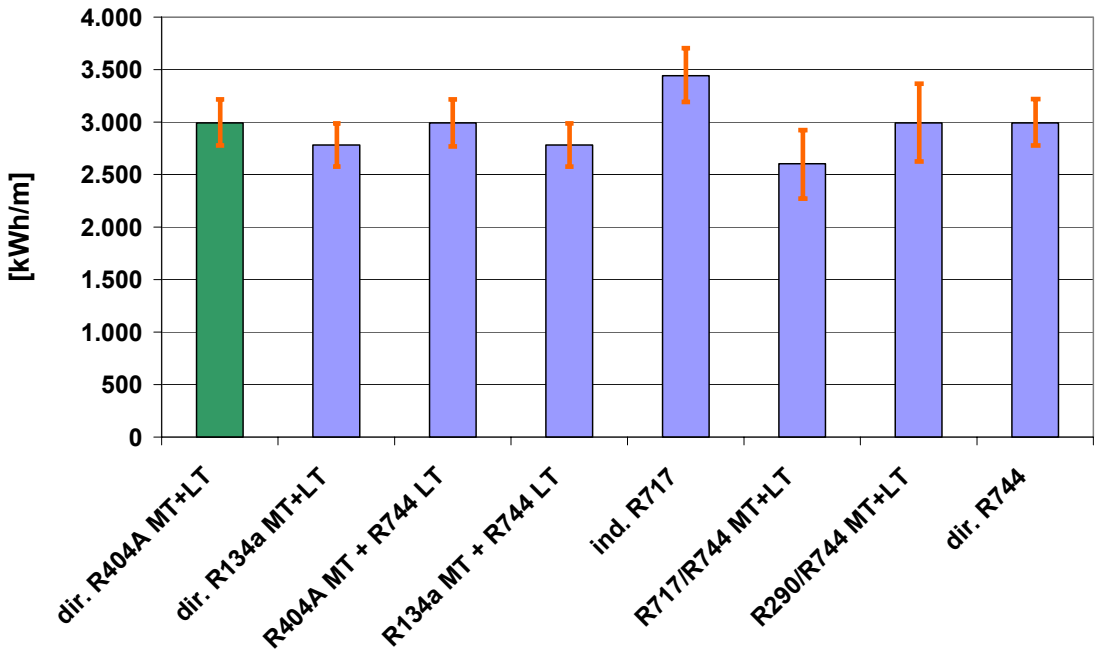



**Abbildung 4: Jährlicher Energieverbrauch der verschiedenen Modelltechnologien des Verbrauchermarkts – Daten aus Tabelle 9**

## 3.3 Datenbasis SB-Warenhaus

Dominierendes Kältemittel in großen SB-Warenhäusern mit einer Verkaufsfläche von 6.000 m² und mehr ist ebenfalls R404A. Aufgrund der schlechten Datenlage (vgl. Tabelle 11 und 12) für Alternativtechnologien im SB-Warenhaus werden hier lediglich die Auslegungsvarianten Ia, III und V betrachtet.

**Tabelle 11: Jährliche Energieverbräuche verschiedener Kälteanlagen im SB-Warenhaus**

| **Energieverbrauch** | | | |
|---|---|---|---|
| **Auslegungsvariante** | **Verhältnis zu R404A** | **Energieverbrauch [kWh/m]** | **Unsicherheit[5] [%]** |
| **Ia** dir. R404A | **0 %** | **3.292** | **+/- 9,0** |
| **III** indir. R717 | +10 % | 3.621 | +4,5/-20,0 |
| **V** dir. R744 | 0 % | 3.292 | +/- 9,0 |

**Tabelle 12: Kältemittelfüllmengen verschiedener Kälteanlagen im SB-Warenhaus**

| **Kältemittelfüllmenge** | | |
|---|---|---|
| **Auslegungsvariante** | **Kältemittelfüllmenge KM [kg/m]** | **Unsicherheit[3] [%]** |
| **Ia** dir. R404A | **4,6** | **+/- 5,0** |
| **III** indir. R717 | 1,0 | +/- 5,0 |
| **V** dir. R744 | 4,8 | +/- 5,0 |

**Auslegungsvariante Ia:**

Der mittlere Energieverbrauch der **R404A-Referenzanlage** stammt aus sechs SB-Warenhäusern einer großen deutschen LEH-Kette. Eine breitere Datenbasis würde die Robustheit der Daten wesentlich erhöhen. Obwohl nur wenige Messwerte vorliegen, handelt es sich um einen Wert, der mit Vertretern des Einzelhandels und

[5] Schwankungsbreiten der Energieverbräuche wurden anhand von Daten aus dem Einzelhandel ermittelt. Vergleiche hierzu Kapitel 3.3.1

Anlagenbauern auf einem Expertentreffen im Oktober 2007 als im Rahmen der Unsicherheiten repräsentativ bestätigt wurde.
Ein vergleichbarer Wert ist aus Schweizer SB-Warenhäusern übermittelt. Hier liegt der durchschnittliche Energieverbrauch von R404A-Direktverdampfungsanlagen bei 3.400 kWh pro laufenden Meter Kühlmöbel [Linde2007]. Die Kältemittelfüllmengen wurden aus den zur Verfügung gestellten Daten der sechs SB-Warenhäuser übernommen.

**Auslegungsvariante III:**

Große **indirekte Supermarktkälteanlagen mit R717** haben gemäß der Aussagen eines Anlagenbauers, der über langjährige Erfahrung im Bereich des Ammoniakanlagenbaus verfügt, einen etwa 10 % niedrigeren Energieverbrauch als vergleichbare R404A-Anlagen. Andere Hersteller und Einzelhändler geben allerdings einen 10 % höheren Energieverbrauch gegenüber R404A an. In der vorliegenden Studie wird als Ergebnis des Expertengesprächs im Oktober 2007 in Bonn mit einem 10 % höheren Energieverbrauch gerechnet. Bei optimaler Anlagenkonzeption und höchstem Optimierungsgrad weist dieser Anlagentyp jedoch mindestens einen gleichwertigen Energieverbrauch zu R404A-Anlagen auf.
Aufgrund der Toxizität von Ammoniak wird seit jeher ein hoher Wert auf Dichtigkeit gelegt, wodurch die Anlagen in der Regel wesentliche geringere Verlustraten haben [Harnisch2004]. Auch wenn Verlustraten aufgrund des geringen GWPs von Ammoniak auf die TEWI-Analyse keinen Einfluss haben, wird in allen drei Politikszenarien mit einer geringen Verlustrate von 2,65% gerechnet.

**Auslegungsvariante V:**

Für die **R744-Direktverdampfungsanlage** wird der gleiche Energieverbrauch wie bei der R404A-Referenzanlage angenommen. Werte aus einer Modellanlage in einem schweizerischen SB-Warenhaus werden mit 3.200 kWh pro laufenden Meter Kühlmöbel berichtet und lägen damit in etwa in dem Rahmen des hier angegebenen Energieverbrauchs. Die Kältemittelfüllmenge wurde aus dem schweizerischen SB-Warenhaus übernommen [Haaf 2005].

### 3.3.1 Unsicherheitsanalyse der Energiedaten

Den Daten der R404A-Referenzanlage im SB-Warenhaus liegen nur Messwerte von sechs unterschiedlichen Märkten zu Grunde. Allerdings kann man auch hier wieder deutliche Schwankungen im Energieverbrauch erkennen (vgl. Abbildung 5).

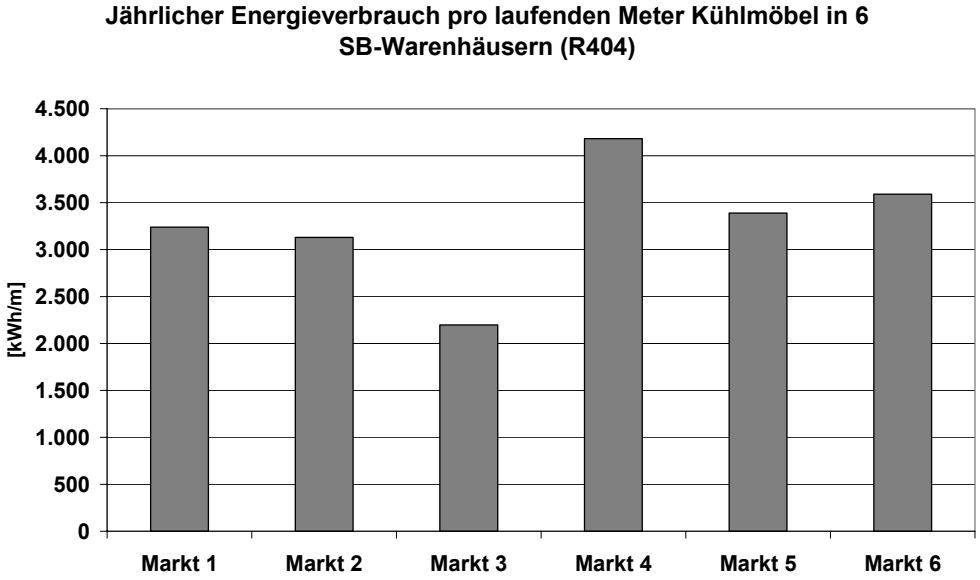



**Abbildung 5: Gemessene Energieverbräuche in SB-Warenhäusern – Verbundkälteanlage mit HFKW** *Quelle: LEH-Kette*

Die ermittelte Schwankungsbreite der R404A-Referenzanlage liegt im SB-Warenhaus bei 18 %. Wie bereits in den vorherigen beiden Ladenformaten werden in Abbildung 6 die jeweiligen Energieverbräuche mit der Schwankungsbreite gegenüber gestellt. Um die ermittelte Schwankungsbreite auf eine robustere Basis zu stellen, wäre eine Datenreihe mit deutlich mehr Märkten von großem Vorteil.

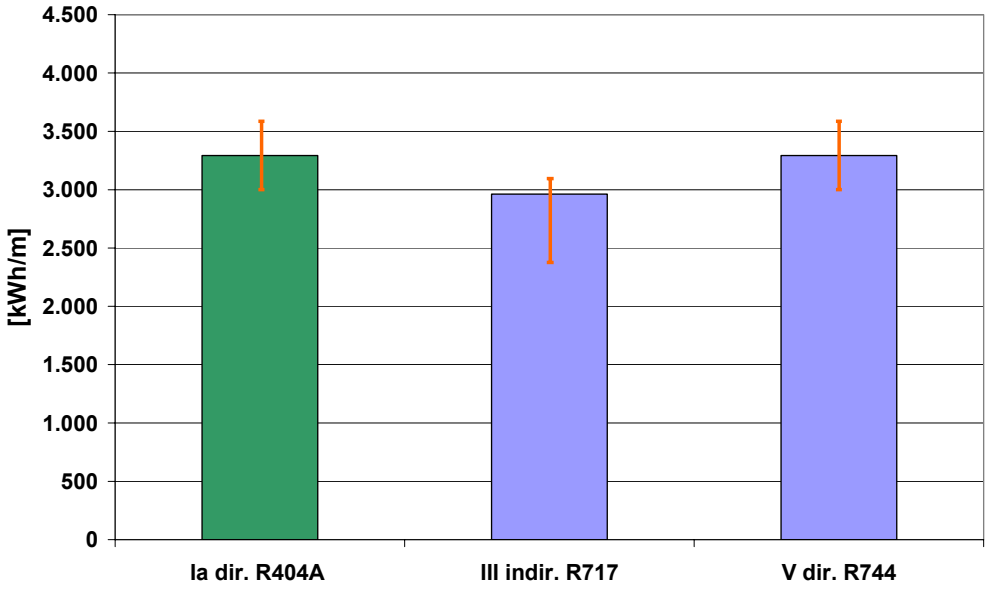



**Abbildung 6: Jährlicher Energieverbrauch der verschiedenen Modelltechnologien des SB-Warenhauses – Daten aus Tabelle 11**

## 4. Kostendaten

Hier sollen für die drei beschriebenen Ladenformate spezifische Vermeidungskosten berechnet werden. Vermeidungskosten werden in Euro pro Tonne vermiedenem $CO_2$-Äquivalent angegeben und beziehen sich auf eine Vermeidungsmaßnahme im Vergleich zu einer Referenztechnologie. Den Vermeidungskostenberechnungen sollen die in den Tabellen 13 bis 18 dargestellten Kostendaten zu Grunde gelegt werden. Sämtliche Kostendaten beziehen sich zunächst auf das **Politikszenario 1** mit einer Kältemittelverlustrate von jährlich 11,65 %. Wie sich Kosten unter veränderten politischen Rahmenbedingungen voraussichtlich in den einzelnen Szenarien ändern werden, ist in Tabelle 19 und Abbildung 7 beschrieben.

Investitionskosten werden entsprechend der Technologiedatenblätter jeweils ins Verhältnis zur R404A-Referenzanlage gesetzt. Die Energiekosten wurden mittels der Energieverbrauchszahlen in Kapitel 3 bestimmt und wurden mit einem Strompreis von € 0,13 pro kWh berechnet. Vollinstandhaltungskosten wurden vom Einzelhandel nur für die R404A-Anlagen übermittelt. Als Vollinstandhaltungskosten werden hier

Wartungskosten inklusive Kosten für regelmäßige Dichtheitsprüfungen sowie Reparaturkosten definiert.

**Tabelle 13: Technologiespezifische Kosten für Discounter 1 (nur NK)**

| **Investitionskosten** | | | |
|---|---|---|---|
| | Mehrkosten gegenüber R404A Referenzanlage [%] | Investitions-kosten [€] | Unsicherheit [%] |
| **I R404A dir. NK** | **0 %** | **70.000** | **+/-15,0** |
| **II** R134a dir. NK | +13 % | 79.000 | +/-15,0 |
| **III** ind. R290 NK | +20 % | 84.000 | +/-15,0 |
| **IV** dir. 744 NK | +20 % | 84.000 | -10,0 / +40,0 |

**Tabelle 14: Technologiespezifische Kosten für Discounter 2 (nur NK)**

| **Jährliche Kosten** | | |
|---|---|---|
| | Energiekosten (0,13 €/kWh) [€/a] | Vollinstand-haltungskosten [€/a] |
| **I R404A dir. NK** | **9.550** | **2.000** |
| **II** R134a dir. NK | 8.590 | 2.000 |
| **III** ind. R290 NK | 10.500 | 2.500 |
| **IV** dir. 744 NK | 9.550 | 2.500 |

**Tabelle 15 : Technologiespezifische Kosten für den Verbrauchermarkt 1**

| **Investitionskosten** | | | |
|---|---|---|---|
| | Mehrkosten gegenüber R404A Referenzanlage [%] | Investitions-kosten [€] | Unsicherheit [%] |
| **Ia dir. R404A NK+TK** | **0%** | **370.000** | **+/-15,0** |
| **Ib** dir. R134a NK+R404ATK | +12% | 416.000 | +/-15,0 |
| **IIa** R404A NK+R744 TK | 0 % | 370.000 | +/-15,0 |
| **IIb** R134a NK+R744 TK | +12% | 416.000 | +/-15,0 |
| **III** ind. R717 | +27% | 472.000 | +/-15,0 |
| **IVa** R717/R744 NK+TK | + 28% | 474.000 | -10,0/+40,0 |
| **IVb** R290/R744 NK+TK | +15% | 426.000 | -10,0/+40,0 |
| **V** dir. R744 | +20 % | 444.000 | -10,0/+40,0 |

**Tabelle 16: Technologiespezifische Kosten für den Verbrauchermarkt 2**

| **Jährliche Kosten** | | |
|---|---|---|
| | Energiekosten (0,13 €/kWh) [€/a] | Vollinstand-haltungskosten [€/a] |
| **Ia dir. R404A NK+TK** | **39.000** | **6.500** |
| **Ib** dir. R134a NK+R404ATK | 36.000 | 6.500 |
| **IIa** R404A NK+R744 TK | 39.000 | 7.500 |
| **IIb** R134a NK+R744 TK | 36.000 | 7.500 |
| **III** ind. R717 | 45.000 | 8.000 |
| **IVa** R717/R744 NK+TK | 34.000 | 8.000 |
| **IVb** R290/R744 NK+TK | 39.000 | 6.500 |
| **V** dir. R744 | 39.000 | 7.800 |

Für das SB-Warenhaus stehen wie oben bereits beschrieben bislang nur wenige Daten zur Verfügung. Daher werden in Tabelle 17 und 18 erneut lediglich Kostendaten für die Auslegungsvarianten I, II und V dargestellt. Prinzipiell können die Prozentwerte aus dem Verbrauchermarkt auch auf das SB-Warenhaus übertragen werden.

**Tabelle 17: Technologiespezifische Kosten für das SB-Warenhaus 1**

| **Investitionskosten** | | | |
|---|---|---|---|
| | Mehrkosten gegenüber R404A Referenzanlage [%] | Investitions-kosten [€] | Unsicherheit [%] |
| **Ia dir. R404A NK+TK** | **0%** | **800.000** | **+/-15,0** |
| **III** ind. R717 | +28% | 1.024.000 | +/-15,0 |
| **V** dir. R744 | +20 % | 960.000 | -10,0/+40,0 |

**Tabelle 18: Technologiespezifische Kosten für das SB-Warenhaus 2**

| **Jährliche Kosten** | | |
|---|---|---|
| | Energiekosten (0,13 €/kWh) [€/a] | Vollinstand-haltungskosten [€/a] |
| **Ia dir. R404A NK+TK** | **105.000** | **16.000** |
| **III** ind. R717 | 115.000 | 20.000 |
| **V** dir. R744 | 105.000 | 20.000 |

Die Vermeidungskostenberechnung (vgl. Kapitel 5.3) wird für alle drei Politikszenarien gerechnet, da die den Szenarien zu Grunde liegenden Annahmen einen erheblichen Einfluss auf die Vollinstandhaltungskosten und die Höhe der HFKW-Emissionen der Referenztechnologie haben. Um die Situation je nach Politikszenario möglichst genau abzubilden, werden für die Referenztechnologie die Investitions- und Instandhaltungskosten entsprechend der Werte in Tabelle 19 angepasst. Die in Abbildung 7 dargestellte Anpassung der Instandhaltungskosten um +30 % in Szenario 2 und um +50 % in Szenario 3 resultiert aus den erhöhten Wartungsanforderungen für

HFKW-Anlagen durch Umsetzung der EU-F-Gas Verordnung (EG) Nr. 842/2006 und den Anforderungen aus dem VDMA Einheitsblatt 24243-1.
Um die Dichtigkeitsforderung nach VDMA Einheitsblatt einzuhalten, werden auch die Investitionskosten für die R404A-Referenzanlagen in Szenario 3 steigen. In den Vermeidungskostenberechnungen werden die Werte aus Tabelle 18 neben der Referenztechnologie auf alle HFKW-haltigen Technologien angewendet.

**Tabelle 19: Kostenentwicklung der HFKW-Technologie mit Veränderung der politischen Rahmenbedingungen**

| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 |
|---|---|---|---|
| **Investitionskosten** | aktuelle Werte in Tabellen 9,10 und 11 | entsprechend Szenario 1 | +15% |
| **Vollinstandhaltungskosten** | aktuelle Werte in Tabellen 9,10 und 11 | +30% | +50% |

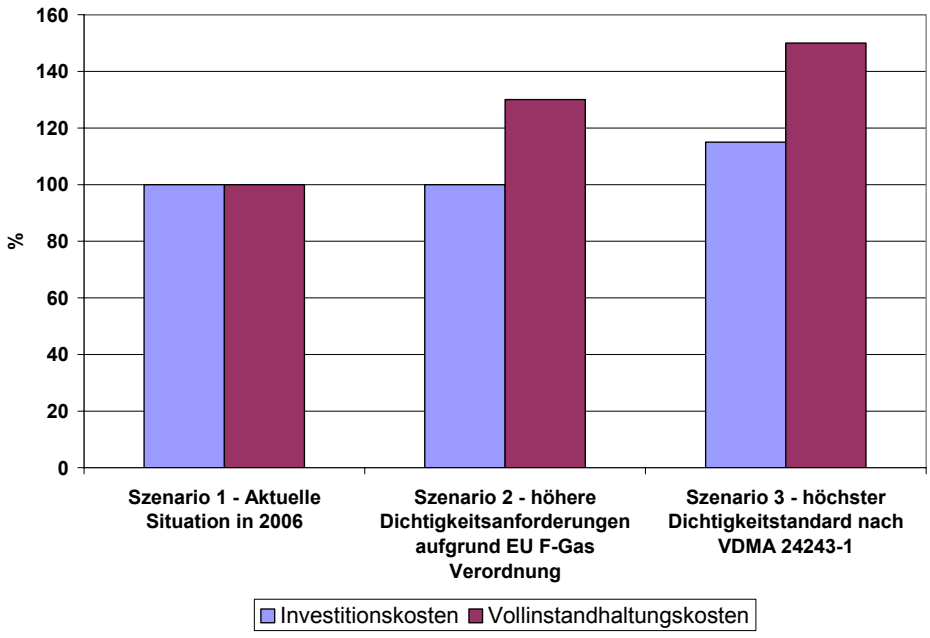



**Abbildung 7: Kostenentwicklung der HFKW-Technologie mit Veränderung der politischen Rahmenbedingungen**

# 5. Ergebnisse

## 5.1 TEWI-Analysen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der errechneten TEWI-Analysen dargestellt. Für jedes Ladenformat wird in den Abbildungen 8-10, 15-17 und 21-23 zunächst die Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen Treibhausgasemissionen pro laufenden Meter Kühlmöbel dargestellt. Die Verteilungen wurden anhand der in Kapitel 2.4 beschriebenen Methodik mittels Monte-Carlo-Simulationen bestimmt.
Anschließend sind in den Abbildungen 11-13, 18-20 und 24-26 die jährlichen THG-Emissionen der einzelnen Technologien je Ladenformat als Balkendiagramm dargestellt. Die aus den Monte-Carlo-Simulationen ermittelten Schwankungsbreiten sind in den Balkendiagrammen durch orangefarbene Fehlerbalken dargestellt.

### 5.1.1 Discounter

Die folgenden Abbildungen 8-10 stellen die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen für die Politikszenarien 1, 2 und 3 dar. Während die Reihenfolge der Wahrscheinlichkeitskurven für die einzelnen Auslegungsvarianten nahezu unverändert bleibt, verringern sich die Unterschiede mit zunehmend strengeren Vorgaben deutlich. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Kurven steiler und die Emissionswerte der einzelnen Anlagen damit homogener werden.

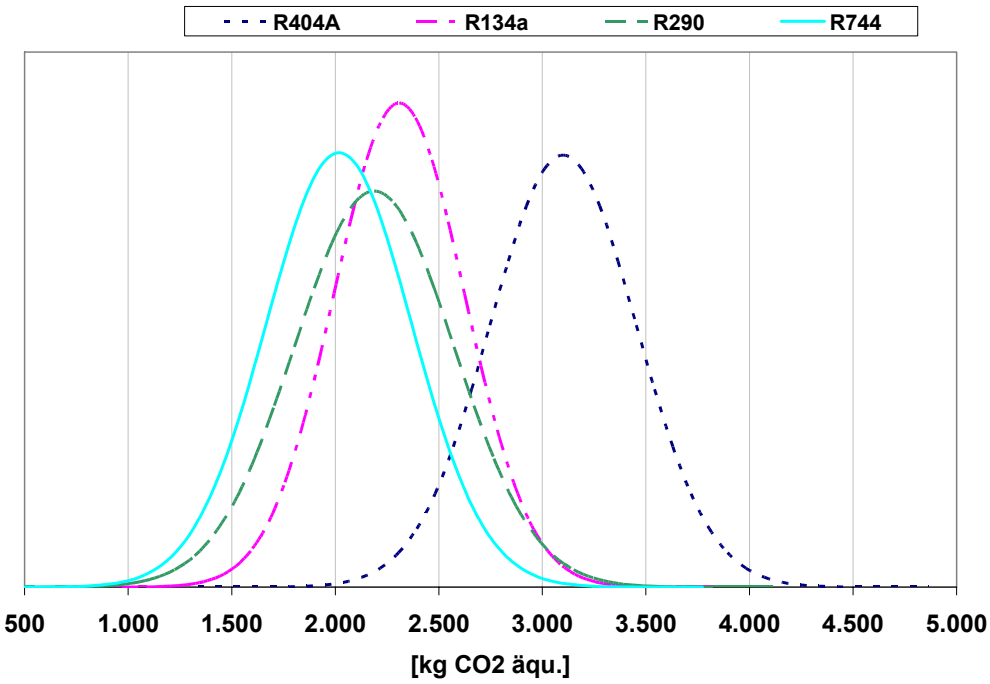



**Abbildung 8: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Discounter in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 11,65 % = Politiksz. 1) (schematisch)**

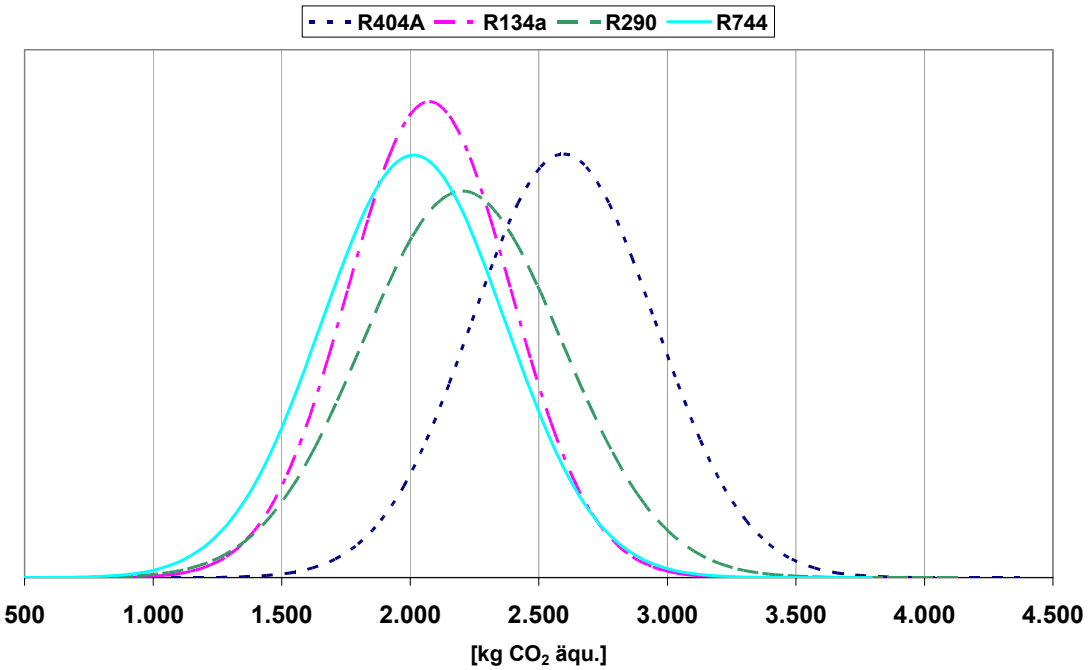



**Abbildung 9: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Discounter in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 6,15 % = Politiksz. 2) (schematisch)**

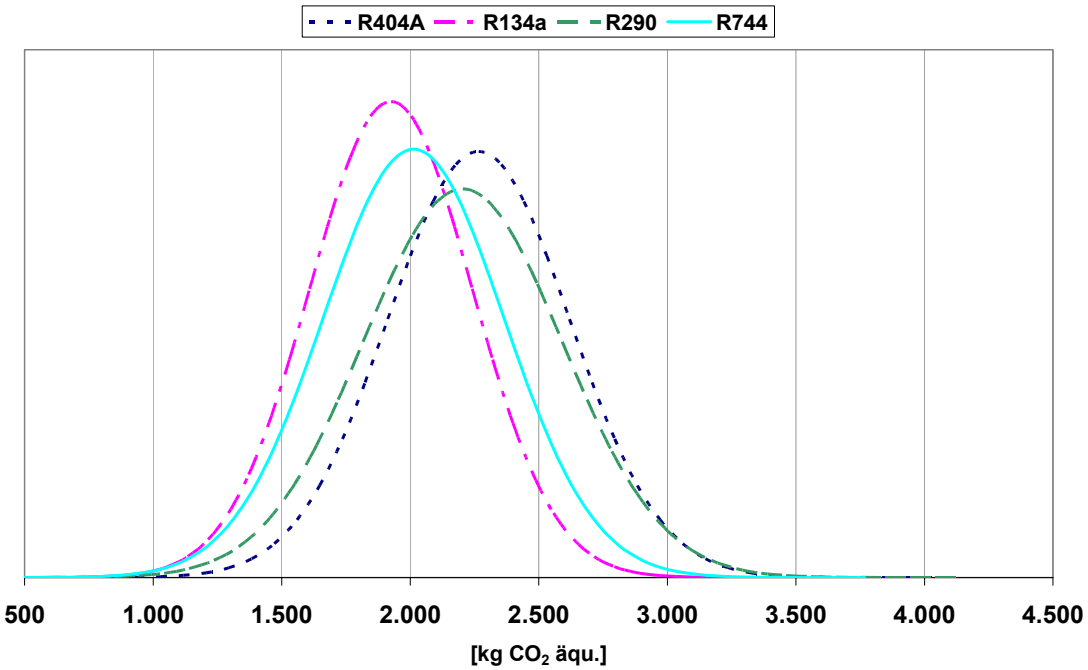



**Abbildung 10: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Discounter in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 2,65 % = Politiksz. 3) (schematisch)**

Die Abbildungen 11-13 stellen die THG-Emissionen der verschiedenen Auslegungsvarianten in den drei Politikszenarien aufgeteilt nach Energie- und Kältemittelemissionen dar. Durch strengere Vorgaben reduzieren sich die Kältemittelemissionen aller Auslegungsvarianten mit aufsteigender Nummer des Politikszenarios. Durch den höheren Anteil der Kältemittelemissionen an den Gesamtemissionen für die Auslegungsvarianten I und II fällt der Effekt für diese Varianten allerdings deutlicher aus. So verringern sich die Unterschiede zwischen den Auslegungsvarianten, was zur Folge hat dass Variante II, die im Politikszenario I die zweithöchsten Emissionen aufweist, unter Politikszenario III die emissionsärmste ist.

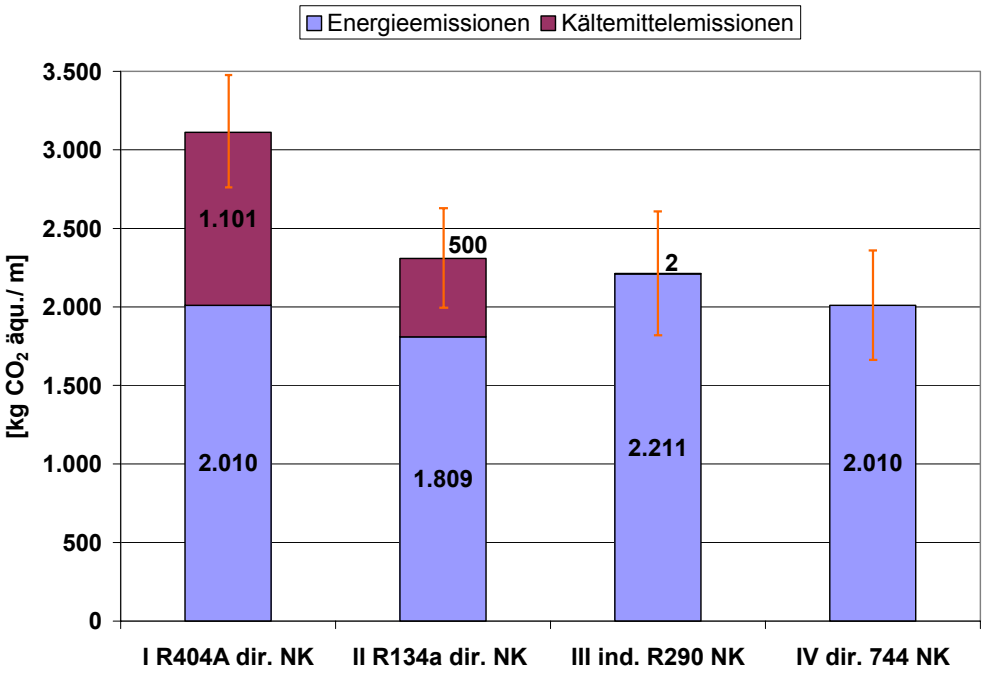



**Abbildung 11: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Discounter mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 11,65 %)**

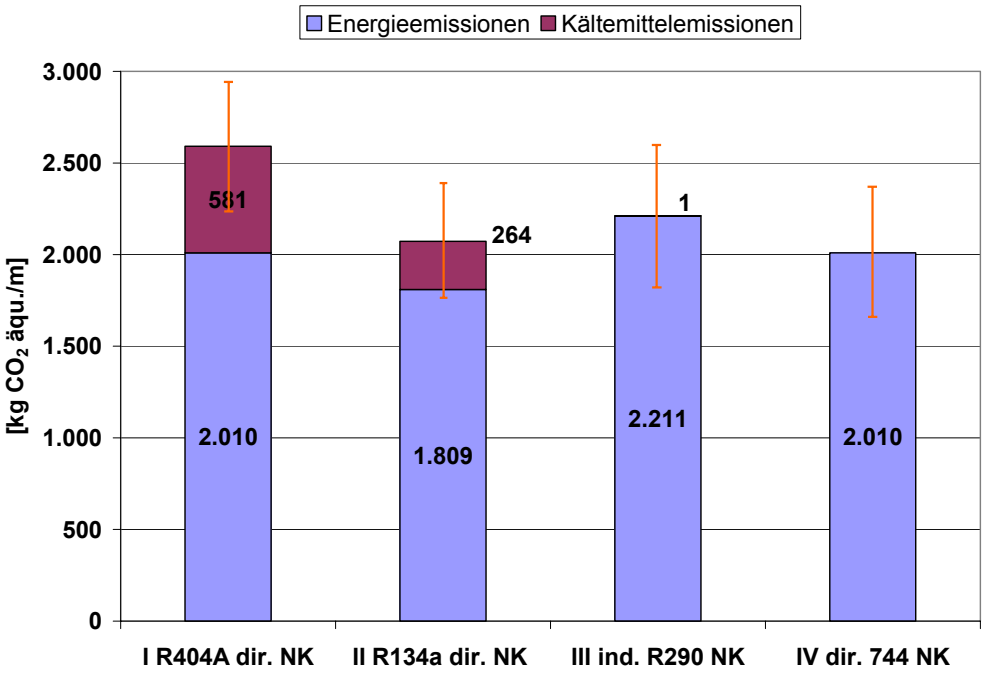



**Abbildung 12: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Discounter mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 6,15 %)**

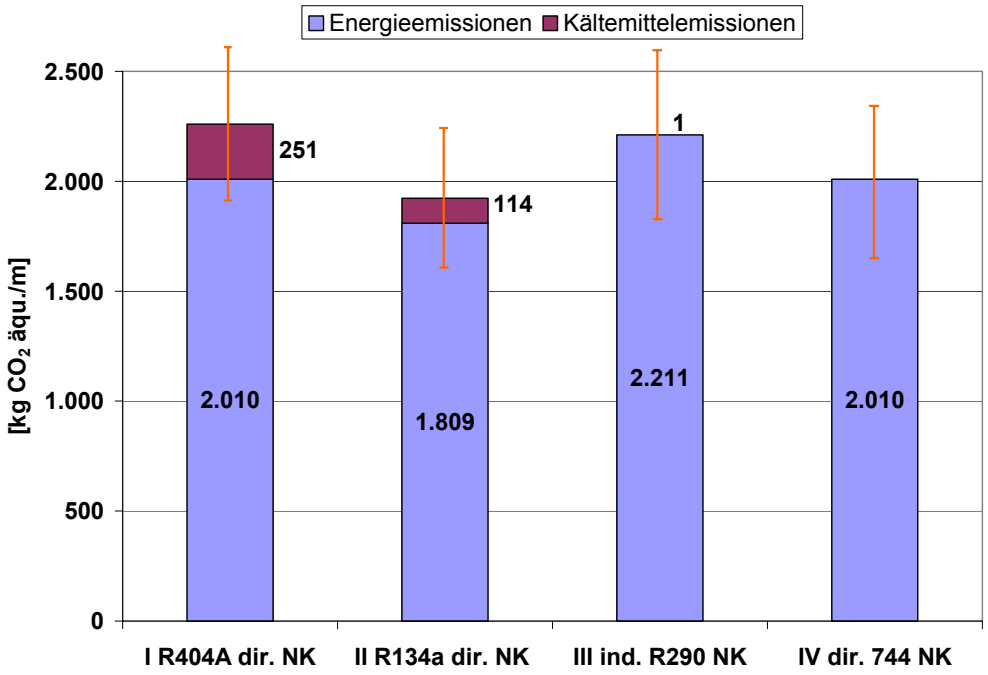



**Abbildung 13: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Discounter mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 2,65 %)**

Aus den TEWI-Analysen ergeben sich je nach Politikszenario die in Tabelle 20 dargestellten Emissionen aus kältetechnische Einrichtungen zur Erzeugung von Normalkälte pro Discountmarkt in Deutschland.

**Tabelle 20: Jährliche Emissionen pro Discountmarkt in Deutschland (nur NK)**

| | **I R404A dir.** | **II R134a dir.** | **III ind. R290** | **IV dir. 744** |
|---|---|---|---|---|
| | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] |
| Szenario 1 | 70,0 | 52,0 | 49,8 | 45,2 |
| Szenario 2 | 58,3 | 46,6 | 49,8 | 45,2 |
| Szenario 3 | 50,9 | 43,3 | 49,8 | 45,2 |

Für die Bereitstellung der Tiefkühlung werden in der Regel steckerfertige Truhen verwendet. Je nach Kältemittel haben steckerfertige TK-Truhen einen jährlichen Energieverbrauch zwischen 2.400 und 3.000 kWh pro laufenden Meter Kühlmöbel (vgl. Kapitel 3.1). Aufgrund der geringen Füllmengen und hohen Dichtigkeit von steckerfertigen Kühltruhen können Emissionen aus der Verwendung der Kältemittel vernachlässigt werden. Abbildung 14 zeigt die jährlichen Emissionen aus dem Energieverbrauch der Truhen pro Discountmarkt. Ein Markt mit neuen R290-TK-Truhen emittiert zusätzlich zu den in Tabelle 20 dargestellten Emissionen jährliche weitere knapp 60 t $CO_2$ äqu. pro Jahr.

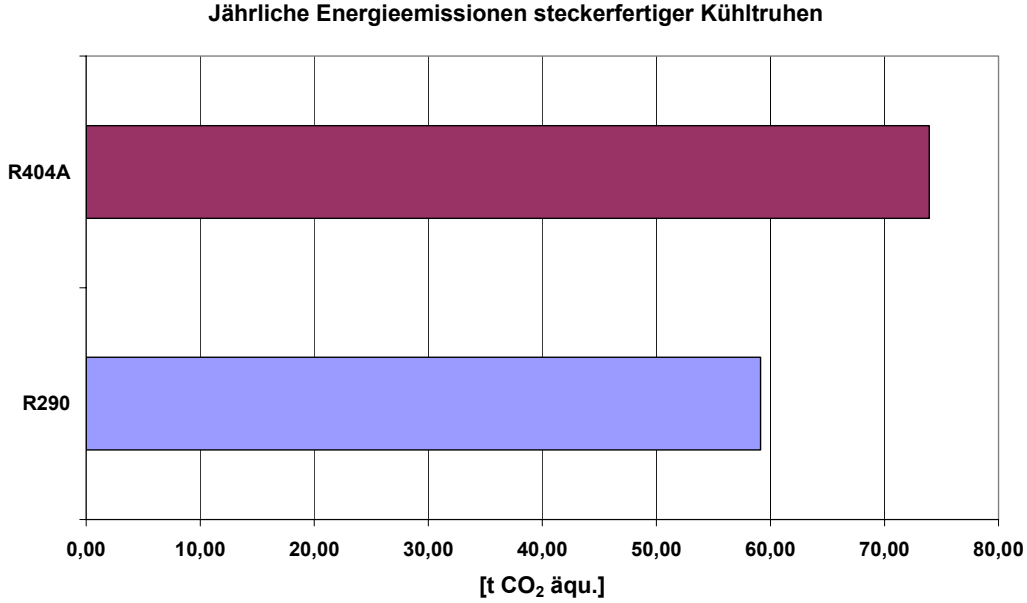



**Abbildung 14: Jährliche THG-Emissionen verursacht durch TK-Truhen im Discounter**

### 5.1.2 Verbrauchermarkt

Für Verbrauchermärkte ergeben die Monte-Carlo-Emissionen in den Abbildungen 15-17 ähnliche Ergebnisse wie zuvor für Discounter. Die THG-Emissionen der Auslegungsvarianten reduzieren sich mit strengeren Auflagen von Politikszenario 1 bis 3 bei den emissionsintensiveren Varianten stärker, wodurch sich die Auslegungsvarianten in ihren Emissionen insgesamt annähern, wobei die Reihenfolge zwischen den Varianten größtenteils erhalten bleibt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Grafiken der Monte-Carlo-Simulation für den Verbrauchermarkt, jeweils in zwei untereinander angeordneten Koordinatensystemen dargestellt.

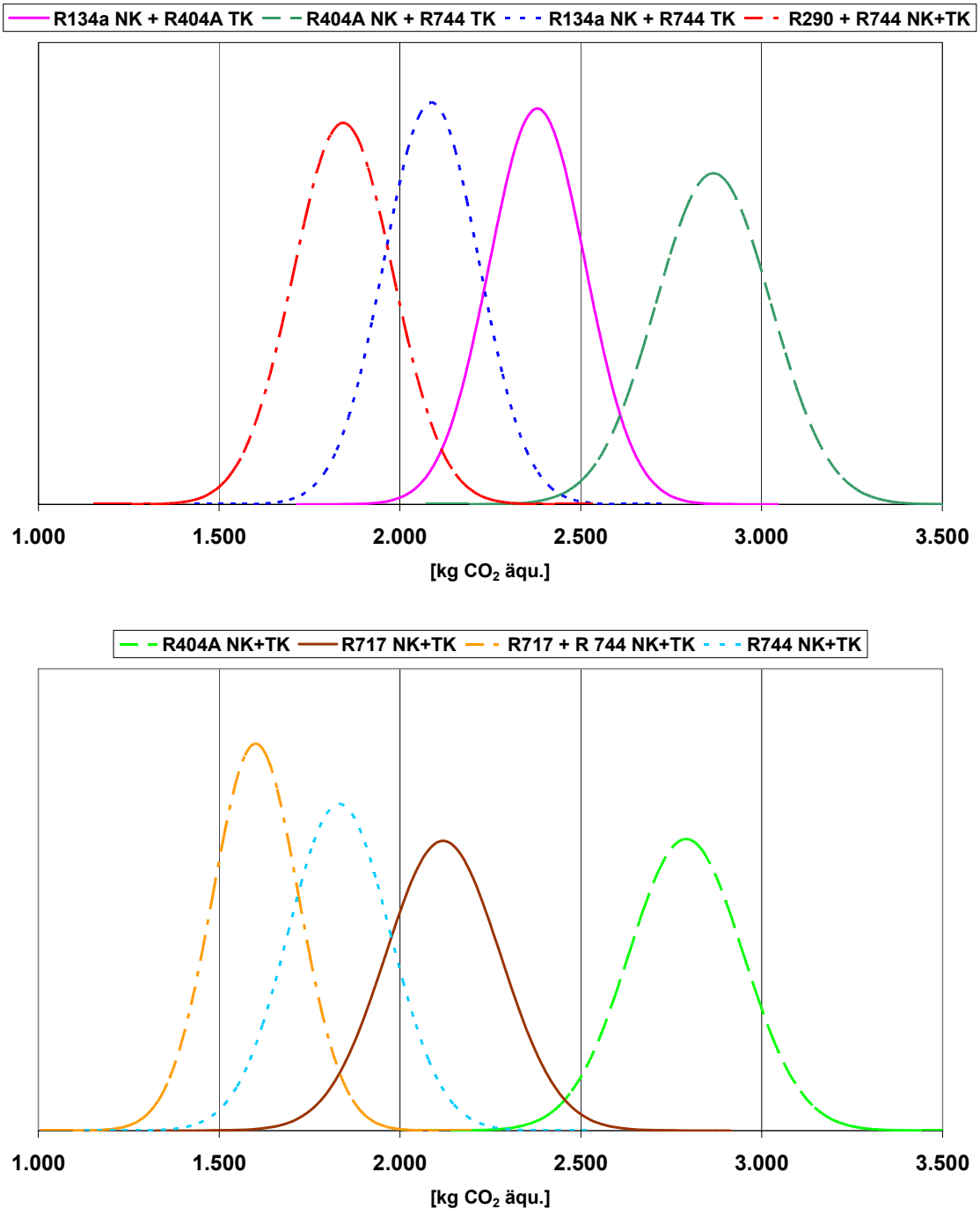



**Abbildung 15: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 11,65 %) (schematisch)**

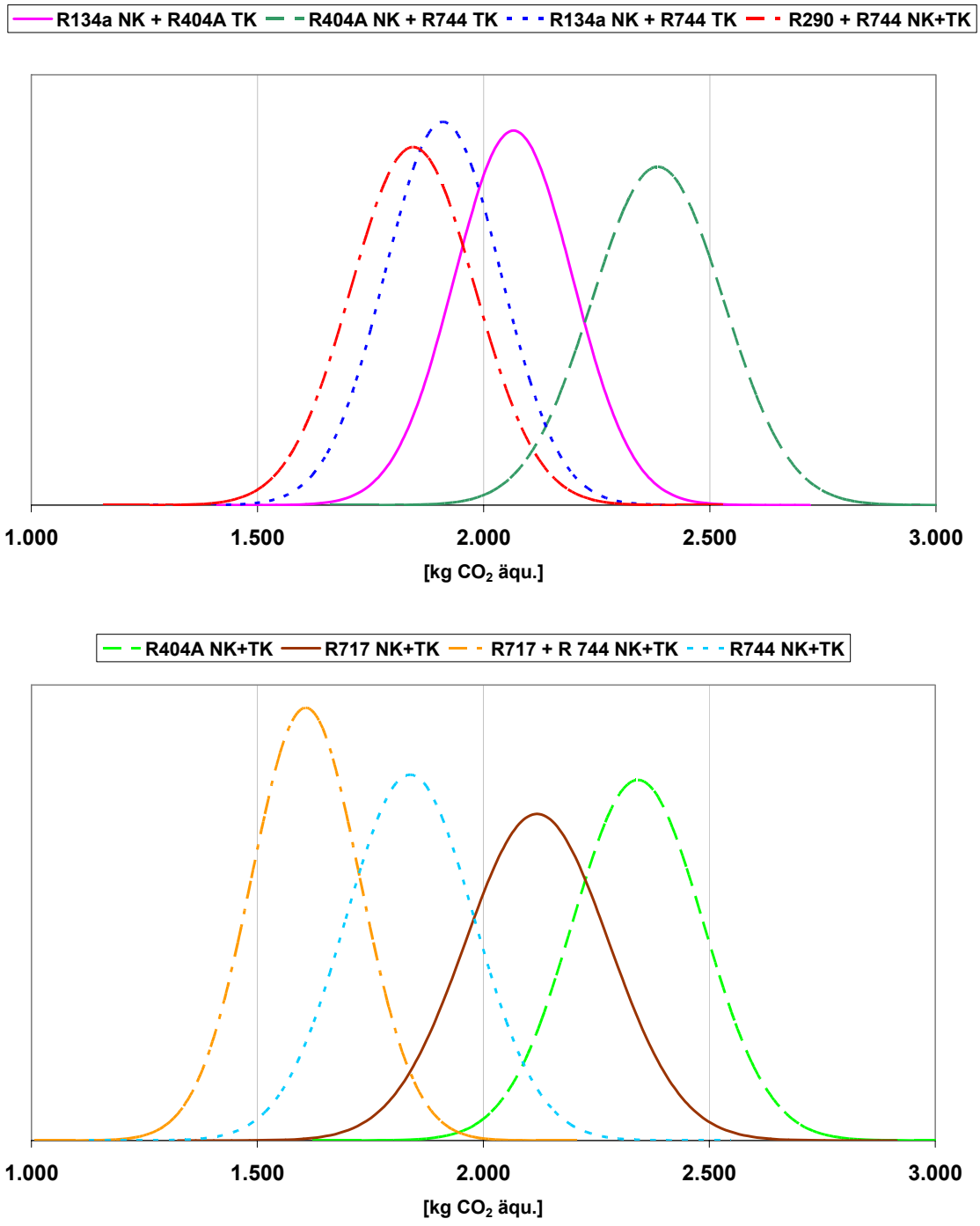



**Abbildung 16: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 6,15 %) (schematisch)**

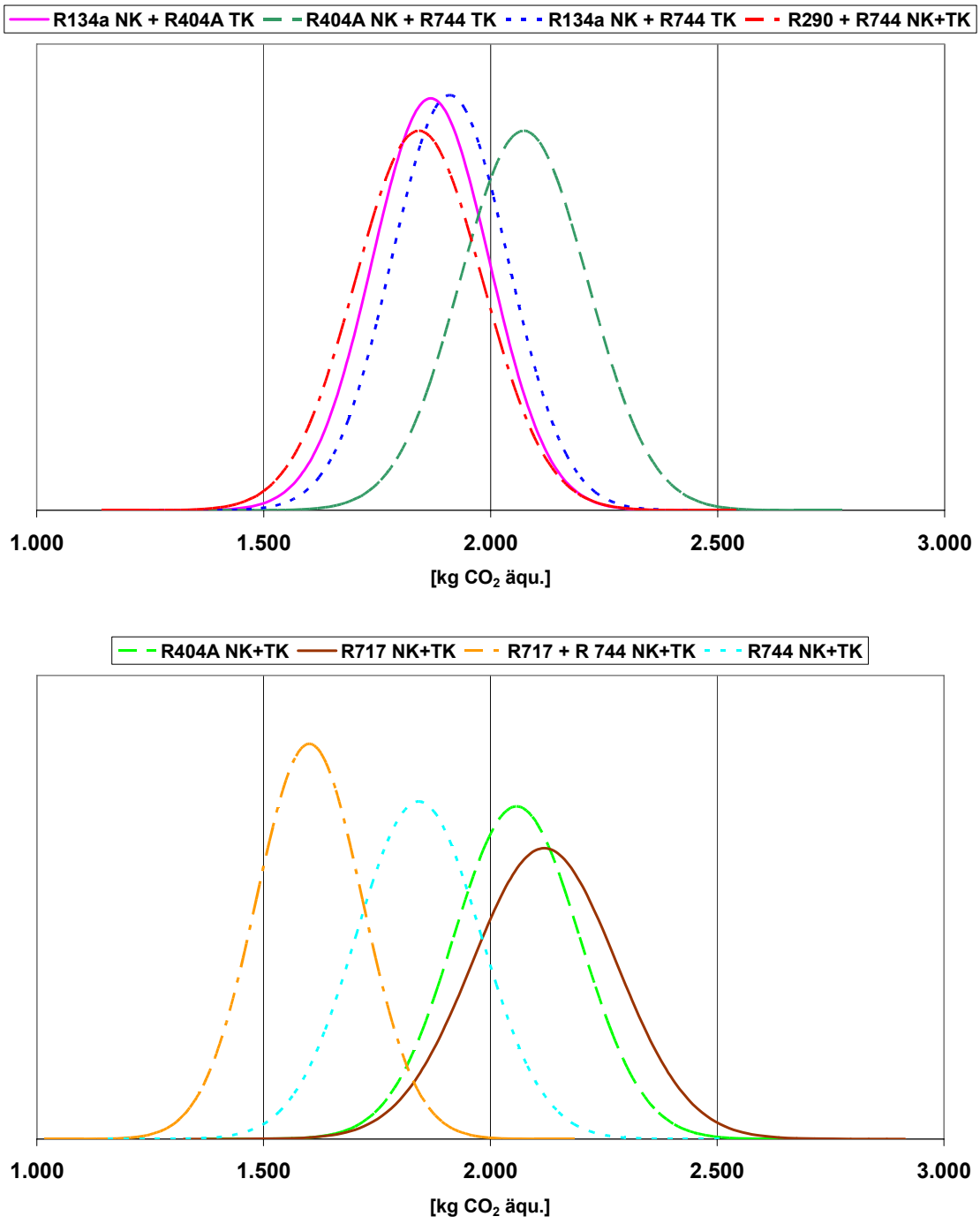



**Abbildung 17: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 2,65 %) (schematisch)**

Die Abbildungen 18 bis 20 stellen die Emissionen der Auslegungsvarianten in den Politikszenarien 1 bis 3 nach Energie- und Kältemittelemissionen differenziert dar. Stellen im Politikszenario 1 die Auslegungsvarianten Ia bis IIb mit hohen Kältemittelemissionen noch die insgesamt emissionsintensivsten Varianten dar, bewegen sie sich im Politikszenario 3 im Mittelfeld. Die Differenz zwischen bester und schlechtester Variante verringert sich dabei von 1.265 auf 417 kg $CO_2$ äquiv./m.

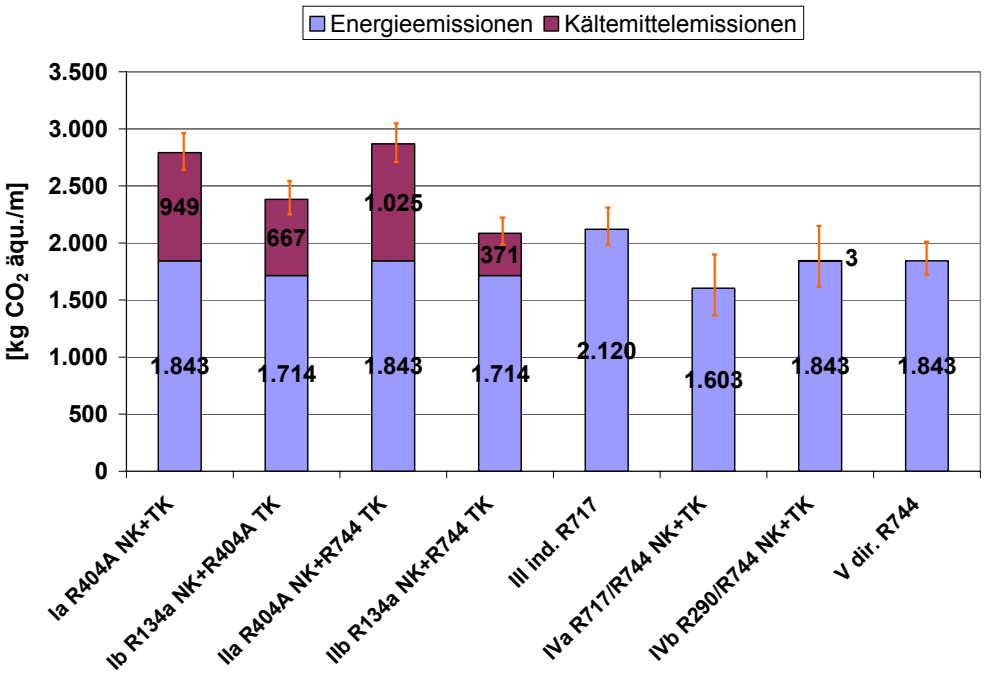



**Abbildung 18: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 11,65 %)**

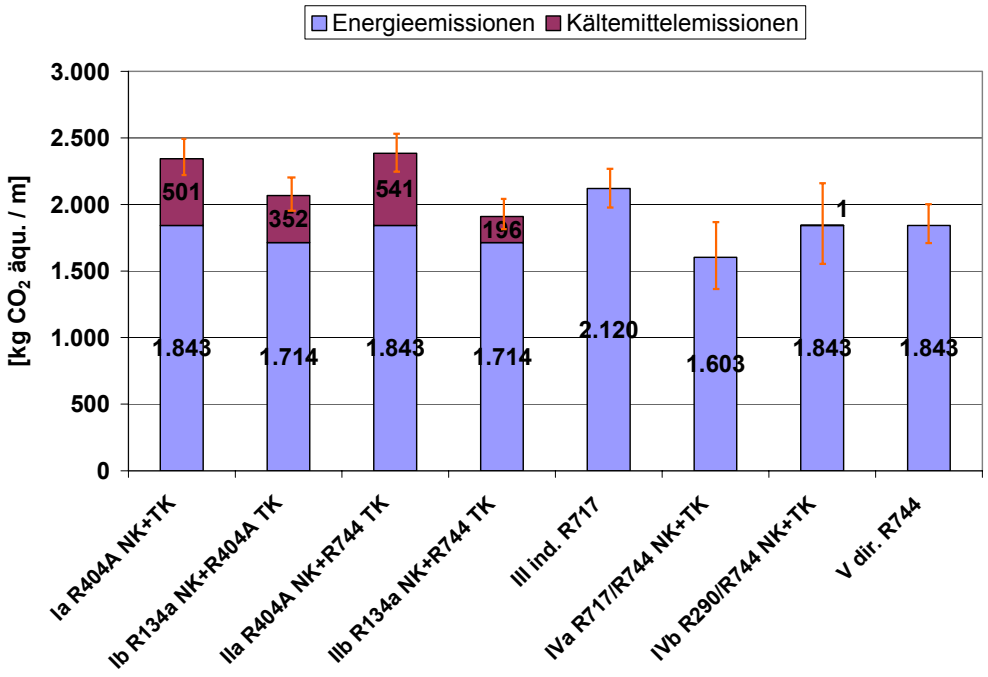



**Abbildung 19: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 6,15 %)**

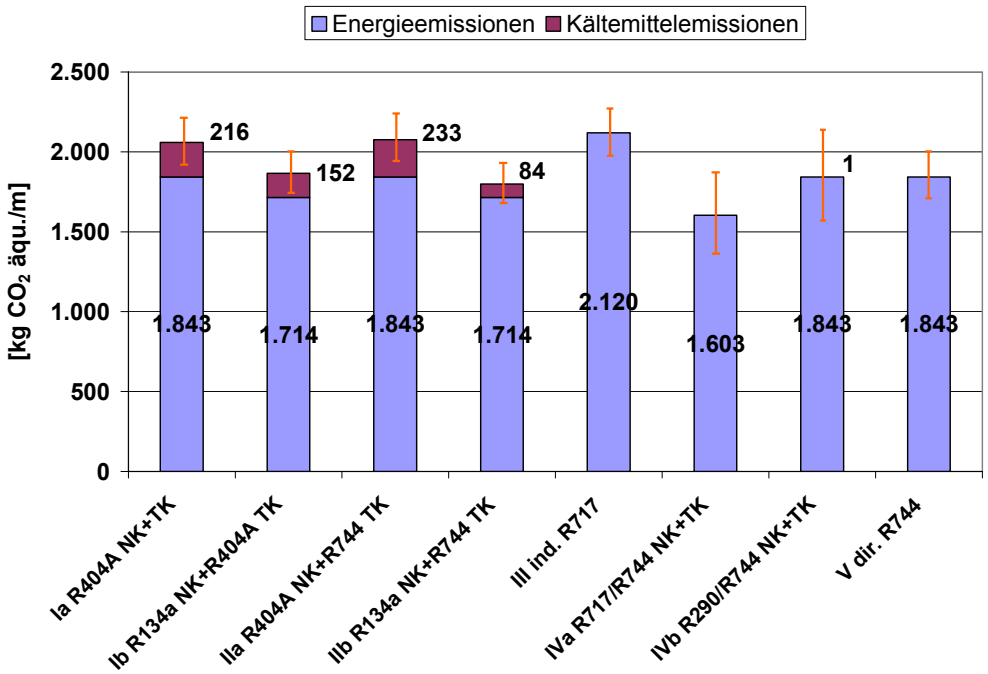



**Abbildung 20: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 2,65 %)**

Aus den TEWI-Analysen ergeben sich je nach Politikszenario die in Tabelle 21 dargestellten durchschnittlichen Emissionen eines Verbrauchermarkts in Deutschland. Es wird deutlich, dass die Emissionen von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln in den drei Szenarien gleich bleiben, da die unterschiedlichen politischen Rahmenbedingungen der einzelnen Szenarien aufgrund des geringen GWPs der natürlichen Kältemittel nur Auswirkungen auf Anlagen mit HFKW haben.

**Tabelle 21: Jährliche Emissionen pro Verbrauchermarkt in Deutschland**

| | **Ia R404A NK+TK** | **Ib R134a NK+R404A TK** | **IIa R404A NK+R744 TK** | **IIb R134a NK+R744 TK** |
|---|---|---|---|---|
| | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] |
| Szenario 1 | 265,3 | 226,3 | 272,5 | 198,1 |
| Szenario 2 | 222,7 | 196,3 | 226,5 | 181,5 |
| Szenario 3 | 195,6 | 177,3 | 197,3 | 170,9 |
| | **III ind. R717** | **IVa R717/R744 NK+TK** | **IVb R290 /R744 NK+TK** | **IV dir. 744** |
| | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] |
| Szenario 1 | 201,4 | 152,3 | 175,3 | 175,1 |
| Szenario 2 | 201,4 | 152,3 | 175,2 | 175,1 |
| Szenario 3 | 201,4 | 152,3 | 175,1 | 175,1 |

### 5.1.3 SB-Warenhaus

Bei den für SB-Warenhäuser identifizierten drei Auslegungsvarianten besteht nur bei der Variante R404A ein Reduktionspotential der direkten Emissionen, das durch strengere politische Vorgaben zur Dichtigkeit ausgeschöpft werden kann. So nähert sich die in den Abbildungen 21-23 dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Emissionen für diese Variante den Verteilungen der beiden anderen Varianten von Politikszenario 1 zu 3 hin deutlich an.

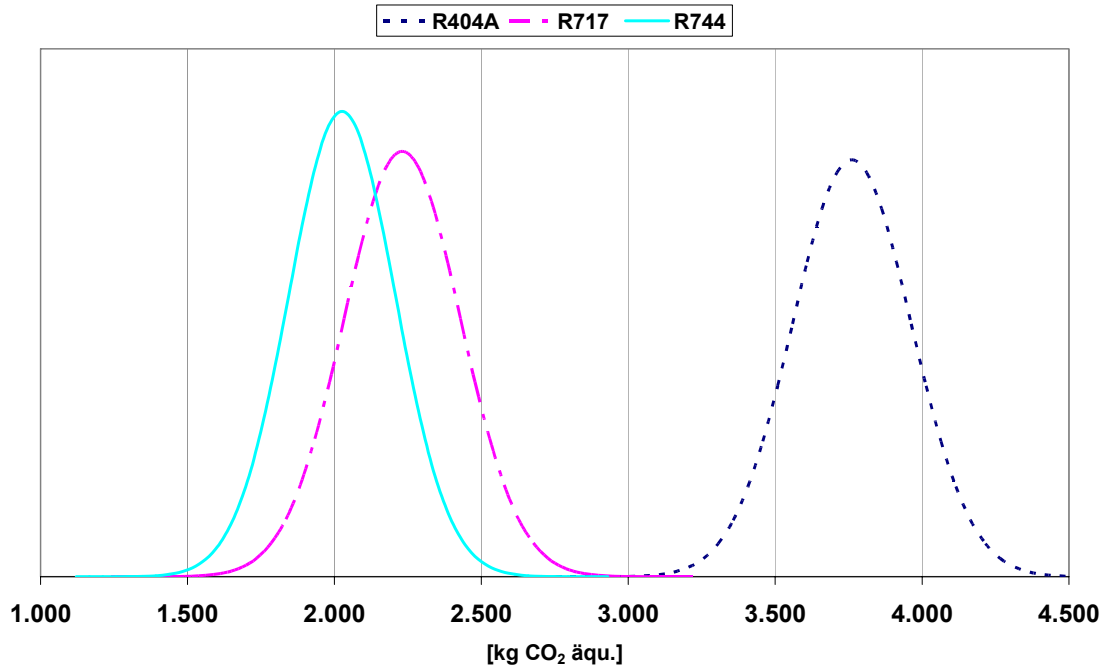



**Abbildung 21: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für SB-Warenhäuser in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 11,65 %) (schematisch)**

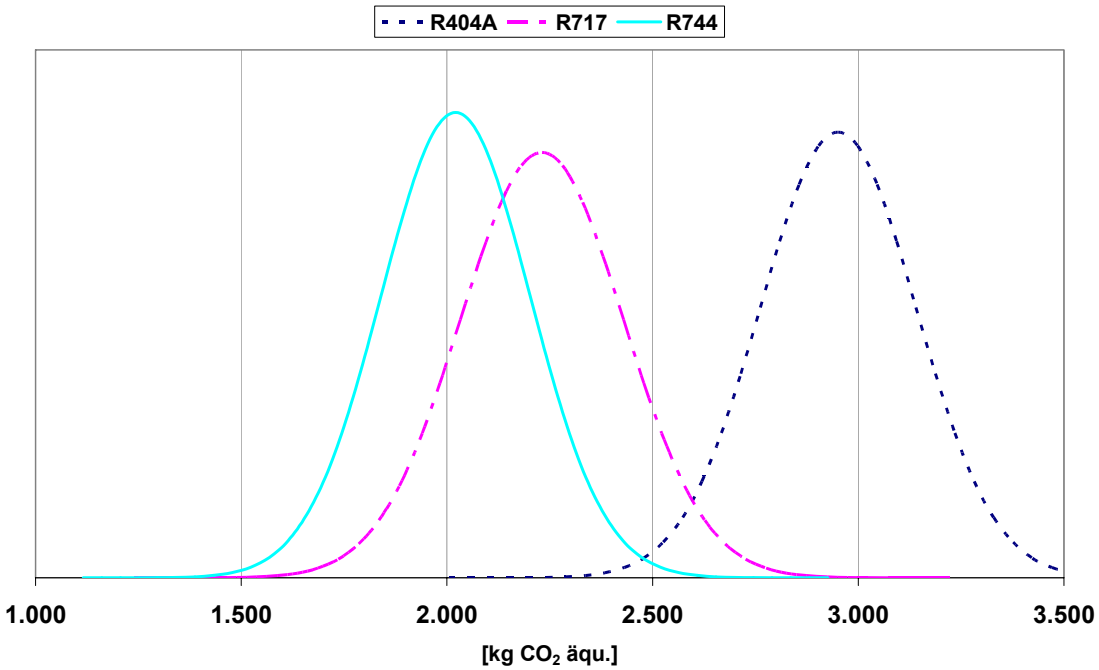



**Abbildung 22: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 6,15 %) (schematisch)**

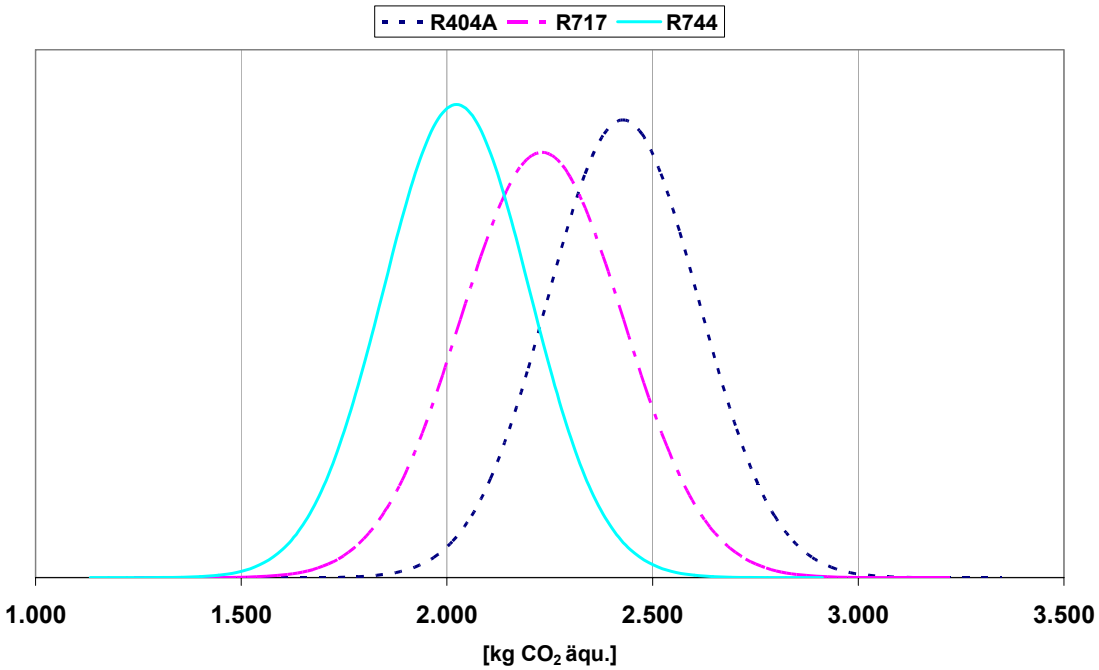



**Abbildung 23: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für SB-Warenhäuser in verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 2,65 %) (schematisch)**

Auch bei der Differenzierung nach Energie- und Kältemittelemissionen ergibt sich ein Reduktionspotential der Kältemittelemissionen lediglich für die Auslegungsvariante Ia. Dadurch nähern sich die Gesamtemissionen der Varianten im Politikszenario 3 deutlich an, die Reihenfolge unter den Anlagen bleibt jedoch erhalten.

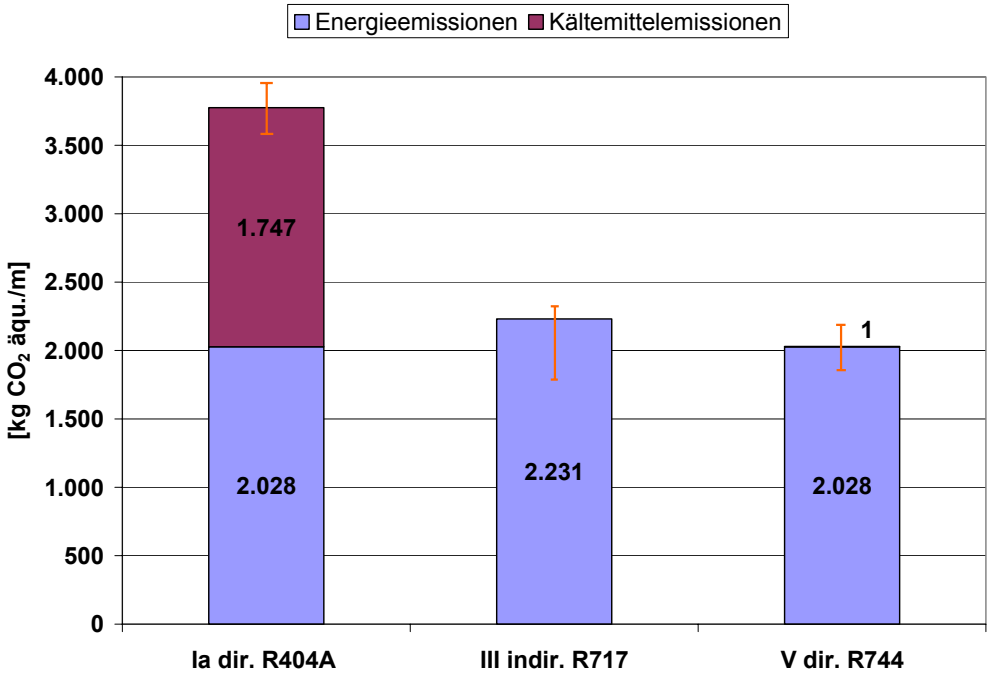



**Abbildung 24: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für SB-Warenhäuser mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 11,65 %)**

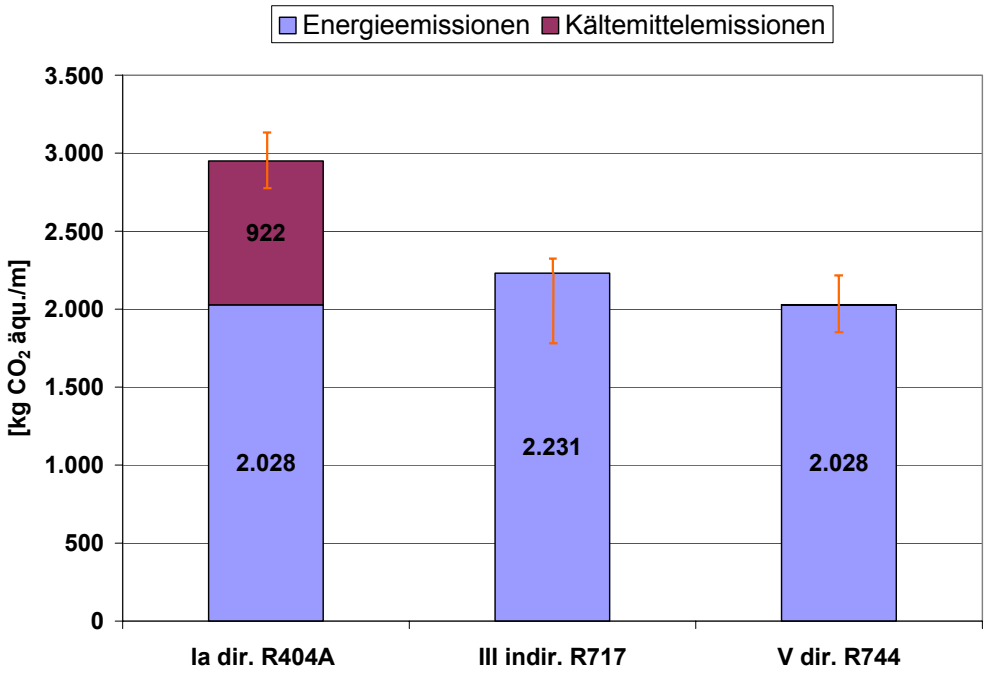



**Abbildung 25: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für SB-Warenhäuser mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 6,15 %)**

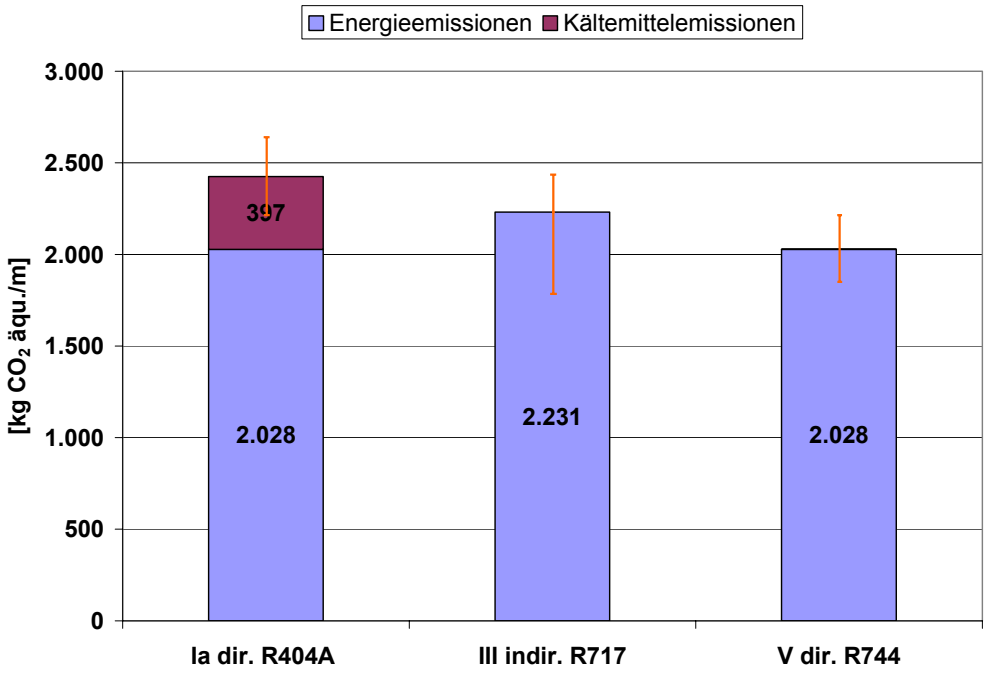



**Abbildung 26: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für SB-Warenhäuser mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Verlustrate 2,65 %)**

Für ein SB-Warenhaus in Deutschland ergeben sich die jährlichen Emissionen aus kältetechnischen Einrichtungen entsprechend Tabelle 22. Aufgrund der Anlagengröße sind hier die größten Minderungspotentiale pro Markt zu sehen.

**Tabelle 22: Jährliche Emissionen pro SB-Warenhaus in Deutschland**

| | **I R404A dir.** | **III indir. R717** | **IV dir. 744** |
|---|---|---|---|
| | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] | [t $CO_2$ äqu./a] |
| Szenario 1 | 924,9 | 546,5 | 497,0 |
| Szenario 2 | 722,8 | 546,5 | 496,9 |
| Szenario 3 | 594,2 | 546,5 | 496,9 |

### 5.1.4 Diskussion

Die Ergebnisse der TEWI-Analysen zeigen ein erhebliches Minderungspotential bei der Anwendung von Kälteanlagen im LEH, insbesondere für die Referenztechnologie. Mit höherer Anlagendichtigkeit nähern sich unterdessen die Emissionsunterschiede von Referenztechnologie und Alternativtechnologie mit natürlichen Kältemitteln an. Es ist deutlich zu erkennen, dass die im deutschen LEH am weitesten verbreitete Anlagentechnologie mit R404A in allen 3 untersuchten Ladenformaten deutlich höhere Emissionen gegenüber den anderen Technologien aufweist. Um die Nachteile der Referenztechnologie mit HFKW-haltigen Kältemitteln zu verringern, müssen erhebliche Aufwendungen in Bezug auf Anlagendichtigkeit getroffen werden. Im Rahmen der EU-F-Gas Verordnung werden eine Vielzahl von Maßnahmen, die zu einer höheren Dichtigkeit von Kälteanlagen führen sollen, gesetzlich gefordert. Die Ergebnisse für Politikszenario 2, welches die Situation unter konsequenter Anwendung der F-Gas Verordnung widerspiegelt, zeigen jedoch, dass alternative Anlagenkonzepte mit natürlichen Kältemitteln dennoch ökologisch besser sind.

Erst bei nahezu vollständig dichten Kälteanlagen, wie es im dritten Politikszenario dargestellt ist, sind Anlagen mit natürlichen Kältemitteln nur noch geringfügig emissionsärmer. Reduktionspotentiale der indirekten Emissionen durch Energieeffizienzmaßnahmen sind hier nicht berücksichtigt.

### 5.1.5 Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs

Wie bereits beschrieben sind bei den gemessenen Energieverbräuchen erhebliche Schwankungen zu erkennen. Der Einfluss der Schwankungen wird bereits anhand der durchgeführten Monte-Carlo-Simulation veranschaulicht. Da in der aktuellen politischen Diskussion um klimafreundliche Kältetechnik neben der Wahl des Kältemittels vor allem auch die Energieeffizienz der Anlagen in der Vordergrund gestellt wird, werden an dieser Stelle in einem zweiten Schritt nun für die TEWI-Berechnungen Sensitivitätsanalysen durchgeführt, bei denen nur die Energieverbräuche der Modelltechnologien variiert werden. Durch das Variieren des Energieverbrauchs um +/- 25 % wird im Folgenden deutlich, welche erheblichen zusätzlichen Emissionseinsparungen durch besonders energieeffiziente Kälteanlagen erzielt werden können.

**Discounter**

Die Abbildungen 27-29 stellen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für die Modelltechnologien des Discounters je Politikszenario dar. Insgesamt ergeben sich bei geringeren Energiverbräuchen und strengeren gesetzlichen Auflagen natürlich geringere TEWI-Werte. Durch den höheren relativen Anteil der Energieemissionen der Ausgestaltungsvarianten III und IV fallen die Emissionsminderungen durch reduzierten Energieverbrauch bei diesen Varianten deutlicher aus, als bei den Varianten I und II, insbesondere in Politikszenario 1. In Politikszenario 3 hingegen hat bei höchster Dichtigkeit der Anlagen der Energieverbrauch den entscheidenden Einfluss auf die Klimarelevanz der Technologie.

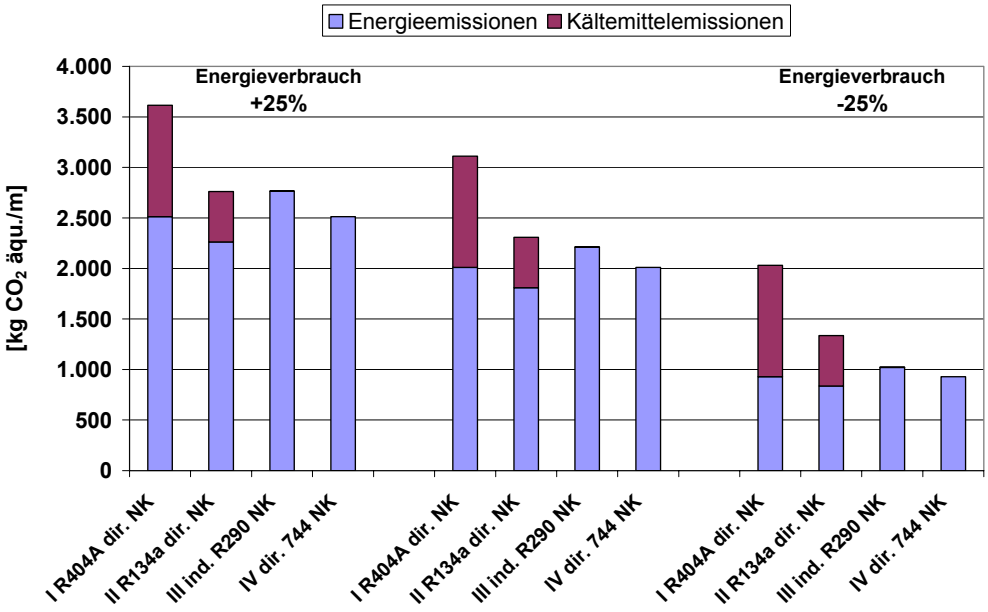



**Abbildung 27: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im Discounter (Verlustrate 11,65%)**

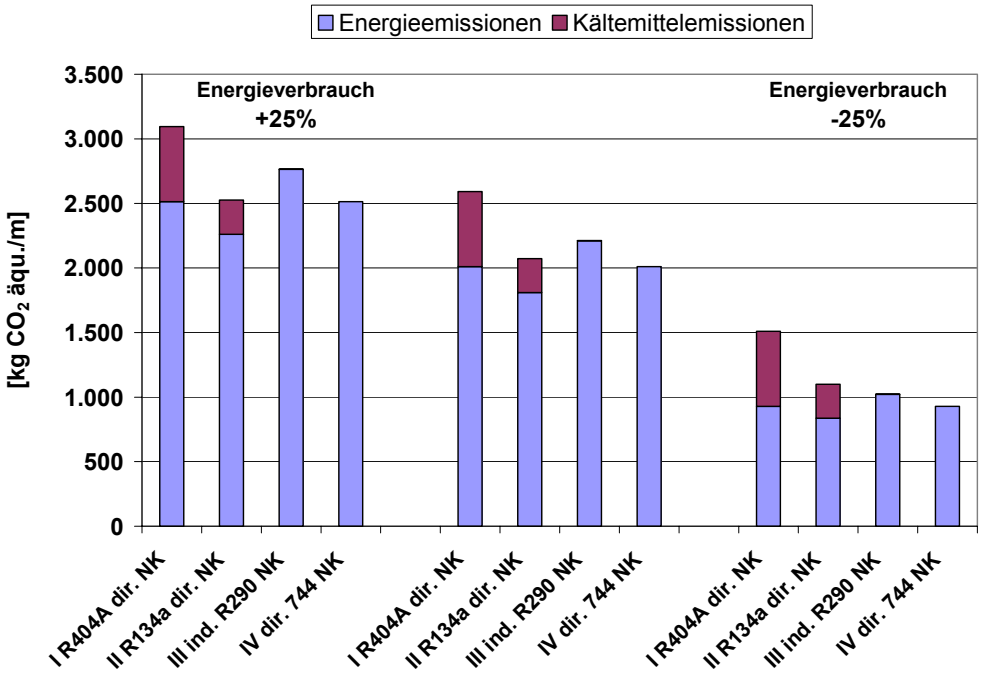



**Abbildung 28: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im Discounter (Verlustrate 6,15%)**

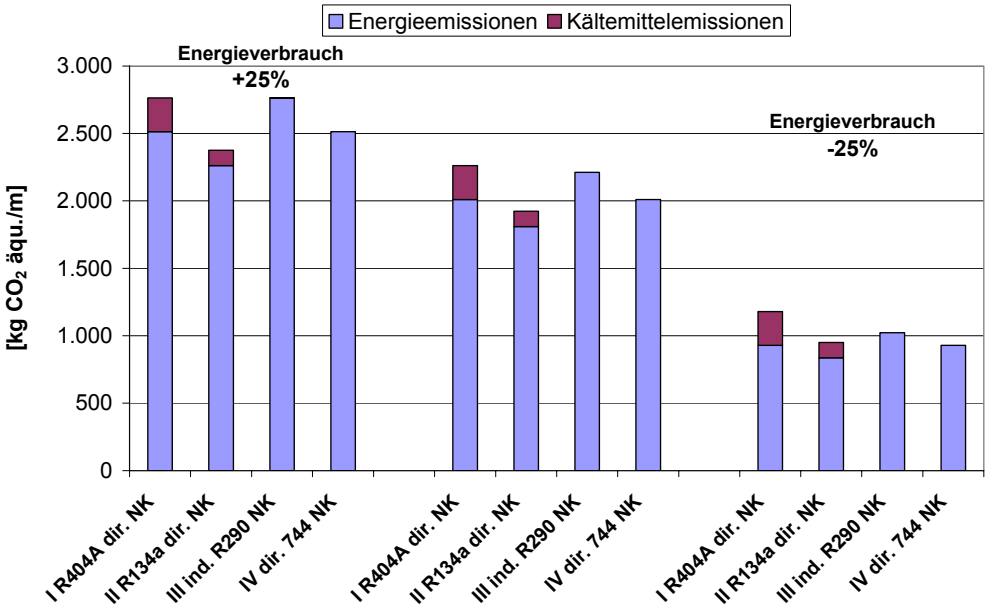



**Abbildung 29: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im Discounter (Verlustrate 2,65%)**

**Verbrauchermarkt**

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für Anlagen in Verbrauchermärkten sind in den Abbildungen 30-32 zu finden. Auch hier führt eine Variierung des Energieverbrauchs dazu, dass sich die TEWI-Werte der Ausgestaltungsvarianten ohne Kältemittelemissionen den TEWI-Werten der Varianten mit Kältemittelemissionen annähern (+25% Energieverbrauch) bzw. deutlich darunter liegen (-25% Energieverbrauch). Dies gilt besonders für das Politikszenario 1, während die relativen Unterschiede zwischen den Varianten im Politikszenario 3 größtenteils erhalten bleiben.

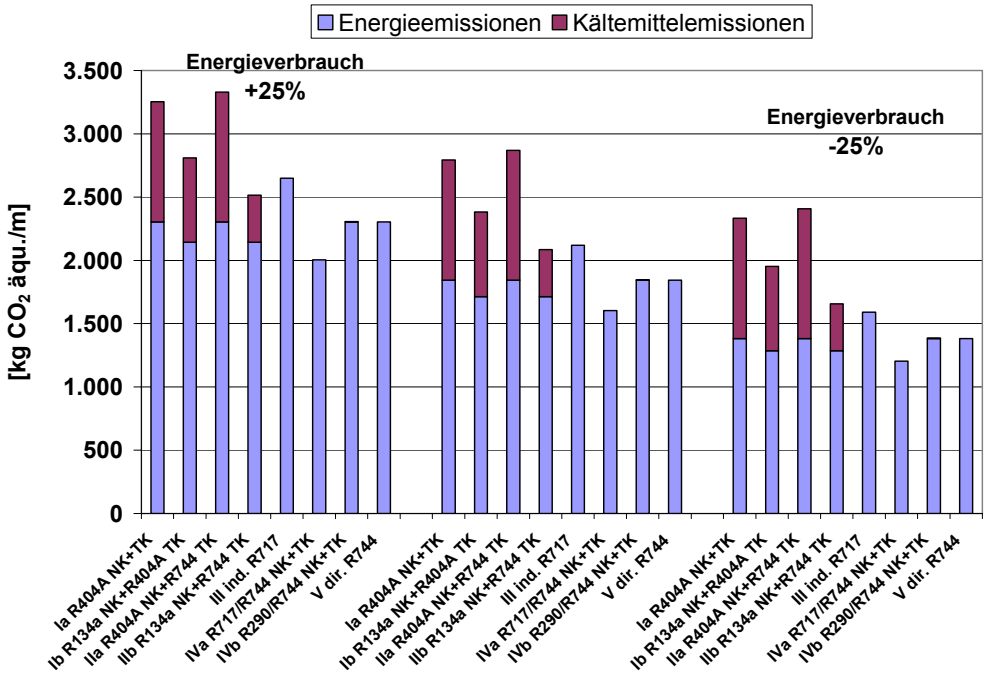



**Abbildung 30: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im Verbrauchermarkt (Verlustrate 11,65%)**

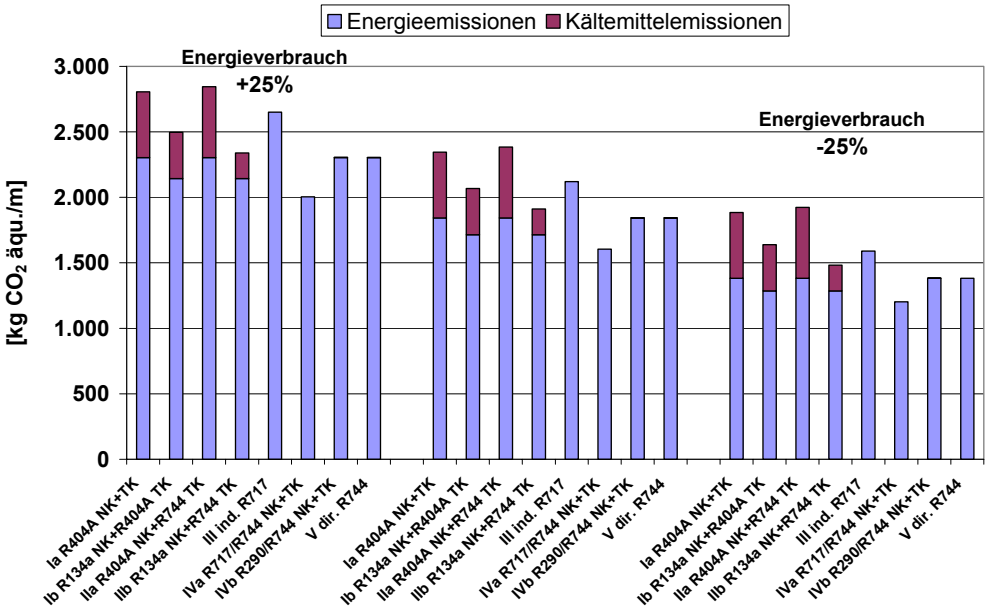



**Abbildung 31: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im Verbrauchermarkt (Verlustrate 6,15%)**

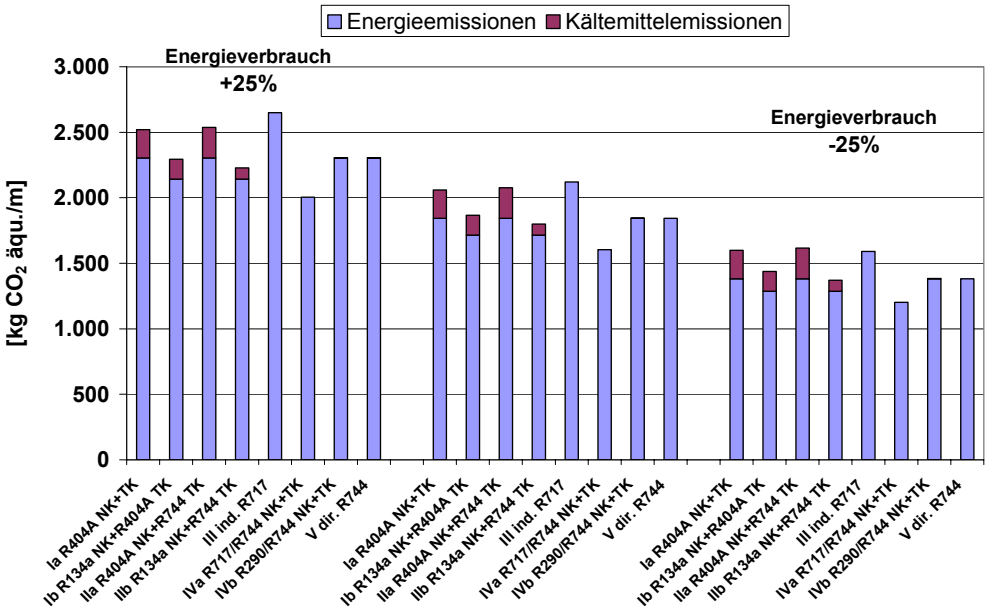



**Abbildung 32: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im Verbrauchermarkt (Verlustrate 2,65%)**

**SB-Warenhaus**

Für die drei Varianten für SB-Warenhausanlagen, von denen die Referenzvariante Ia deutlich höhere (Kältemittel-)Emissionen als die kältemittelemissionsfreien Varianten III und IV aufweist, wird in den Abbildungen 33-35 dargestellt, wie sich die Energievariationen und Politikszenarien auf die TEWI-Werte auswirken.

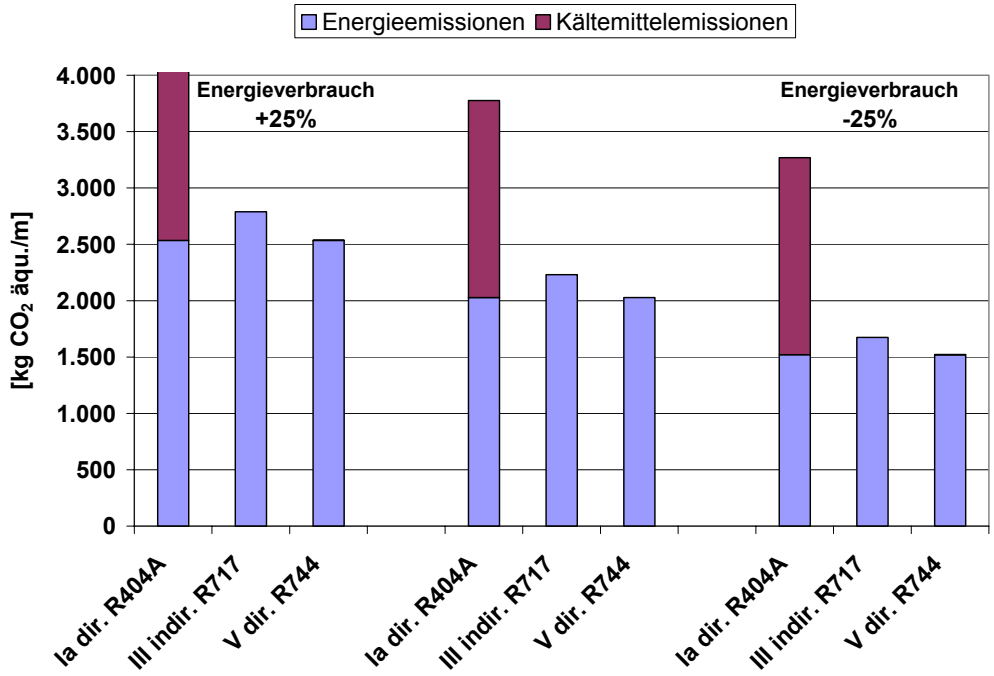



**Abbildung 33: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im SB-Warenhaus (Verlustrate 11,65%)**

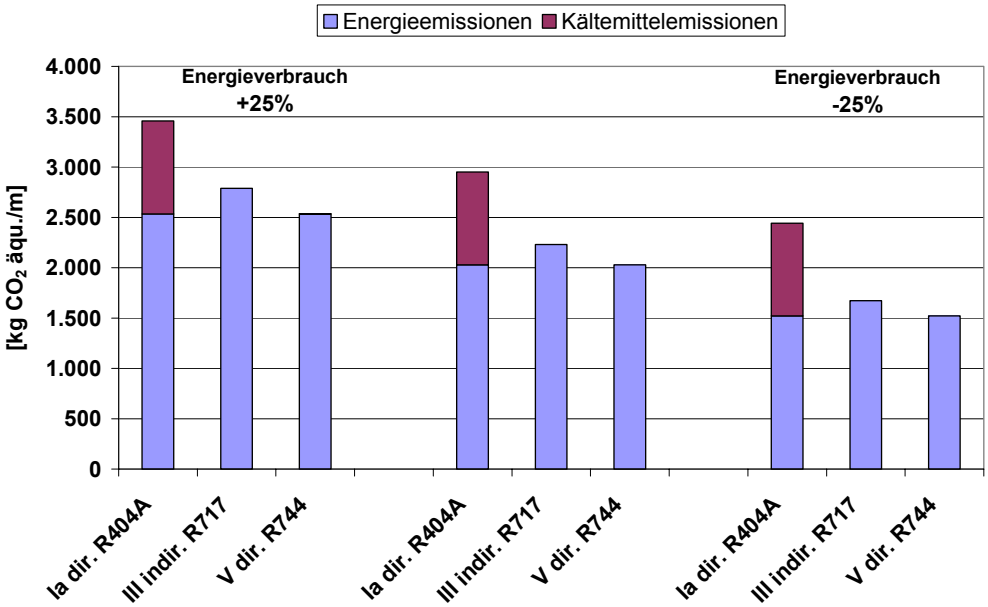



**Abbildung 34: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im SB-Warenhaus (Verlustrate 6,15%)**

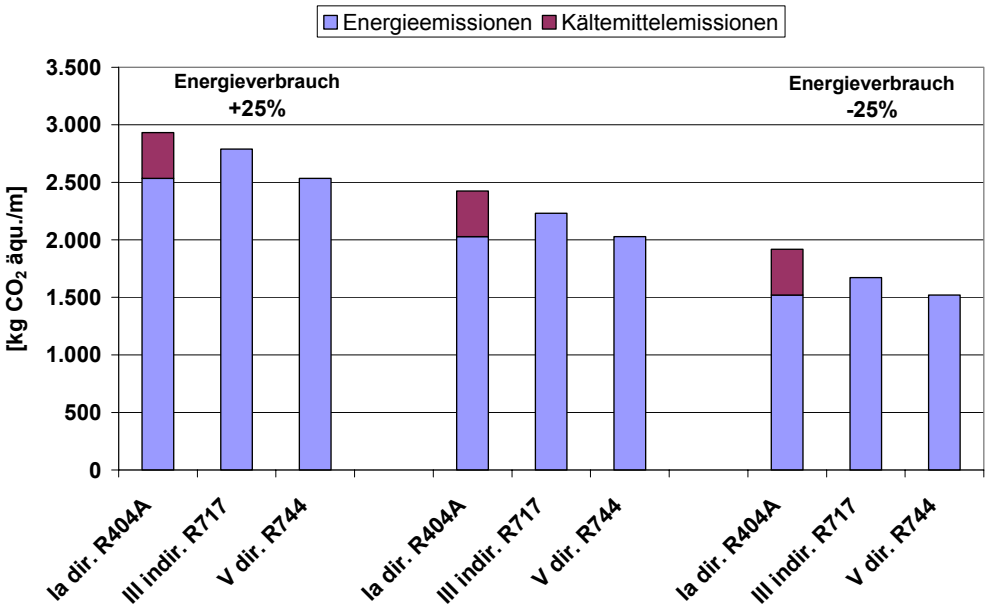



**Abbildung 35: Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs auf jährliche Treibhausgasemissionen der Modelltechnologien im SB-Warenhaus (Verlustrate 2,65%)**

### 5.1.6 Einfluss des jährlichen Kältemittelverlusts

Aus den oben gezeigten Ergebnissen der TEWI-Analysen wird bereits deutlich welchen Einfluss die Anlagendichtigkeit auf die Gesamtemissionen einer kältetechnischen Anlage mit HFKW hat. Die drei geschilderten Politikszenarien setzen kontinuierliche Verbesserungen eines bereits hohen Standards der Anlagendichtigkeit durch strengere politische Auflagen und verbesserte Anlagentechnologie vorraus. Trotz aller Maßnahmen kommt es in der Praxis durch Havarien immer wieder zu Totalverlusten von Kältemitteln. Obwohl durch ein wachsendes Bewusstsein von Betreibern, Herstellern und Wartungspersonal auch die Anzahl von Havarien abnehmen wird, werden Kältemitteltotalverluste von Anlagen nie ganz zu verhindern sein. Es ist daher aus heutiger Sicht zu vermuten, dass die durchschnittlichen jährlichen Kältemittelverlustraten häufig deutlich über den in dieser Studie verwendeten Verlustraten liegen. Zur Veranschaulichung werden im Folgenden die TEWI-Analysen mit Verlustraten von 15 %, 20 % und 25 % für jedes der 3 Ladenformate neu berechnet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 27, 28 und 29 dargestellt.

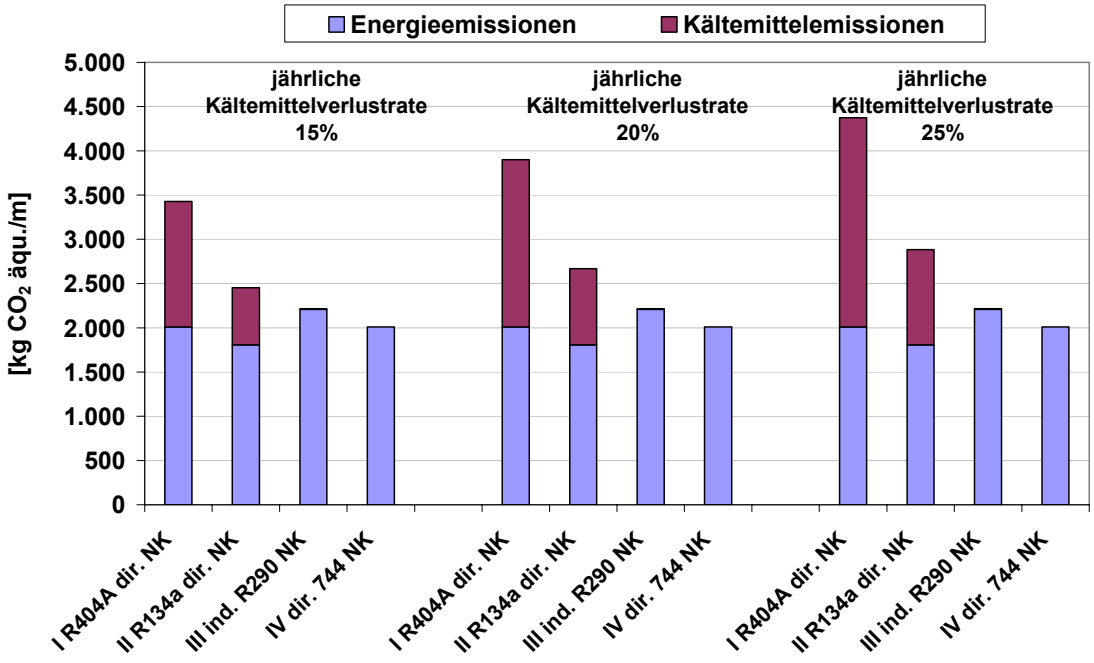



**Abbildung 27: Einfluss der Kältemittelverlustrate auf die jährlichen Emissionen der Modelltechnologien im Disounter**

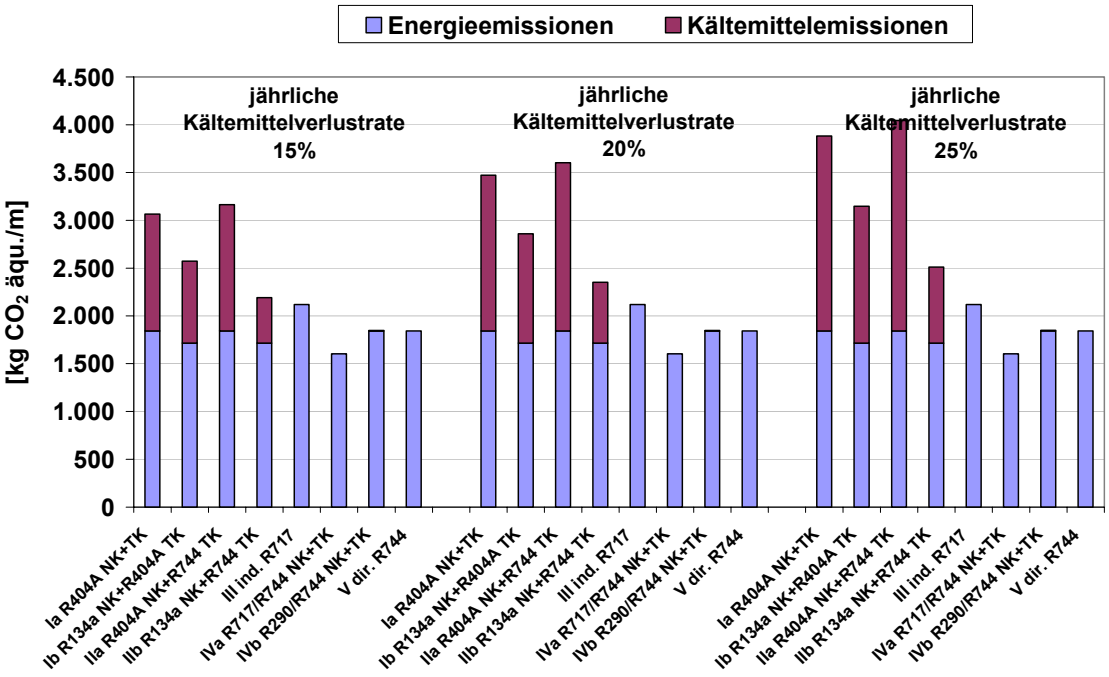



**Abbildung 28: Einfluss der Kältemittelverlustrate auf die jährlichen Emissionen der Modelltechnologien im Verbrauchermarkt**

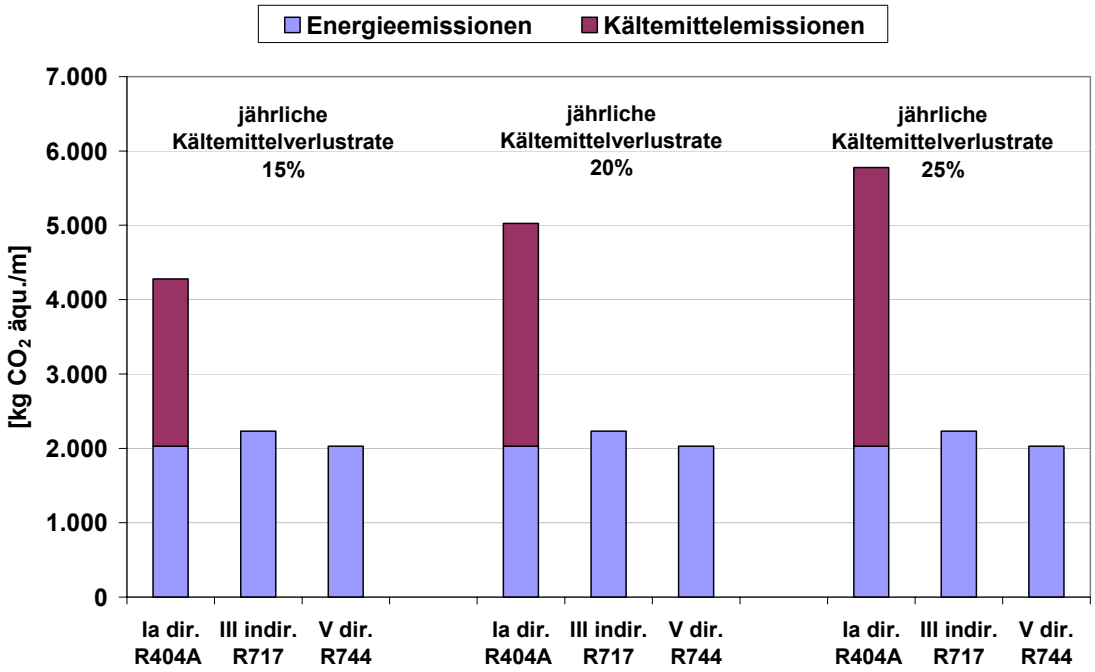



**Abbildung 29: Einfluss der Kältemittelverlustrate auf die jährlichen Emissionen der Modelltechnologien im SB-Warenhaus**

Die Abbildungen 27-29 verdeutlichen die signifikanten Mehremissionen von herkömmlichen Anlagen mit HFKW bei hohen jährlichen Kältemittelverlusten.
Wie hoch die jährlichen Kältemittelverluste im Einzelhandel tatsächlich sind kann derzeit nur geschätzt werden. Aufschlüsse werden in naher Zukunft hoffentlich die seit dem 4. Juli 2007 von der EU Verordnung (EG) Nr. 842/2006 geforderten Betriebshandbücher für Kälte- und Klimaanlagen mit einer Kältemittelfüllmenge > 3 kg geben. Dort müssen Anlagenbetreiber unter anderem Buch über nachgefüllte Kältemittelmengen und die bei Wartung, Instandhaltung und endgültiger Entsorgung zurückgewonnene Kältemittelmenge führen.
Die hier angenommenen höheren Kältemittelverluste würden sich auch mindernd auf die in Kapitel 5.3 errechneten Vermeidungskosten auswirken. Ein entsprechender Vergleich der Vermeidungskosten bei höheren Kältemittelemissionen als in den drei Politikszenarien ist in Kapitel 5.3 aufgeführt.

## 5.2 Klimarelevanz des deutschen Lebensmitteleinzelhandels

Auf Basis der TEWI-Analysen lassen sich die Gesamtemissionen kältetechnischer Einrichtungen im deutschen Lebensmitteleinzelhandel abschätzen. Hierzu wurden die errechneten „pro-Markt"-Emissionen (vgl. Tabellen 19-21) mit Hilfe der aktuellen Verkaufsfläche deutscher Lebensmittelgeschäfte im Jahr 2006 für die deutsche Marktlandschaft für das Politikszenario 1 hochgerechnet (vgl. Tabelle 23).

**Tabelle 23: Verkaufsfläche der untersuchten Ladenformate in Deutschland 2006**

| Betriebsform | Gesamtverkaufsfläche [1000 m²] | Durchschnittliche Verkaufsfläche je Markt [m²] |
|---|---|---|
| Kleine Lebensmittelgeschäfte | 6.080 | 186 |
| Discounter | 10.050 | 682 |
| Verbrauchermärkte | 6.650 | 789 |
| SB-Warenhäuser | 6.050 | 2.020 |

*Quelle: [EHI 2007]*

Die Gesamtverkaufsfläche der in dieser Studie untersuchten Ladenformate beläuft sich im Jahr 2006 auf 22.750.000 m² verteilt auf 26.325 Lebensmittelgeschäfte [EHI 2007]. Normiert man die Emissionen der R404A-Referenztechnologie auf die Emission von $CO_2$-Äquivalenten je Quadratmeter Verkaufsfläche (vgl. Tabelle 24) und rechnet diese auf die Gesamtverkaufsfläche je Ladenformat hoch, ergeben sich jährliche Gesamtemissionen von 6.9 Millionen t $CO_2$ äqu. für die deutschen Märkte der drei untersuchten Ladenformate des deutschen LEH.

Hierzu kommen weitere Emissionen aus 32.740 kleinen Lebensmittelgeschäften mit einer Verkaufsfläche Gesamtverkaufsfläche von 6.080.000 m² [EHI 2007]. Diese Geschäfte wie etwa „Tante-Emma-Läden", Tankstellen-Shops und Kioske verwenden in der Regel keine zentralen Verbundkälteanlagen, sondern einzelne steckerfertige Kühlregale und -truhen. Aufgrund ihrer Heterogenität wurden sie im Rahmen dieser Studie nicht näher betrachtet.

Um dennoch einen Eindruck der Klimarelevanz dieser nicht unerheblichen Betriebsform zu bekommen, wurden die Emissionen der kleinen Märkte auf Basis von Daten einer Erhebung der Ökorecherche GmbH aus dem Jahre 2005 abgeschätzt [Schwarz2005]. Die indirekten Emissionen des Energieverbrauchs wurden entsprechend der Anzahl und der Leistungskennzahlen der in kleinen Supermärkten eingesetzten Kühlmöbel ermittelt. Die Leistungskennzahlen wurden aus [Kruse2002] entnommen.
In Tabelle 24 sind die flächennormierten Emissionswerte der 4 Ladenformate jeweils für direkte und indirekte Emissionen zusammengefasst.

**Tabelle 24: Jährliche spezifische Kältemittelemissionen pro m² Verkaufsfläche im deutschen LEH**

| Betriebsform | Kältemittelemissionen | Energieemissionen |
|---|---|---|
| | [t $CO_2$ äq./m²] | [t $CO_2$ äq./m²] |
| Kleine Lebensmittelgeschäfte | 0,023 | 0,092 |
| Discounter | 0,036 | 0,153 |
| Verbrauchermarkt | 0,114 | 0,222 |
| SB-Warenhaus | 0,212 | 0,246 |

Abbildung 30 zeigt die jährlichen Gesamtemissionen im Zusammenhang mit der Kältetechnik im deutschen Lebensmitteleinzelhandel in 2006, aufgeschlüsselt nach Betriebsform und direkten sowie indirekten Emissionen. Vereinfachend wird eine vollständige und abgeschlossene Umstellung von H-FCKW auf H-FKW angenommen, wie sie bis zum Jahr 2015 zu erwarten ist[6].

[6] Die EG Verordnung EG 2037/2000 verbietet die Verwendung von teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen ab dem 1. Januar 2015

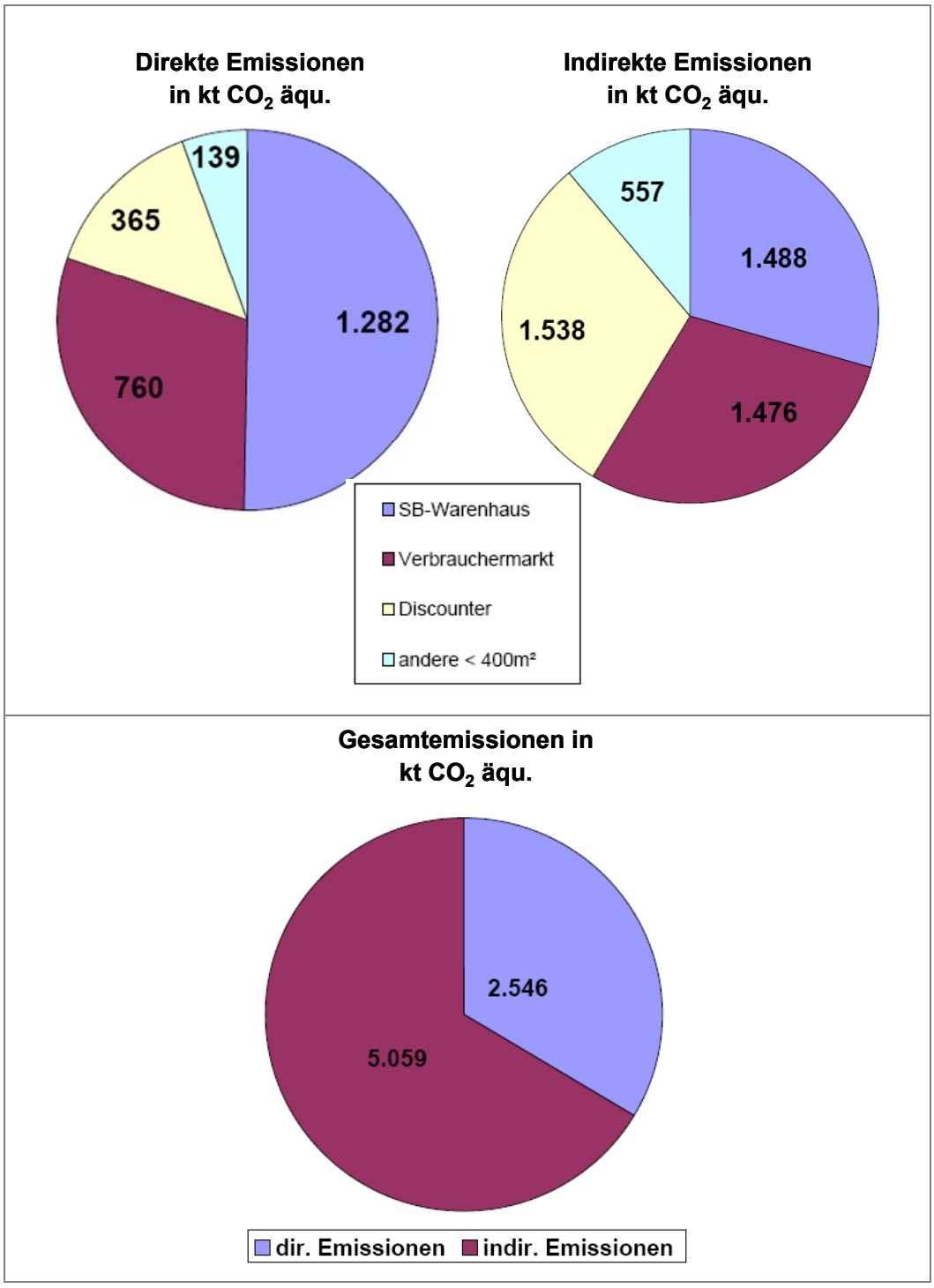



**Abbildung 30: Jährliche Emissionen aus kältetechnischen Einrichtungen des deutschen LEH in 2006**

In der Summe liegen die Emissionen kältetechnischer Einrichtungen im deutschen Lebensmitteleinzelhandel bei 7,6 Mio. t $CO_2$ äqu. pro Jahr. Gut ein Drittel davon sind direkte Emissionen aus der Verwendung HFKW-haltiger Kältemittel.
Alleine die Erzeugung von Kälte im Lebensmitteleinzelhandel ist damit für etwa 1 % der bundesdeutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Emissionen aus Heizungsanlagen und Fernwärmebezug sind in dieser Zahl noch unberücksichtigt. Eine eingehende Beschäftigung, sowohl mit Möglichkeiten der Reduktion von Kältemittelemissionen wie auch mit Optionen zur Senkung des Stromverbrauchs, verspricht somit relevante Beiträge zu den deutschen Klimaschutzbemühungen zu leisten.

## 5.3 Vermeidungskosten

Spezifische Vermeidungskosten werden in € pro Tonne vermiedenem $CO_2$-Äquivalent bezogen auf die R404A-Referenztechnologie angegeben. Berücksichtigt werden hier nur die Mehrkosten gegenüber der Referenztechnologie und nicht die absoluten Kosten, die bei Austausch der Referenztechnologie entstehen würden.

Die Tabellen 25, 27 und 29 stellen zunächst die Vermeidungspotentiale der drei Technologien im jeweiligen Politikszenario dar, während die Tabellen 26, 28 und 30 die entsprechenden Vermeidungskosten wiedergeben. Hierbei wurden die in Tabelle 19 dargestellten Kostensteigerungen je nach politischen Rahmenbedingungen für Anlagen mit HFKW-haltigen Kältemitteln zu Grunde gelegt.

Die Investitionskosten werden entsprechend einer Anlagenlebensdauer von 10 Jahren annualisiert angegeben. Die jährlichen Kosten setzen sich aus Energiekosten und Vollinstandhaltungskosten (vgl. Tabelle 13-18) zusammen.

**Tabelle 25: Emissionsvermeidungspotential der Modelltechnologien (Szenario 1 – Verlustrate 11,65%)**

| Nr. | Modelltechnologie | Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] | Vermiedene Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] |
|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **70,0** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 52,0 | 18,0 |
| **III** | ind. R290 NK | 49,8 | 20,2 |
| **IV** | dir. 744 NK | 45,2 | 24,8 |
| **Verbrauchermarkt** | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | **265,3** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 226,3 | 39,0 |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | 272,5 | - |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 198,1 | 67,2 |
| **III** | ind. R717 | 201,4 | 63,9 |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 152,3 | 112,0 |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 175,3 | 90,0 |
| **V** | dir. R744 | 175,1 | 90,2 |
| **SB-Warenhaus** | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **924,9** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 546,5 | 378,4 |
| **V** | dir. R744 | 497,0 | 427,9 |

**Tabelle 26: Spezifische Vermeidungskosten für verschiedene Vermeidungsmaßnahmen bezogen auf eine R404A-Direktverdampfungsanlage (Szenario 1 – Verlustrate 11,65%)**

| Nr. | Modelltechnologie | Investitions-mehrkosten [€] | Jährliche Mehr-kosten [€] | Vermeidungs-kosten [€/t $CO_2$ äqu.] |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 1.110 | -960 | **8,-** |
| **III** | ind. R290 NK | 1.726 | 1.450 | **157,-** |
| **IV** | dir. 744 NK | 1.726 | 500 | **90,-** |
| **Verbrauchermarkt** | | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | **-** | **45.500** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 5.671 | -3.000 | **68,-** |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | 0 | 1.000 | **-** |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 5.671 | -2.000 | **55,-** |
| **III** | ind. R717 | 12.576 | 7.500 | **314,-** |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 12.822 | -3.500 | **83,-** |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 6.904 | 0 | **77,-** |
| **V** | dir. R744 | 9.124 | 1.300 | **116,-** |
| **SB-Warenhaus** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 27.617 | 14.000 | **110,-** |
| **V** | dir. R744 | 19.727 | 4.000 | **55,-** |

**Tabelle 27: Emissionsvermeidungspotential der Modelltechnologien (Szenario 2 – Verlustrate 6,15%)**

| Nr. | Modelltechnologie | Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] | Vermiedene Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] |
|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **58,3** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 46,6 | 11,7 |
| **III** | ind. R290 NK | 49,8 | 8,6 |
| **IV** | dir. 744 NK | 45,2 | 13,1 |
| **Verbrauchermarkt** | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | **222,7** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 196,3 | 26,4 |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | 226,5 | - |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 181,5 | 41,2 |
| **III** | ind. R717 | 201,4 | 21,3 |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 152,3 | 70,4 |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 175,2 | 47,5 |
| **V** | dir. R744 | 175,1 | 47,6 |
| **SB-Warenhaus** | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **722,8** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 546,5 | 176,3 |
| **V** | dir. R744 | 496,9 | 225,9 |

**Tabelle 28: Spezifische Vermeidungskosten für verschiedene Vermeidungsmaßnahmen bezogen auf eine R404A-Direktverdampfungsanlage (Szenario 2 – Verlustrate 6,15%)**

| Nr. | Modelltechnologie | Investitions-mehrkosten [€] | Jährliche Mehr-kosten [€] | Vermeidungs-kosten [€/t $CO_2$ äqu.] |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 1.110 | -960 | **13,-** |
| **III** | ind. R290 NK | 1.726 | 850 | **302,-** |
| **IV** | dir. 744 NK | 1.726 | -100 | **124,-** |
| **Verbrauchermarkt** | | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 5.671 | -3.000 | **101,-** |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | 0 | 1.300 | **-** |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 5.671 | -1.700 | **96,-** |
| **III** | ind. R717 | 12.576 | 5.550 | **849,-** |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 12.822 | -5.450 | **105,-** |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 6.904 | -1.950 | **104,-** |
| **V** | dir. R744 | 9.124 | -650 | **178,-** |
| **SB-Warenhaus** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 27,617 | 9.200 | **209,-** |
| **V** | dir. R744 | 19.727 | -800 | **84,-** |

**Tabelle 29: Emissionsvermeidungspotential der Modelltechnologien (Szenario 3 – Verlustrate 2,65%)**

| Nr. | Modelltechnologie | Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] | Vermiedene Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] |
|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **50,9** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 43,3 | 7,6 |
| **III** | ind. R290 NK | 49,8 | 1,1 |
| **IV** | dir. 744 NK | 45,2 | 5,6 |
| **Verbrauchermarkt** | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | **195,6** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 177,3 | 18,3 |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | 197,3 | - |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 170,9 | 24,7 |
| **III** | ind. R717 | 201,4 | - |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 152,3 | 43,3 |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 175,2 | 20,5 |
| **V** | dir. R744 | 175,1 | 20,5 |
| **SB-Warenhaus** | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **594,2** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 546,5 | 47,7 |
| **V** | dir. R744 | 496,9 | 97,3 |

**Tabelle 30: Spezifische Vermeidungskosten für verschiedene Vermeidungsmaßnahmen bezogen auf eine R404A-Direktverdampfungsanlage (Szenario 3 – Verlustrate 2,65%)**

| Nr. | Modelltechnologie | Investitions-mehrkosten [€] | Jährliche Mehr-kosten [€] | Vermeidungs-kosten [€/t $CO_2$ äqu.] |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 1.276 | -960 | **42,-** |
| **III** | ind. R290 NK | 432 | -450 | **-17,-** |
| **IV** | dir. 744 NK | 432 | -1.400 | **-172,-** |
| **Verbrauchermarkt** | | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 6.522 | -3.000 | **192,-** |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | -2.281 | 1.500 | **-** |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 3.958 | -1.500 | **99,-** |
| **III** | ind. R717 | 5.733 | 4.250 | **-** |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 5.980 | -6.750 | **-18,-** |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 62 | -3.250 | **-156,-** |
| **V** | dir. R744 | 2.281 | -1.950 | **16,-** |
| **SB-Warenhaus** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **-** | **-** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 12.822 | 6.000 | **395,-** |
| **V** | dir. R744 | 4.932 | -4.000 | **10,-** |

Betrachtet man die Ergebnisse der Vermeidungskostenberechnung fällt zunächst auf, dass die Vermeidungskosten in den einzelnen Szenarien stark variieren. Ursache ist die Referenztechnologie, die nicht als statische Komponente in die Berechnung eingeht, sondern je nach politischen Rahmenbedingungen unterschiedliche Emissions- und Kostendaten aufweist. Somit werden beispielsweise in Szenario 2 die Vermeidungskosten für Anlagen mit natürlichen Kältemitteln teurer, obwohl sich bei gleichbleibenden Investitionskosten die Wartungskosten von Referenztechnologie und

neuer HFKW-freier Technologie annähern. Denn trotz sinkender Mehrkosten kommt es gleichzeitig zu geringeren Emissionsminderungen, da HFKW-Anlagen dichter werden, sodass die Kosten pro Tonne vermiedenem $CO_2$ höher liegen als in Szenario 1.

Ergänzend zu den drei Politikszenarien wurden Vermeidungskosten für ein viertes Szenario, im folgenden Übergangsszenario genannt, errechnet. In diesem vierten Szenario werden Vermeidungskosten für den Fall bestimmt, dass die R404A-Referenzanlage für die ersten vier Jahre ihrer Lebensdauer unter den Rahmenbedingungen von Politikszenario 2 betrieben wird, und weitere sechs Jahre in Politikszenario 3. Aufgrund höherer Dichtigkeitsanforderungen beim Übergang von Szenario 2 in Szenario 3 muss diese Anlage nachgerüstet werden. Die Nachrüstung führt entsprechend Tabelle 19 zu Mehrkosten von weiteren 15 % der Investitionssumme für HFKW-Anlagen.
Tabelle 31 zeigt die mittleren jährlichen Emissionen der jeweiligen Technologie über ihre Lebensdauer und die Vermeidungskosten gegenüber der Referenztechnologie.

**Tabelle 31: Spezifische Vermeidungskosten für verschiedene Vermeidungsmaßnahmen bezogen auf eine R404A Direktverdampfungsanlage (Übergangsszenario)**

| Nr. | Modelltechnologie | Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] | Vermiedene Emissionen [t $CO_2$ äqu./a] | Vermeidungskosten [€/t $CO_2$ äqu.] |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **630** | **-** | **-** |
| **II** | R134a dir. NK | 488 | 142 | **5,-** |
| **III** | ind. R290 NK | 498 | 132 | **32,-** |
| **IV** | dir. 744 NK | 452 | 178 | **-30,-** |
| **Verbrauchermarkt** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **2.064** | **-** | **-** |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | 1.849 | 215 | **106,-** |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | 2.090 | - | |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | 1.751 | 313 | **52,-** |
| **III** | ind. R717 | 2.014 | 51 | **1.854,-** |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | 1.523 | 541 | **-26,-** |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | 1.752 | 313 | **-86,-** |
| **V** | dir. R744 | 1.751 | 314 | **13,-** |
| **SB-Warenhaus** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | **6.456** | **-** | **-** |
| **III** | ind. R717 | 5.465 | 991 | **178,-** |
| **V** | dir. R744 | 4.969 | 1.488 | **9,-** |

Vergleicht man die Vermeidungskosten in den einzelnen Szenarien wird deutlich, dass die in Szenario 1 und 2 verhältnismäßig hohen Vermeidungskosten mit steigenden Dichtigkeitsanforderungen in Szenario 3 und 4, insbesondere für die $CO_2$–Technologie, zunehmend wirtschaftlicher werden.

Als Maßstab für wirtschaftlich vertretbare Vermeidungsmaßnahmen wird häufig der Preis für eine t $CO_2$ im Europäischen Emissionsrechtehandel angesetzt. Dieser liegt derzeit für Emissionsrechte für den Zeitraum 2008 bis 2012 bei rund € 25.

Wie bereits in Kapitel 5.1.6 erwähnt wurde haben auch die Kältemittelverluste einen erheblichen Einfluss auf die Vermeidungskosten. Im Falle höherer Kältemittelverluste als in den drei Politikszenarien angenommen, sinken die Vermeidungskosten deutlich. Dies hängt mit dem dann erheblich größeren Vermeidungspotential alternativer Technologien ohne HFKW zusammen. Liegen z. B. die Emsisionen der Referenztechnologie nicht wie in Politkszenario 1 bei 11,65 % sondern bei 15 % sinken die Vermeidungskosten für R744 Direktverdampfungsanlagen in allen drei Ladenformaten um gut 20 %. Ein Überblick der Vermeidungskostenentwicklung bei höheren Kältemittelverlusten ist in Tabelle 32 dargestellt.

**Tabelle 32: Vermeidungskosten bei höheren jährlichen Kältemittelverlusten**

| Nr. | Modelltechnologie | Vermeidungskosten für unterschiedliche Verlustraten | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **11.65 % p.a** | **15 % p.a** | **20 % p.a** | **25 % p.a.** |
| **Discounter** | | | | | |
| **II** | R134a dir. NK | **8,-** | 7,- | 5,- | -10,- |
| **III** | ind. R290 NK | **157,-** | 116,- | 68,- | 0,- |
| **IV** | dir. 744 NK | **90,-** | 70,- | 38,- | -18,- |
| **Verbrauchermarkt** | | | | | |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | **68,-** | 57,- | 46,- | 35,- |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | **-** | - | - | - |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | **55,-** | 44,- | 37,- | 19,- |
| **III** | ind. R717 | **314,-** | 223,- | 141,- | 60,- |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | **83,-** | 67,- | 42,- | -4,- |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | **77,-** | 60,- | 32,- | -16,- |
| **V** | dir. R744 | **116,-** | 90,- | 55,- | 2,- |
| **SB-Warenhaus** | | | | | |
| **III** | ind. R717 | **110,-** | 83,- | 54,- | 22,- |
| **V** | dir. R744 | **55,-** | 43,- | 26,- | 1,- |

## 5.4 Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die EU-27

Diese Studie betrachtet lediglich die Situation im deutschen Lebensmitteleinzelhandel. Dennoch soll an dieser Stelle zumindest eine qualitative Einschätzung der Situation für andere europäische Mitgliedstaaten gegeben werden.
Der Bedarf nach gekühlter Ware im Lebensmittelhandel ist in den vergangenen Jahren europaweit gestiegen. Kältemittel auf Basis fluorierter Treibhausgase sind nach dem Verbot von Ozonschicht zerstörenden FCKWs die Hauptkältemittel in kältetechnische Einrichtungen, da sie ohne große technische Veränderungen in herkömmlichen Kälteanlagen die FCKWs ersetzen können.
Aufgrund ihres hohen GWPs (vgl. Tabelle 4) fallen die fluorierten Treibhausgase allerdings unter die im Kyoto-Protokoll aufgeführten Gase. Dadurch und durch Ihren hohen Energieaufwand sind gewerbliche Kälteanlagen in den vergangenen Jahren zunehmend in den Fokus europäischer Regelungen und Gesetzgebungen gelangt. Im Wesentlichen ist die Gewerbekälte durch die EU-F-Gas-Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 842/2006) betroffen. Aber auch im Bereich der Energieeffizienz werden kältetechnische Einrichtungen in Zukunft strengerer Gesetzgebung unterliegen. Im Rahmen des „Energy Efficiency Action Plan“ der Europäischen Kommission wurde im Dezember 2007 eine Studie mit Öko-Design-Kriterien für Gewerbekälteanlagen veröffentlicht, die vor allem auf Energieeffizienz wert legt [Bio2007].

Neben den Gebäude- und Automobilklimaanlagen sind kältetechnische Einrichtungen des Gewerbes der größte Bereich der Kälte- und Klimatechnik, der durch die EU-F-Gas-Verordnung betroffen ist. Nicht unter die Verordnung fallen natürliche Kältemittel, die im Rahmen der politischen Diskussion um den Klimawandel zunehmend wieder Beachtung finden. Im Bereich der Gewerbekälte ist der Fokus bei Anlagenbauern weitestgehend auf $CO_2$ als Kältemittel gerichtet. Führend in der Anwendung von $CO_2$ als Kältemittel sind derzeit neben den skandinavischen Ländern vor allem die Niederlande, Italien und Deutschland. In diesen Ländern sind bereits zahlreiche Kälteanlagen im LEH installiert. Häufig wird aufgrund des niedrigen kritischen Punktes von $CO_2$ (31°C) der Einsatz in wärmeren Klimaten im Süden Europas als kritisch gesehen. Eine Untersuchung der Firma Linde zu Folge (vgl. Abbildung 28) hat $CO_2$ in

Nord- und Mitteleuropa einen durchschnittlich etwa 5-10 % niedrigeren Energieverbrauch als R404A. Abbildung 31 verdeutlicht, dass Anlagen mit Hilfe von Kaltwasser-Spritzanlagen zur besseren Kühlung der Verdampfer, auch bei heißen Umgebungstemperaturen oberhalb des kritischen Punkts von $CO_2$ energetisch gleichwertig zu einer vergleichbaren R404A-Anlage arbeiten.

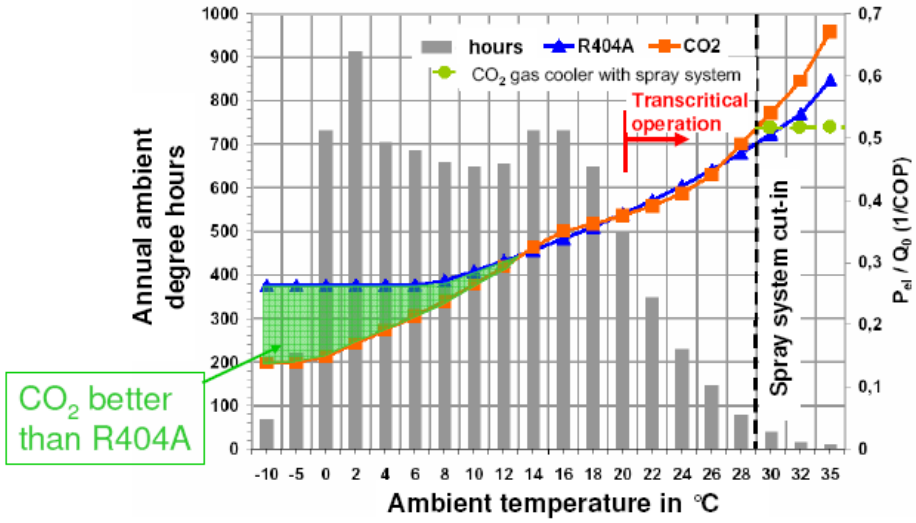



**Abbildung 31: Vergleich des Energieverbrauchs von direkt verdampfenden R404A / R774 NK Anlagen** *Quelle: [Haaf 2005]*

Der Einsatz von natürlichen Kältemitteln dürfte auch in weiten Teilen Osteuropas ohne größere technische Probleme möglich sein. In Osteuropa findet derzeit eine große Veränderung der Marktstruktur, weg von kleinen Stadtteil- oder Tante-Emma-Läden, hin zu Discountern und großen Super- bzw. Hypermärkten statt. Zum Großteil drängen die großen europäischen Einzelhandelsunternehmen auf den osteuropäischen Markt, wodurch eine Vielzahl neuer Märkte mit neuester Anlagentechnik ausgerüstet wird. Dieser Markt bietet daher auch eine besondere Chance für die Verwendung neuer Technologien mit natürlichen Kältemitteln.

# 6. Zusammenfassung

Es wurde zunächst detailliert untersucht, welche Kühltechnologien für die drei untersuchten Einzelhandelsformate und Politikszenarien unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der relevanten Inputparameter stabil Vorteile in ihrer Klimabilanz gegenüber der Referenz-Technologie auf Basis von R404A aufweisen. Es zeigte sich dabei, dass die $CO_2$-Technologie in ihrer Klimabilanz der R404A-Referenztechnologie im Rahmen aller berücksichtigten Unsicherheiten für Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser signifikant[7] überlegen ist. Bei Discountern besteht die Signifikanz bei hoher Dichtigkeit (jährlicher Kältemittelverlust von 2,65 %) nicht mehr.

In einem zweiten Schritt wurden Vermeidungskosten für die relevanten Emissionen berechnet, um die Kostenwirksamkeit eines Technologiewechsels für die einzelnen Politikszenarien bestimmen zu können. Tabelle 33 fasst die quantitativen Ergebnisse in übersichtlicher Form zusammen. Hier wird deutlich, dass der Einsatz natürlicher Kältemittel in der momentanen Situation oft nur mit vergleichsweise hohen Vermeidungskosten realisiert werden kann, die spezifischen Vermeidungskosten sich aber mit zunehmend strengeren Dichtigkeitsvorgaben für herkömmliche Anlagen mit HFKW in naher Zukunft deutlich reduzieren.

Wie gezeigt spielt jedoch auch die tatsächliche Höhe der Kältemittelverluste eine wichtige Rolle für die Vermeidungskosten. Im Falle höherer Kältemittelverluste als hier angenommen bieten HFKW-freie Technologien noch größere Emissionseinsparpotetntiale. Dadurch würden auch die Vermeidungskosten deutlich sinken. In Zukunft sollte daher besonderer Wert auf die genaue Auswertung der durch die EU Verordnung (EG) Nr. 842/2006 vorgeschriebeben Logbücher gelegt werden, da man so Aufschluss über tatsächliche Kältemittelverluste im Einzelhandel erlangen kann.

[7] Hier: das Signifikanzniveau entspricht einem Wert, der sich vom Erwartungswert um mehr als die zweifache Standardabweichung unterscheidet

**Tabelle 33: Kombinierte Übersicht zu TEWI-Ergebnissen und Vermeidungskosten für verschiedene Dichtigkeitsszenarien und Modelltechnologien**

| | | **Dichtigkeits-szenario 1** (11,65 %) | **Dichtigkeits-szenario 2** (6,15 %) | **Dichtigkeits-szenario 3** (2,65 %) |
|---|---|---|---|---|
| **Discounter** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | B- | B- | B- |
| **II** | R134a dir. NK | A+ | A+ | B+ |
| **III** | ind. R290 NK | A- | A- | B++ |
| **IV** | dir. 744 NK | A- | A- | B++ |
| **Verbrauchermarkt** | | | | |
| **Ia** | **Referenzanlage** | B- | B- | B- |
| **Ib** | R134a NK+R404A TK | A- | A- | A- |
| **IIa** | R404A NK+R744 TK | B- | B- | B- |
| **IIb** | R134a NK+R744 TK | A- | A- | A- |
| **III** | ind. R717 | A- | A- | B- |
| **IVa** | R717/R744 NK+TK | A- | A- | A++ |
| **IVb** | R290/R744 NK+TK | A- | A- | A++ |
| **V** | dir. R744 | A- | A- | A+ |
| **SB-Warenhaus** | | | | |
| **I** | **Referenzanlage** | B- | B- | B- |
| **III** | ind. R717 | A- | A- | B- |
| **V** | dir. R744 | A- | A- | A++ |

**Kodierung der Bewertungen**

**Klimabilanz:** **A**: Signifikant der Referenzanlage überlegen

**B**: Kein signifikanter Unterschied zur Referenzanlage

**C**: Signifikant der Referenzanlage unterlegen

**Kostenwirksamkeit:** **++** : Negative Vermeidungskosten

**+** : Vermeidungskosten <=50 Euro pro Tonne $CO_2$ Äquivalent

**-** : Vermeidungskosten >50 Euro pro Tonne bzw. Referenz.

Entsprechend haben die Ergebnisse der vorliegenden Studie auch Gewicht für andere EU Mitgliedsstaaten. Die hier vorgestellten Ergebnisse von TEWI-Analysen unterscheiden sich im Rahmen der gezeigten Unsicherheiten in Zentral- und Nordeuropa nicht gravierend. Lediglich in wärmeren Klimaten Südeuropas sind gewisse Abweichungen zu beachten (vgl. Kapitel 5.4).

Bei der Investition in neue Kälteanlagen wird für den deutschen LEH neben der Kostenfrage in Zukunft auch die Frage nach der Wahl des Kältemittels vermehrt von Bedeutung sein. Die aktuelle öffentliche Diskussion um den Klimawandel zeigt, dass nachhaltiges und umweltfreundliches Wirtschaften immer wichtiger wird und auch zunehmend als Verkaufsargument an Bedeutung gewinnt. Mit dem Einsatz von natürlichen Kältemitteln in neuen Anlagen entscheiden sich schon heute einzelne Einzelhandelsunternehmen für eine umweltfreundliche Kälteerzeugung, weil dadurch doppelte Investitionen, zunächst zur Erfüllung höherer Dichtigkeitsanforderungen und später zur Installation neuer Technologie mit natürlichen Kältemitteln, vermieden werden können.

Eine weitere Verschärfung der Auflagen für den Umgang mit fluorierten Treibhausgasen ist deutschland- wie auch europaweit in den nächsten Jahren zu erwarten. Dies spiegelt sich u.a. in dem von der deutschen Bundesregierung in Meseberg beschlossenen Klima- und Energieprogramm wie auch den Überprüfungsklauseln des Artikels 10 der EU F-Gas Verordnung wider.

# 7. Literaturverzeichnis


[Anderson2005] Anderson, J.: Is STEK as good as reported? Institute for European Environmental Policy (IEEP), Brussels 2005

[Bio2007] Bio Intelligence Service S.A.S.: Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs, Lot 12, Commercial refrigerators and freezers, Dezember 2007

[Bivens2004] Bivens, D. and Gage, C.: Commercial Refrigeration Systems Emissions. Proceedings of the 15th Annual Earth Technologies Forum, April 13-15, 2004, Washington, D.C., USA.

[Bremer2007] Bremer Energie-Konsens: Lebensmittelhandel aktuell – Energiekosten senken – Umwelt schonen. Ein praktischer Leitfaden für die effiziente Nutzung von Kühlmöbeln. http://www.energiekonsens.de (Stand: 05.10.2007)

[Diehlmann2006] Diehlmann, A., Meurer, C., Jakobs R.: Ökoeffizienzbetrachtungen von Supermarkt-Kälteanlagen in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 2/2006

[EHI2007] EHI Retail Institute e.V.: Handel aktuell – Struktur, Kennzahlen und Profile des internationalen Handels – Schwerpunkt Deutschland, Österreich, Schweiz, Ausgabe 2007/2008, Köln September 2007

[FKT1999] Forschungsrat Kältetechnik e. V.: Bericht zum Forschungsvorhaben FKT21/96: Dichtheit von Kälteanlagen, Institut für Luft- und Kältetechnik Gemeinnützige Gesellschaft mbH Dresden, Frankfurt Dezember 1999

[(EG) Nr. 842/2006] Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase.

[Görner2007] Görner, U.: Beitrag von Udo Görner, EPTA beim ersten Treffen des Expertenkreises am 28. Februar in Berlin

[Haaf2005] Haaf, S., Heinbokel, B.: Erste $CO_2$-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung in einem Schweizer Hypermarkt. in DIE KÄLTE & Klimatechnik 2/2005

[Harnisch2004] Harnisch, J., Schwarz, W., et al.: Risks and Benefits of fluorinated Greenhouse Gases in Processes and Products under Special Consideration of the Properties Intrinsic to Substance, Umweltbundesamt, Berlin 2004

[IPCC1996] Climate Change 1995 – The Science of Climate Change, IPCC Second Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge 1996

[IPCC/TEAP2005] IPCC/TEAP Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. Prepared by Working Group I and III of the Intergovernmental Panel on Climate Change and the Technology and Economic Assessment Panel. Cambridge, New York 2005

[Kruse2002] Kruse, H., Blömer, M.: Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte, in Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr.22, Stuttgart 2002

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers

[Machat2007] Machat, M.; Werner, K.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix. Umweltbundesamt, Dessau 2007. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3195.pdf (Stand 28.08.2007)

[Pedersen2003] Pedersen, P.H.: Evaluation of the Possibilities of Substituting Potent Greenhouse Gases (HFCs, PFCs and SF6). Environmental Project No. 771, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark.

[Schwarz2005] Schwarz, W., Wartmann, S.: Emissionen und Emissionsprognose von H-FKW, FKW und SF6 in Deutschland. Frankfurt/Main 2005

[UNEP2006] Kuijper, L. et al: 2006 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC) – 2006 Assessment. UNEP März 2007

[Yellen2002] Yellen, D. et al.: Assessment of the Costs & Impact on Emissions of Potential Regulatory Frameworks for Reducing Emissions of HFCs, PFCs & SF6. Enviros Consulting Ltd., 2002

# „VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER KLIMARELEVANZ VON KÄLTEANLAGEN UND -GERÄTEN FÜR DEN SUPERMARKT“ (FKZ 206 44 300)

## Verbesserungspotentiale und Lösungsansätze

Dr. André Leisewitz

Öko-Recherche GmbH, Frankfurt/M.

Dr. Jochen Harnisch, Christian Ters

Ecofys Germany GmbH, Nürnberg

# Inhalt

1. Stand der Technik - Übersicht 237
1.1 Entwicklungstrends bei Kältemitteln und -Anlagen – kurzer Rückblick 238
1.2 $CO_2$-Technologie 241
1.3 Andere natürliche Kältemittel 242
1.4 Synthetische „Low-GWP“-Kältemittel 243
2. Hemmnisse für die Ausweitung des Einsatzes von R744-Verbundanlagen für Supermärkte (Stand: Mitte 2007) 245
2.1 Technische Aspekte 245
2.2 Kostenaspekte/wirtschaftliche Hemmnisse 254
3. Weitergehende Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz/Klimabilanz im Supermarkt: Sonderbetrachtung Energieeinsparpotential Kühlmöbelabdeckung 261
3.1 Kühlmöbelbestand und -abdeckung in der Bundesrepublik Mitte 2007 262
3.2 Erfahrungswerte zum Energieeinsparpotential bei Kühlmöbeln durch Abdeckung 266
4. Mögliche und erforderliche Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes von natürlichen Kältemitteln im LEH 270
4.1 Fördervorschlag für Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln entspr. Eckpunkt 23 271
4.2 Vorschlag für einen Wettbewerb „Auszeichnung energieeffizienter Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln für den Supermarktbereich“ 276
5. Literatur zu 1. Stand der Technik und 2. Hemmnisse 281

# 1. Stand der Technik - Übersicht

Die Marktübericht aus Teil 1 enthält eine Übersicht zu den heute für die Kälteerzeugung im Supermarkt eingesetzten bzw. in Entwicklung befindlichen Verfahren mit synthetischen und natürlichen Kältemitteln. Aus der Vielzahl der angeführten Anlagenkonfigurationen bzw. „Modelltechnologien“ wurden für die Bilanzierung und Bewertung eine Reihe von repräsentativen Auslegungsvarianten ausgewählt und hinsichtlich ihrer Klimarelevanz verglichen.

Bei diesen Modelltechnologien sowie den ausgewählten Auslegungsvarianten kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die Verfahren anlagen- und komponententechnisch ausgereift, am Markt eingeführt und in einzelnen europäischen Ländern in unterschiedlichem Ausmaß praktisch erprobt sind. Eine Ausnahme machen die mit $CO_2$ betriebenen Anlagen und zugehörigen Komponenten, die sich z. T. noch in Entwicklung bzw. Erprobung und Einführung befinden. Dies gilt insbesondere für $CO_2$-Anlagen mit transkritischem Betrieb.

Der folgende Abschnitt konzentriert sich daher auf die Überprüfung des Entwicklungsstandes dieser Anlagen und ihrer wichtigsten Komponenten sowie möglicherweise vorhandene Hemmnisse technischer und nichttechnischer Art für deren breitere Einführung in der gewerblichen Kühlung. Demgegenüber besteht bei den anderen Verfahren kein *grundsätzlicher* Entwicklungs- und Erprobungsbedarf.

Unabhängig davon sind bei allen Verfahren Weiterentwicklungen und Optimierungen der Anlagenkonfiguration und -steuerung mit dem Ziel einer größeren Energieeffizienz möglich und unter Gesichtspunkten des Klimaschutzes notwendig. Hierzu enthält die Marktübersicht eine Liste von denkbaren Maßnahmen, die – weitgehend kältemittelunabhängig – zur Steigerung der Energieeffizienz und damit auch der Klimaverträglichkeit ergriffen werden können.

Die vorliegende Studie konzentriert sich auftragsgemäß auf die Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten. Sie hat nicht den Gesamtkomplex von Kälteerzeugung, Beheizung und Klimatisierung von Supermärkten zum Gegenstand. Jedoch soll darauf hingewiesen werden, dass gerade die Zusammenfassung dieser energetisch aufwendigen Teilbereiche in einem Kälte-Wärme-Verbundsystem bedeutende Energie- und damit $CO_2$-Einsparpotentiale aufweist, die über eine anlagen- und gerätebezogene Betrachtung getrennter Teilsysteme hinausweisen.[1]

## 1.1 Entwicklungstrends bei Kältemitteln und -Anlagen – kurzer Rückblick

Das Montreal-Protokoll von 1987 und das Kyoto-Protokoll von 1997 haben die entscheidenden Schritte zur Kältemittelsubstitution und Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Supermarktbereich ausgelöst. In einem mehr als fünfzehnjährigen Entwicklungsprozess wurden unterschiedliche Kältemittel und Anlagenkonfigurationen erprobt. Die Entwicklungsarbeiten in der Gewerbekälte betrafen (zusammenfassend Kruse 2006a und b)

- Zwischenlösungen mit HFCKW und HFKW, also synthetischen Kältemitteln, in direkten und in indirekten ein- und (seltener) zweistufigen Anlagen und Kaskadenanlagen für beide Temperaturbereiche,

- die Erprobung brennbarer und nicht-brennbarer natürlicher Kältemittel (Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, $CO_2$) bis zu $CO_2$-Systemen mit Direktexpansion im TK- und NK-Bereich.

In der Bundesrepublik wurden diese Arbeiten z. T. durch das BMFT finanziert (vgl. DKV-Verbundvorhaben zur Minderung von FCKW-Emissionen 1991-1993). Weitere BMFT-geförderte Untersuchungen betrafen die direkte und indirekte

[1] Ein solches Konzept wird z.B. beim Kälte-Wärme-Verbund mit Geothermie-Nutzung verfolgt. Ein Beispiel stellt der Edeka Aktiv-Markt Schömberg dar. Sh. Der Facility-Manager 6/2006, S. 24-26; TGA-Fachplaner 5/2006, S. 33-36; DIE KÄLTE & Klimatechnik 6/2007, S. 34/35.

Treibhauswirksamkeit von HFKW-Kältemitteln in Direktexpansionssystemen (R404A und R407C) sowie Indirektsysteme mit Ammoniak (Haaf 1998).

Das direkte und indirekte Treibhauspotential der Kältemittel wurde dabei schon lange vor dem Kyoto-Protokoll im Rahmen des Montreal-Protokolls (seit der Londoner Folgekonferenz 1990 und der Vorstellung des TEWI-Konzepts bei der Kopenhagener Folgekonferenz 1992) thematisiert. Die TEWI-Berechnungen für verschiedene Gewerbekältesysteme führten bald zu der Einsicht, dass konventionelle Supermarkt-Kältesysteme mit direkter Expansion, mit langen Rohrleitungssystemen und mit großen HFKW-Füllmengen, wegen ihres hohen direkten TEWI-Beitrags „nicht die Lösung für die Zukunft sein können, wenn die Leckagen nicht drastisch verringert werden." (Kruse 2006b, mit Bezug auf DOE/AFEAS 1997).[2]

Zu den Entwicklungserfahrungen gehörte auch die Einsicht, dass die Verminderung von GWP-relevanten Kältemittelemissionen durch kleinere, dezentrale Kältesysteme oder durch indirekte Kühlsysteme mit traditionellen Kälteträgern mit höherem Energieaufwand erkauft wird. Die in Indirektanlagen für Supermärkte erprobten natürlichen Kältemittel Ammoniak und Kohlenwasserstoffe (vgl. Haaf/Heinbokel 2002; dies. 2003) kamen und kommen aus Sicherheitsgründen (Toxizität bzw. Brennbarkeit) für Direktsysteme i.d.R. nicht in Frage. Damit rückte bereits in den 90er Jahren $CO_2$ sowohl als Sekundärfluid (energetisch günstiger Kälteträger mit wesentlich besserem Wärmeübertragungsverhalten und geringerer Viskosität im Tieftemperaturbereich im Vergleich zu konventionellen Kälteträgern) wie als Kältemittel für Direktexpansion (Kaskadensysteme) in den Mittelpunkt der weiteren Suche nach neuen Anlagenkonzeptionen (vgl. Heinbokel 2001). Dabei wurden in Europa eine

[2] Kruse fasste in einem Übersichtsbeitrag aus dem Jahr 2000 die Entwicklungsalternativen folgendermaßen zusammen: "In conclusion, supermarket refrigeration systems with direct expansion and a large refrigerant charge and long refrigerant lines, which have a potential to cause reasonable amounts of leakage, can not be a future solution, although leakages can be decreased to a certain amount. Therefore, the choice for future refrigeration systems in supermarkets is either indirect systems with secondary refrigerants or direct decentralized water-cooled HFC systems. Another possibility would be the application of refrigerants with very low GWP in direct systems. Ammonia and hydrocarbons show dangerous local behaviour because of their flamabillity or toxicity and are not suited for direct expansion systems inside public areas of supermarkets. Therefore, for these refrigerants, indirect systems have to be used. For direct systems, only $CO_2$ can be used, which presents other problems that are discussed later." Kruse 2000, p. 18.

Reihe von unterschiedlich ausgelegten $CO_2$-Pilotanlagen für den Supermarkt entwickelt.

Erste Anlagen mit $CO_2$ als Kälteträger im TK-Bereich datieren aus den Jahren 1993-1996, vornehmlich in Skandinavien. In Dänemark wurden Anlagen mit $CO_2$ als Kältemittel im TK-Bereich (Direktverdampfung, subkritisch) sowie Propan im NK-Bereich erstmals im Jahr 2000 installiert (vgl. Kauffeld/Christensen 2001). Ins gleiche Jahr fällt die erste Installation eines Anlagentyps mit $CO_2$ im TK-Bereich (subkritisch) und HFKW im NK-Bereich (in Luxemburg, vgl. Heinbokel 2001). In den Folgejahren wurden reine $CO_2$-Anlagen konzipiert ($CO_2$ transkritisch im TK- und NK-Bereich, vgl. Gebhardt et al. 2003) bzw. erstmals praktisch eingeführt mit subkritischem $CO_2$-Betrieb in der Tiefkühlung und transkritischem Betrieb im NK-Bereich (Erstinstallation 2004 in der Schweiz; vgl. Haaf et al. 2005). Eine der Voraussetzungen hierfür war die Bereitstellung von entsprechenden Anlagen-Komponenten für höhere Drucklagen, insbesondere von Verdichtern für den transkritischen $CO_2$-Betrieb, die etwa ab 1998 verfügbar wurden.

Der aktuelle Entwicklungsstand der $CO_2$-Technologien wird in einem Fazit von der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 2007 (Hannover) folgendermaßen festgehalten: „$CO_2$ als Kältemittel hat in den Tieftemperaturstufen von Kaskadenanlagen seine Tauglichkeit nachgewiesen und wird umfassend und vorteilhaft verwendet. Als Universalkältemittel, also auch in der transkritischen Verwendung für die Normalkühlung, ist es auf dem Vormarsch. Es ist begründet zu erwarten, dass die doch schon zahlreichen Prototypausrüstungen von Supermärkten mit Anlagen, in denen ausschließlich $CO_2$ eingesetzt wird, für beide Temperaturstufen bald zur Standardlösung werden.“ (KK 1/2008)

## 1.2 $CO_2$-Technologie

Bei der *Neuentwicklung* von Kälteverbundanlagen für den Supermarktbereich mit natürlichen, klimaverträglichen Kältemitteln setzen der Kälteanlagenbau und der ihm zuliefernde Komponentenbau in Deutschland heute durchgängig auf $CO_2$ (R744). Der Anlagenbau betrachtet dies als entscheidende Alternative für den Supermarktbereich (vgl. Brouwers 2007; Epta 2007; Kröger 2007; Linde 2007a; Tillner-Roth 2008). Probleme ergeben sich dabei aus den besonderen Eigenschaften von $CO_2$ als Kältemittel.

Bei $CO_2$ handelt es sich um ein ausgesprochenes Hochdruckkältemittel. Die Dampfdruckkurve für $CO_2$ liegt um etwa eine Zehnerpotenz über denen der anderen gängigen Kältemittel. R744 hat daher im für Supermarktkälteanlagen relevanten Temperaturbereich einen deutlich höheren Druck als alle anderen Kältemittel. Gegenüber Anlagen, die mit HFKW betrieben werden, muss bei $CO_2$-Anlagen die Auslegung der Komponenten sowohl im TK-Bereich wie im NK-Bereich diesen hohen Drücken Rechnung tragen. Während im subkritischen Bereich Drücke bis zu 40 bar zu berücksichtigen sind, treten beim transkritischen Betrieb auf der Hochdruckseite wesentlich höhere Drucklagen bis 120 bar auf.

Wegen seiner niedrigen kritischen Temperatur von 31°C ist $CO_2$ im klassischen Kaltdampfprozess nur bei Temperaturen der Wärmesenke am Verflüssiger bis etwa 20-25°C einsetzbar. Bei Supermarktkälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern wird diese Temperatur im Sommer jedoch häufig überschritten; eine $CO_2$-Verflüssigung ist dann nicht mehr möglich. Die $CO_2$-Kälteanlagen für den NK-Bereich arbeiten daher bei hoher Umgebungstemperatur im transkritischen Betrieb. Das Gas wird nach der Verdichtung nicht mehr verflüssigt, sondern in einem Gaskühler gekühlt.

R744-Anlagen als untere Stufe einer Kaskadenkälteanlage für den Bereich der Supermarkt-*Tiefkühlung* (ca. -18°C) haben seit geraumer Zeit die Pilotphase

erfolgreich durchlaufen und können inzwischen als Standard-Anlagen betrachtet werden. Entsprechende Anlagen sind in Europa in größerer Zahl und schon seit mehreren Jahren in Supermärkten installiert. Die ersten Tiefkühlkälteanlagen für Supermärkte wurden im Jahr 2000 realisiert (vgl. Haaf/Heinbokel 2002, 2003). Für den in diesem Bereich unterkritischen $CO_2$-Betrieb mit Drucklagen bis zu 40 bar sind heute die notwendigen Anlagen- und Regelungskomponenten in aus Sicht der Anlagenbauer gewünschter Spezifizierung und zu akzeptablen Preisen verfügbar.

Dagegen befinden sich Verbundanlagen mit $CO_2$ als Kältemittel auch für den Bereich der Normalkühlung (ca. 0-8°C) mit überkritischer Betriebsweise und hohen Drücken noch in der Erprobungsphase. Wichtige Hochdruckkomponenten solcher Anlagen sind noch nicht serienmäßig verfügbar, ihre Kosten daher vergleichsweise hoch. Entsprechende Pilot-Anlagen wurden erstmals vor einigen Jahren installiert (vgl. Haaf et al. 2005), ihre Zahl ist noch gering – dies gilt im Vergleich zu skandinavischen Ländern sowie der Schweiz und Luxemburg besonders für die Bundesrepublik Deutschland – und mit ihnen müssen noch Erfahrungen gesammelt werden. $CO_2$-Komplettlösungen für den Supermarktbereich in Zentraleuropa mit R744 für TK und NK als Standard-Anlagen werden für 2008/2010 angekündigt (Brouwers 2007; Tillner-Roth 2008).

## 1.3 Andere natürliche Kältemittel

Neben $CO_2$ finden als natürliche Kältemittel $NH_3$ (Ammoniak, R717) sowie Kohlenwasserstoffe (Propan, R290; Propen, R1270; Iso-Butan, R600a) in unterschiedlichen Einsatzbereichen Verwendung (vgl. Bitzer 2006a; Haaf/Heinbokel 2002, 2003, Technologiedatenblätter C8-C10, C11). Die Anlagentechnik ist hier im Gegensatz zu $CO_2$ voll ausgereift. Die im LEH-Bereich in Deutschland in der Vergangenheit gebauten $NH_3$-, Propan- und Propen-Anlagen sind wegen einiger Nachteile von Ammoniak- und KW-Kältemitteln – höhere Investitionskosten und Energieverbräuche gegenüber Direktverdampfungsanlagen – in diesem Bereich meist nicht mehr in Betrieb.

Die bekannten stofflichen Nachteile von Ammoniak sind Brennbarkeit, Toxizität und der Umstand, dass es wegen seines stechenden Geruchs schon bei kleinen, nicht toxischen Konzentrationen „nicht paniksicher“ ist. Daher kommt Ammoniak nur für Indirektanlagen mit Kälteträgern in Frage, sofern es um Einrichtungen mit Publikumsverkehr wie Supermärkte geht. Dabei ist ein energetischer und anlagentechnischer Mehraufwand für Kälteträgeranlagen, Pumpen und die aufwendigere Motortechnik mit Trennung von Kompressor und Motor in Kauf zu nehmen (vgl. Haaf/Heinbokel 2002, 2003; Renz 2007). Kohlenwasserstoffe wie Propan, Propen oder Ethan besitzen hervorragende kältetechnische Eigenschaften, haben jedoch gleichfalls den Nachteil der Brennbarkeit und dadurch bedingte strengere und kostenträchtige Sicherheitsvorschriften (z. B. Auswirkungen auf Kompressorkonstruktion; Renz 2003, 2007). Dies erschwert ihren Einsatz in kältetechnischen Anlagen mit Publikumsverkehr und führt zur Begrenzung auf Geräte mit kleinen Füllmengen (150 g nach IEC 60335-2-89 für gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte) bzw. Indirektanlagen.

## 1.4 Synthetische „Low-GWP“-Kältemittel

Einige Unternehmen der chemischen Industrie haben wegen des ab 2011 geltenden Verwendungsverbots für R134a in Kfz-Klimaanlagen in neuen Fahrzeugtypen die Entwicklung neuer synthetischer Kältemittel mit einem GWP <150 für Autoklimaanlagen angekündigt. Zusammensetzung, technische Eigenschaften, Toxikologie und Umweltauswirkungen dieser fluorierten „Low-GWP“-Kältemittel („Blend H“ von Honeywell und „DP-1“ von DuPont) waren Mitte 2007 nicht bekannt (vgl. Reichelt 2007). Das im November 2007 von DuPont und Honeywell gemeinsam vorgestellte Kältemittel HFO-1234yf hat einen niedrigen GWP Wert von 4; detailliertere Stoffdaten und Prüfergebnisse sollen 2008 veröffentlicht werden (Honeywell/Dupont 2007). Es ist denkbar, dass hier eine Kältemittelfamilie entwickelt werden soll, die u.U. auch als Alternative für den Supermarktbereich in Frage kommen könnte. Dies stand 2007 jedoch noch nicht zur Diskussion, da zu diesem Zeitpunkt der Handlungsbedarf aus der

Interessenlage der Kältemittelindustrie heraus im Autoklimaanlagen-Bereich am dringendsten war. Anlagen- und Komponentenbau zeigten sich hierbei allerdings eher skeptisch.

$CO_2$-Kälteanlagen für Supermärkte: Anlagenbestand Ende 2007 in Europa und Deutschland

Der Bestand an in Europa installierten $CO_2$-Verbundanlagen für den TK-Bereich in Supermärkten belief sich Ende 2007 auf mehrere hundert (vgl. Technologiedatenblätter C5-C7); im NK-Bereich der Supermärkte wurde meist R404A eingesetzt. Standorte befanden sich in Norwegen, Schweden, Dänemark, Deutschland, Luxemburg, Schweiz und Italien. Zum gleichen Zeitpunkt gab es nach Auskunft der Anlagenbauer in Europa annähernd 60 $CO_2$-Verbundanlagen für den TK *und* NK-Bereich (vgl. Technologiedatenblatt C13), die in Norwegen (4), Schweden (20), Dänemark (11), England (1), Deutschland (6), Belgien (1), Luxemburg (3), der Schweiz (6) sowie in Italien (5) zumeist in großflächigen Supermärkten installiert waren.

# 2. Hemmnisse für die Ausweitung des Einsatzes von R744-Verbundanlagen für Supermärkte (Stand: Mitte 2007)

Da sich die $CO_2$-Anlagen für den *transkritischen* Betrieb im NK-Bereich derzeit noch im Entwicklungs- und Pilotanlagenstadium befinden, sollen der Stand der Technik sowie mögliche technische, wirtschaftliche und sonstige anwenderseitig geltend gemachte Hemmnisse für eine breite Anwendung dieser Technologie näher betrachtet werden.

## 2.1 Technische Aspekte

Der Ausgangspunkt der Betrachtung kann folgendermaßen zusammengefasst werden (vgl. Bitzer 2006a und 2007; Bock 2007; Danfoss 2007a und b; Epta 2007; Linde 2007a):

1. Die $CO_2$-Technologie im Bereich der Tiefkühlung (TK) mit subkritischen Drucklagen bis 40 bar ist heute Stand der Technik. Die erforderlichen Komponenten sind aus Sicht der Anlagenbauer in gewünschter Spezifizierung und zu akzeptablen Preisen verfügbar.

2. Im Gegensatz dazu bestehen eine Reihe technischer Hemmnisse, wenn die $CO_2$-Technologie in der Normalkühlung (NK) über den bisherigen Bestand an Pilotanlagen hinaus ausgeweitet werden soll. Für den NK-Bereich (transkritischer Betrieb im Sommer) müssen die Komponenten zum Teil auf einen Druck von max. 120-130 bar ausgelegt werden.

3. Bei den NK-Verbundanlagen liegt der maximale Betriebsdruck im *Niederdruckbereich* bei 40 bar. Dies betrifft die Installationen im

Marktbereich der Supermärkte. Die entsprechenden Anlagenkomponenten sind grundsätzlich verfügbar, wobei 2007 serienmäßig hergestellte thermostatische Expansionsventile noch fehlten; Serienherstellung würde zur Kostenreduktion der Anlagen beitragen.

4. Eine Reihe von Problemen stellen sich dagegen im *Hochdruckbereich* (max. Betriebsdruck 115 – 120 bar). Zu diesem Bereich gehören: Druckseite der Verdichter, der Verflüssiger bzw. Gaskühler sowie ein etwaiges Wärmerückgewinnungssystem, Vor- und Rücklaufrohrleitungen zum Gaskühler, Absperr- und Servicekomponenten, Hochdruckventil. Die Hochdruckbauteile befinden sich in den außerhalb des eigentlichen Supermarkts (Marktbereich) gelegenen Anlagenkomponenten. Entsprechende Bauteile sind für industrielle Anwendungen (Industriehydraulikanlagen) Standard, nicht jedoch für die Anwendung bei Kälteanlagen für den Supermarktbereich. Eine Reihe der erforderlichen Komponenten waren 2007 weder in den notwendigen Spezifizierungen (Breite der Palette) noch zu vertretbaren Kosten verfügbar. Für die bisher in Betrieb genommenen Pilotanlagen wurden die entsprechenden Komponenten als Sonderanfertigungen hergestellt.

5. Weiterer Entwicklungsbedarf wird (in unterschiedlichem Maße) gesehen bei folgenden Bauteilen:

-Verdichter
-Hochdruckregelventile
-Absperrventile
-Wärmeübertrager
-sonstige Armaturen.

Entwicklungsprobleme betreffen auch Schmierung/Kältemaschinenöl sowie Dichtungswerkstoffe.

6. Hochdruckseitige Gaskühler für den NK-Bereich stellen kein Problem mehr dar und sind in Deutschland von zwei Herstellern lieferbar (Preis nach

Ansicht des Anlagenbaus noch zu hoch). Rohrleitungen aus Stahl sind verfügbar, wobei hier auf die im Supermarktbereich unübliche Schweißmontage verzichtet werden sollte. Bei der Löttechnik (Stahl) ist noch Entwicklungsarbeit notwendig.

7. Ein Sonderproblem stellt die abfallende Energieeffizienz des Betriebs mit $CO_2$ im transkritischen Bereich im Vergleich zu R404A-Anlagen bei Außentemperaturen > ca. 28 °C dar (vgl. Haaf et al. 2005). Dieser energetische Nachteil bei hohen Außenlufttemperaturen kann grundsätzlich auf verschiedenen Wegen kompensiert werden. Eine Variante stellt die Kombination des $CO_2$-Gaskühlers mit einem zusätzlich kühlenden Wasser-Spray-System dar, was zumindest für südliche Länder mit Wassermangel jedoch problematisch ist und auch zusätzliche Probleme (Korrosion, Kalkablagerung u.ä.) aufwirft. Zukünftig sollen jedoch auch andere technische Lösungen zum Zuge kommen. Erprobt werden Prototypen von Expansionsmaschinen sowie eine Optimierung bei Hubkolben-Verdichtern. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf.

### 2.1.1 Verdichter

Schlüsselbedeutung kommt der Verdichterentwicklung zu. Hier stellen sich für $CO_2$-Anlagen im transkritischen Betrieb neue konstruktionstechnische Anforderungen. Zeit- und ablaufbestimmende Faktoren sind

- die Entwicklungs- und Erprobungsdauer von Prototypen,
- der Übergang zur Serienfertigung einer größeren Zahl unterschiedlicher Modelle (unterschiedliche Kälteleistung und Hubvolumen) und
- der Übergang zu Stückzahlen, die Kostendegression ermöglichen.

Wie rasch die Entwicklung verläuft ist dabei nicht nur von der technischen, sondern ganz wesentlich auch von der Nachfrageseite abhängig.

Entwicklungstrend: Verdichter für den *subkritischen* $CO_2$-Betrieb werden in Europa gegenwärtig von 5-6 bedeutenden Kompressorherstellern (mit sehr unterschiedlichen Stückzahlen) geliefert. Die Entwicklung konnte an die Erfahrungen mit Verdichtern für R404A und R410A anknüpfen, für die seit den 1990er Jahren eine große Modellpalette und zunehmende Betriebserfahrung verfügbar war. Bei $CO_2$ ist im Vergleich zu R404A die volumenstrombezogene Kälteleistung und damit die Kälteleistung des Verdichters bedeutend größer. Dies ermöglicht ein kleineres Fördervolumen (kleinere Kolben) bei vergleichbarer Leistung und gleichem Wirkungsgrad des Verdichters. Die Drucklagen beim unterkritischen $CO_2$-Betrieb sind dabei höher als bei R404A, liegen aber in ähnlicher Größenordnung wie bei R410A.[3] Insgesamt wurde die Entwicklung von Verdichtern für R410A (in der Klimatechnik) und $CO_2$ (in Tieftemperaturkaskaden für die Supermarktanwendung) als eine „Anpassung standardmäßiger halbhermetischer Hubkolbenverdichter" bezeichnet, „um den physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften der Kältemittel gerecht zu werden. Dies sind insbesondere die Drucklagen, der Massenstrom, die Dampfdichte, die hohe spezifische Kälteleistung und Leistungsaufnahme sowie die Öl- und Druckgastemperatur." (Große-Kracht 2005)

Die Entwicklung von halbhermetischen Verdichtern für den stationären *überkritischen* $CO_2$-Betrieb ist dagegen in starkem Maße Neukonstruktion; ein Hersteller spricht von „komplett neue(r) Systemtechnik und Regelung" (vgl. Bitzer 2007, Renz 2007; Bock 2007; Bock/Knudsen 2007). Die Entwicklung begann bei den verschiedenen Verdichterherstellern zeitlich versetzt ab zweiter Hälfte der 1990er Jahre. Auch der gegenwärtige Status wird noch als Entwicklungs-/Erprobungsphase bezeichnet.

Hochdruckseitig müssen die Verdichter auf maximale Betriebsdrücke von etwa 130 bar ausgelegt werden, also eine im Vergleich zu R410A und $CO_2$-subkritisch weit höhere Drucklage. Hieraus ergeben sich Konstruktionsunterschiede. Dies betrifft u.a. das Verdichtergehäuse (Verwendung eines Konstruktionswerkstoffs

[3] Bei unterkritischer $CO_2$-Anwendung in Kaskade ist der maximale Hochdruck mit ca. 40 bar „in etwa identisch mit der R410A-Einsatzgrenze bei Hochtemperatureinsatz. Für beide Kältemittel liegen die Hochdrücke über den bisher bei R22 oder R404A üblichen Werten von 25-28 bar." Große-Kracht 2005.

höherer Festigkeit: duktiles Material, Kugelgraphit-/Sphäroguss statt Grauguss) sowie Ventilplatte, Arbeitsventile und Lager, die ebenfalls sehr viel stärkeren Belastungen unterliegen als bei $CO_2$-subkritisch.

Ein weiteres Problem ist die abfallende Energieeffizienz des transkritischen $CO_2$-Betriebs bei Außentemperaturen > ca. 28 °C. Dem soll von einem Hersteller durch konstruktive Maßnahmen (Zylinderköpfe mit separaten Hoch- und Niederdruck-Kammern, Parallel-Verdichtung) begegnet werden, wobei eine Anhebung der Kälteleistungszahl (COP) von etwa 15 % angegeben wird (vgl. Renz 2007). Dies würde im Vergleich des energetischen Verhaltens von $CO_2$- zu R404A-Anlagen (Verhältnis von elektrischer Aufnahmeleistung zu Kälteleistung unter Berücksichtigung der Summenhäufigkeit der Außenlufttemperaturen) zu einer deutlich besseren Energieperformance von $CO_2$ führen.

Einführungszeiten: Der größte Hersteller von $CO_2$-Verdichtern für den *subkritischen* Bereich verfügte 10 Jahre nach der Ersteinführung (1998) über eine Palette von 16 Modellen im Bereich von 4,4-80 kW Kälteleistung (bis 2006 nur 5 Modelle). Die Absatzzahlen hatten sich in den Jahren von 2004-2007 per anno etwa verdoppelt. In dieser Phase wurde Serienproduktion (ca. 1.000 Stück/a) erreicht. Der Einsatz der Komponenten erfolgt nicht mehr ausschließlich, wie in Pilotphasen, über die Kooperation mit ausgewählten Anlagenbauern, sondern ebenso über den Großhandel und Frigoristen. Der gleiche Hersteller hatte bis Mitte 2007 für den *transkritischen* Betrieb zwei kleinere Grundmodelle (12 und 9 $m^3/h$ Hubvolumen) entwickelt, mit denen seit 2004 bzw. seit 2006 Betriebserfahrungen im Supermarktbereich (Großmärkte, Discounter) vorliegen. Ein drittes, größeres Modell (ca. 17 $m^3/h$ Hubvolumen, Kälteleistung ca. 35-40 kW) befand sich zu diesem Zeitpunkt in der Probephase. Der Einsatz der Verdichter erfolgte in dieser Entwicklungsphase nur über ausgewählte Anlagenbauer. Der Absatz der Geräte zeigte in den Jahren 2004-2007 eine vergleichbare Dynamik wie bei den Verdichtertypen für den subkritischen Bereich, jedoch auf einem um 4-5 Jahre zurückversetzten Niveau. Insofern ist anzunehmen, dass bei ähnlicher Entwicklungsgeschwindigkeit und Nachfrage der Übergang zur Serienproduktion mit breiterer Produktpalette in wenigen Jahren erreicht werden kann.

Verfügbarkeit: Dem Anlagenbau standen Mitte 2007 für $CO_2$-Anlagen im NK-Bereich kleine Hochdruck-Verdichter mit einem Hubvolumen von ca. 12 $m^3$/h für je nach Design 20-25 kW Kälteleistung von verschiedenen Herstellern zur Verfügung (Bitzer, Dorin, Bock). Die im Discounter-Bereich erforderliche Kälteleistung von 40 - 50 kW wird durch Parallelverschaltung von zwei kleinen Verdichtern erbracht. Für höhere Kälteleistungen wird eine entsprechend größere Zahl dieser Verdichter eingesetzt (so z. B. bei COOP-Wettingen 12 Bitzer 4HC4-20K für eine Kälteleistung von 2 x 161 kW). Diese Redundanzen sind aus Sicherheitsgründen sinnvoll und für die Teillastfähigkeit des Systems zwingend erforderlich. Sie werden bei allen größeren Märkten praktiziert. Mit einem für Ende 2007 erwarteten größeren Verdichter mit ca. 17 $m^3$/h Hubvolumen sollten im Verbund (6 Verdichter) Kälteleistungen von 230-240 kW erreichbar sein. Die bisher vom Anlagenbau geforderten Kälteleistungsbereiche liegen bei bis zu 250-320 kW. Jedoch besteht auch Bedarf für größere Leistungen (Anforderung bis max. 800 kW).

Bei Verdichtern für den transkritischen Bereich wird wie für den TK-Bereich eine Palette unterschiedlicher Leistungstypen benötigt, die z.Zt. noch nicht verfügbar sind. Die bestehenden Baugrößen müssten zu durchgängigen Baureihen ergänzt werden. Generell bedeutet Verfügbarkeit hier noch nicht Verfügbarkeit zu für die Ausweitung der $CO_2$-Technologie tragfähigen Kosten (vgl. dazu Abschn. 2.2).

### 2.1.2 Ventile, Regeleinrichtungen und sonstige Komponenten

Der TK-Bereich (*subkritischer Betrieb*) ist heute vollständig durch serienmäßig hergestellte Komponenten abgedeckt (Callesen 2007a und b). Hier besteht kein besonderer Entwicklungsbedarf mehr, soweit es nicht um die übliche Optimierung und Weiterentwicklung von Komponenten geht. Bei der Regeltechnik werden gleichfalls Standard-Versionen für elektronische Kühlmöbelregler, Überhitzungsregler und Verbundsatzregler von verschiedenen Herstellern angeboten.

Im NK-Bereich (*transkritischer Betrieb*) muss wie bei der Verdichterentwicklung zwischen Niederdruck- und Hochdruckseite unterschieden werden.

Für den Niederdruckbereich liegen alle Komponenten in Serienreife vor (vgl. Callesen 2007a). Dies ergibt sich u.a. daraus, dass entsprechende Komponenten mit einer Auslegung für Drücke zwischen 35 und 46 bar seit langem für R134a- bzw. R410A-Anlagen (incl. Wärmepumpen) als Standard-Versionen verfügbar sind und auch für $CO_2$-Anlagen genutzt werden können.

Dies gilt für Magnetventile, Kugelabsperrventile, Rückschlagventile, elektronische Expansionsventile, Filtertrockner, Feuchtigkeitsindikatoren, Pressostaten, Drucktransmitter und Sicherheitsventile.

Anders dagegen auf der Hochdruckseite. Die hier in einer Auslegung bis zu 120 bar erforderlichen Komponenten für Anlagen im Supermarktbereich waren Mitte 2007 noch nicht als Standardversionen verfügbar, sondern nur als Prototypen bzw. als Standardversionen aus der industriellen Prozesstechnologie.

*Erläuterungen zu einigen Komponenten*

Magnetventile: Elektromagnetisch betätigte Absperrventile, die hauptsächlich in der Flüssigkeitsleitung eingesetzt werden, um den Kältemittelfluss zum Expansionsventil ggfs. zu unterbrechen.

Kugelabsperrventile: Dienen zum Absperren von Anlagenteilen z. B. für Reparatur- und Wartungsarbeiten.

Rückschlagventile: Sollen in Rohrleitungen ein Rückströmen des Kältemittels verhindern.

Expansionsventile: Drosselorgan zwischen Hoch- und Niederdruckseite der Kälteanlage. Expansionsventile regeln die Überhitzung des Kältemitteldampfes am Verdampferausgang und führen dem Verdampfer nur soviel Kältemittel zu, wie er gerade verdampfen kann. Je nach Regelung sind thermostatische und elektronische Expansionsventile zu unterscheiden.

Sicherheitsventile: Verhindern die Überschreitung des zulässigen Betriebsdrucks der Anlage (Abblasen).

Filtertrockner: Entziehen dem Kältemittelkreislauf Wasser, Säure, sonstige Verunreinigungen, um Korrosionsbildung, Zersetzung des Kältemittels, Beeinträchtigung der Schmierfähigkeit des Öls u.a.m. zu verhindern.

Feuchtigkeitsindikatoren: Dienen dem Nachweis des Feuchtigkeitsgehalts (Wassergehalts) im Kältemittelkreislauf.

Pressostate: Druckschalter, die einen bestimmten eingestellten Druck regeln oder begrenzen und den Verdichter gegen zu hohen oder niedrigen Druck schützen.

Drucktransmitter: Dienen der Druckmessung und mit entsprechender Elektronik zur Drucküberwachung.

Hochdruckabsperrventile (die hinter dem Verdichter eingesetzt werden) waren Mitte 2007 als Standard in Industriehydraulikversion (Kugelhähne) von einem Hersteller auf Edelstahlbasis verfügbar. Sie waren insofern noch nicht für den

Supermarktbereich speziell angepasst und lagen noch nicht in allen benötigten Nennweiten vor. Mitte 2007 waren die Nennweiten DN15 und DN20 abgedeckt; Ventile der Nennweiten DN25 und DN32 standen noch zur Entwicklung an. Der Anlagenbau wünscht lötbare Ventile (Messing bzw. Stahl mit Kupferplattierung), da Schweißen im Supermarktbereich nicht üblich ist. Die Serienfertigung ist hier bei vergleichsweise geringen Preisdifferenzen zwischen Edelstahl- und Messingventilen stark von Stückzahlen abhängig.

Druckschalter-, -transmitter und -regler waren ebenfalls noch nicht als Standardversionen für diesen Bereich verfügbar.

Hochdruckexpansionsventile: Dem Anlagenbau standen Mitte 2007 für die transkritischen $CO_2$-Anlagen einerseits Hochdruckdrosselventile zur Verfügung, die für Industrieanwendungen entwickelt worden waren und die serviceaufwendig, teuer und für den LEH-Bereich oft als „overengineered“ eingeschätzt werden. Prototypen speziell für den Supermarktbereich befanden sich bei mehreren Herstellern in Entwicklung. Von diesen noch speziell aus Stahl gefertigten Prototypen für Leistungsbereiche bis 240 kW dürften bis Mitte 2007 Stückzahlen im mittleren dreistelligen Bereich an den Anlagenbau ausgeliefert worden sein. Prototypen liegen in wenigstens drei verschiedenen Größen vor (unterschiedliche Düsengrößen je nach geforderter Kälteleistung; kleinste Variante: 20 kW). Während es sich bei den in den Ventilen eingesetzten Einzelteilen wie Düsensatz, Magnetkupplung, Antrieb usw. i.d.R. um Standard-Teile handelt, muss das Gehäuse der hohen Drucklage angepasst werden. Bei einer zukünftigen Serienproduktion werden dafür gegossene Gehäuse verwendet. Vom befragten Hersteller war geplant, im nächsten Schritt bis Ende 2007 eine 0-Serie (gegossener Standard) zu entwickeln, mit der weitere Erfahrungen gesammelt werden sollten. U.a. sollte geprüft werden, ob und inwieweit die Palette der Ventil-Größen noch zu erweitern ist. Entsprechende Nachfrage des Anlagenbaus vorausgesetzt könnte aus der 0-Serie in etwa einem Jahr eine kommerzielle Ventil-Serie entwickelt werden, für die mit Stückzahlen im vierstelligen Bereich und einer Minderung der Stückkosten gerechnet wird.

Mechanische (thermostatische) Hochdruckregelventile sind bisher noch nicht entwickelt worden. Elektronische Expansionsventile bieten ihnen gegenüber sehr viel mehr Regelungs- und Optimierungsmöglichkeiten (Bachmann 2004); dies gilt besonders bei den hohen Druckschwankungen im transkritischen $CO_2$-Betrieb. Sie sind aber deutlich teurer (etwa Faktor 4-5). Die große Kostendifferenz ergibt sich u.a. aus dem Aufwand für Regler und zusätzliche Messfühler.

Elektronische Regler für den NK-$CO_2$-Bereich (Einzelregler; Regelsysteme mit Monitoring; Regelsysteme mit Monitoring und Optimierungsfunktionen) liegen bisher nur als Prototypen vor, die zu Serienprodukten für alle Größen des LEH vom Discounter bis zum Hypermarkt entwickelt werden sollen.

Wärmeübertrager für Wärmerückgewinnung: Verwendet werden können derzeit vergleichsweise sehr teure Rohrbündel- und Koaxial-Wärmeübertrager, die für den industriellen Bereich entwickelt worden sind (Stahl- und Kupferrohrausführungen, ausgelegt für Drücke von 100-200 bar). Gewünscht wird die Entwicklung von kostengünstigen Plattenwärmeübertragern, ggfs. auch luftgekühlten Rohr-Lamellenwärmeübertragern in Micro-Channel-Ausführung und eine Anpassung an den kleineren Anforderungsbereich der Supermarktkälteanlagen.

Auch bei Pressostaten ist die Auslegung für die höheren Drucklagen im transkritischen Betrieb noch erforderlich.

## 2.2 Kostenaspekte/wirtschaftliche Hemmnisse

### 2.2.1 Geforderte Kostenreduktionen

Die Ausweitung der $CO_2$-Technologie im NK-Bereich setzt aus Sicht des Anlagenbaus eine deutliche Reduktion der Kosten für die o.a. Komponenten voraus, die derzeit nicht aus serieller Fertigung verfügbar sind, sondern einzeln gefertigt werden müssen. Bei Verdichtern und Ventilen wird eine Kostenreduktion von wenigstens 50 Prozent gefordert, bei Wärmeübertragern von 75 Prozent. Es

wird erwartet, dass eine solche Kostenminderung mit dem Übergang zur seriellen Fertigung – und dies bei verschiedenen Lieferanten – möglich ist.

Die Mehrkosten für $CO_2$-Anlagen (transkritischer Bereich) im Vergleich zu eingeführten HFKW-Anlagen werden gegenwärtig mit 30-40 Prozent beziffert. Dies gilt für größere Anlagen über ca. 150 kW; im Bereich um 50 kW können die Mehrkosten bis 80 Prozent betragen. Bei größeren Anlagen ergeben sich kostenmindernde Vorteile aus den dann ins Gewicht fallenden Kosteneinsparungen beim Rohrleitungssystem, wo bei der $CO_2$-Technologie wegen kleinerer Durchmesser im Vergleich zu HFKW-Anlagen Material eingespart werden kann.

Der Serviceaufwand ist nach Zeit und Kosten bei $CO_2$-Anlagen stoffbedingt größer als bei HFKW-Anlagen (u.a. niedriger Abblasdruck, Problem bei schnellem Ventilwechsel wg. niedrigem Tripelpunkt).

### 2.2.2 Schwellenabschätzung für Serienfertigung

Bei $CO_2$-Verbundanlagen für den *TK-Bereich* (mit ihrer niedrigeren Drucklage) ist heute bei einer jährlichen Nachfrage in Europa von 100-150 Anlagen für Supermärkte und einer Zuwachsrate von 20-30 Prozent/a der Schritt zur Serienfertigung der Komponenten erreicht. Entsprechende Anlagen sind z. B. in der Schweiz Standard. In Dänemark sind sie seit 1.1.2007 (HFKW-Verbot über 10 kg Füllmenge) Standard; in den anderen skandinavischen Ländern beginnen sie Standard zu werden.

Um die Schwelle zur Serienfertigung bei Verdichtern für den *transkritischen $CO_2$-Betrieb* mit höherer Drucklage zu erreichen, wird seitens des Anlagenbaus eine jährliche Nachfrage von mindestens 1.000 Verdichtern p/a für notwendig erachtet, wobei dies Neuanlagen für ca. 250-300 Discounter-Märkte (jeweils 4 Verdichter/Anlage) bedeuten würde. Bei größeren Märkten mit 100-120 kW im NK-Bereich und ca. 8 Verdichtern würde das etwa 125 Märkten p.a. als Minimum entsprechen. Dabei will der Anlagenbau nicht von einzelnen Komponentenlieferanten abhängig sein.

Der im Vergleich zu TK-Anlagen höhere Nachfragebedarf bei den transkritischen NK-Anlagen ergibt sich daraus, dass die Komponenten für $CO_2$-TK-Anlagen und R410A-Anlagen nahezu identisch sind, die Komponentennachfrage hier also eine breitere Basis hat, während sie im transkritischen NK-Bereich allein aus dem Betrieb von $CO_2$-Anlagen im LEH kommen müsste.

Der Komponentenbau geht seinerseits von einer Kostenreduktion beim Übergang zur Serienfertigung aus. Die gegenwärtigen Kosten für die zentralen Hochdruck-Komponenten für den $CO_2$-Betrieb wie Verdichter oder Expansionsventile sind, wie dargelegt, reine Prototypkosten und schon deswegen mit jenen für HFKW-Anlagen nicht zu vergleichen. Sie werden nach Ansicht des Komponentenbaus aber auch in Zukunft wegen des drucklagenbedingt höheren Materialaufwandes und umfangreicherer elektronische Regelung höher sein.

### 2.2.3 Marktabschätzung/erforderliche Durchdringungsrate

Grob geschätzt entfallen auf den Sektor SB-Warenhäuser, Verbrauchermärkte, Discounter, Supermärkte und sonstige mittlere und große Geschäfte rd. 60% der LEH-Läden. 2006 waren dies in Deutschland über 30.000 Geschäfte (LZ-Report 2007/2008). Rechnet man über alle Ladenformate in diesem Bereich mit einer durchschnittlichen (hohen) Lebensdauer von 15 Jahren pro Kälteanlage, ergibt dies einen jährlichen Erneuerungsbedarf von knapp 7 Prozent, was ca. 2.100 Anlagen/Jahr entspricht. Diese Größenordnung wird durch befragte Akteure des LEH bestätigt, die für alle Ladenformate Neuanlagenquoten von 6-10 Prozent des Anlagenbestandes angeben. Dies entspricht jährlich etwa 800-1.300 Anlagen für Discounter, 600-900 für Supermärkte, 100-160 für Verbrauchermärkte und 40-65 für Warenhäuser, insgesamt 1.540-2.400 Anlagen/Jahr oder im Durchschnitt knapp 2.000 Anlagen/Jahr für diese Ladenformate. Nachfrage nach Neuanlagen ergibt sich neben dem verschleißbedingten Ersatz von Altanlagen auch aus dem überproportionalen Wachstum einzelner LEH-Ketten bei Verbrauchermärkten und im Discounter-Sektor (Marktausweitung, Neueröffnungen), was bei insgesamt rückläufiger Laden-Zahl zugleich zum vorgezogenen Abwracken von Altanlagen in den übrigen LEH-Sektoren führt.[4]

Die jährliche inländische Nachfrage nach Neu- und Ersatzanlagen bewegt sich also in einer Größenordnung von wenigstens 2.000 Stück. Überschlägig 10-12 Prozent dieses jährlichen Neubau- bzw. Erneuerungsbedarfs müssten mit transkritischen $CO_2$-Anlagen ausgerüstet werden, um die o.a. Schwelle zur Serienfertigung von Komponenten allein durch Nachfrage seitens des deutschen Marktes zu erreichen.

Einen zusätzlichen Ansatz für die Verbreitung von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln inkl. $CO_2$-Anlagen bietet auch der bis Anfang 2010 (und darüber

[4] REWE will bis 2012 1.000 neue REWE- und Penny-Läden eröffnen, EDEKA incl. NETTO Marken Discount „in den nächsten Jahren“ jeweils 300 neue Läden. Vgl. FAZ v. 17.11.2007, 5.12.2007, 20.2.2008.

hinaus) erforderliche Umrüstbedarf von R22-Anlagen[5], der durch unterschiedliche HFKW-Kältemittel oder durch natürliche Alternativen befriedigt werden kann. Eine Schätzung des R22-Altanlagenbestandes ist schwierig; aus Gesprächen mit dem LEH ergeben sich aber in erster Näherung folgende Größenordnungen als unterer Schätzwert: 2.000 Anlagen im Discounter-Bereich, 1.500 Anlagen bei Supermärkten, 400 bei Verbrauchermärkten und 200 bei Warenhäusern (zusammen 4.100 Anlagen). Deutlich höhere Zahlen nennen DuPont (Gerstel 2007: 7.300 LEH-Filialen mit R22-Anlagen) und Epta Deutschland (Tillner-Roth 2008: 26 Prozent aller Märkte mit R22-Anlagen, was bezogen auf die o.a. 30.000 Märkte etwa 7.800 Anlagen entsprechen würde). Ein Teil dieser Anlagen ist verschlissen und fällt damit unter den bereits angeführten Erneuerungsbedarf; bei einem Teil der Anlagen mit längerer Laufzeit bietet sich ein vorgezogener Ersatz durch Neuanlagen an, die bei einem Umstieg auf natürliche Kältemittel notwendig sind, da $CO_2$ nicht in heute bestehenden Kälteanlagen eingesetzt werden kann. Berücksichtigt man auch diesen zukünftigen Anlagenbedarf, so dürfte der Übergang zur kostengünstigeren Serienfertigung von Komponenten und Anlagen bei einer Marktdurchdringung von 10 Prozent des Neu- und Ersatzanlagenmarktes erreichbar sein.

### 2.2.4 Anlagen- und Betriebskosten

Aus Sicht von LEH-Betreibern, Anlagen- und Komponentenbau wird im Supermarktbereich nur dann Dynamik in die HFKW-Substitution durch $CO_2$-Verbundanlagen für TK und NK kommen, wenn Kostenminderung bei Anlagen und Komponenten durchgesetzt werden kann und die $CO_2$-Anlagen energetisch im Vergleich zu bestehenden HFKW-Anlagen ebenbürtig oder besser sind. Den LEH-Betreibern als „Endkunden“ ist einerseits klar, dass die gegenwärtigen hohen Anlagen(Investitions-)kosten für den NK-$CO_2$-Betrieb deren Entwicklungs- und Prototypcharakter geschuldet sind. Sie verlangen aber andererseits eine Senkung der Investitionskosten auf die oder zumindest in die Nähe derer von HFKW-Anlagen. Anlagen- und Komponentenbau machen demgegenüber geltend, dass

[5] Der Umrüstbedarf ergibt sich aus dem europaweiten Service- und Wartungsverbot mit R22-Frischware ab 1.1.2010 gem. EG 2037/2000 sowie dem vollständigen R22-Service-Verbot ab 2015.

deutliche Kostensenkungen bei Anlagen und Komponenten deren serienmäßige Herstellung bei den Zulieferern voraussetzen. Dies wiederum erfordere eine entsprechend steigende Anlagen-Nachfrage seitens des LEH.

Dazu kommen zwei weitere Argumente. Insbesondere der Anlagenbau und die ihm zuliefernde Industrie betonen die Notwendigkeit, entgegen der bisherigen Praxis bei Kaufentscheidungen des Anlagen nachfragenden LEH nicht allein die Investitionskosten, sondern stärker als bisher die Betriebskosten und damit insbesondere den Energieverbrauch der Gesamtanlagen in Rechnung zu stellen. Partiell höheren Investitionskosten für $CO_2$-Anlagen könnten bei entsprechender Anlagenoptimierung durch verschiedenartigste Energieeinsparmaßnahmen und Anlagenregelung einschließlich externer Anlagenüberwachung und -regelung günstigere Betriebskosten gegenüberstehen (was natürlich auch für HFKW-Anlagen gilt). Darüber hinaus wird von verschiedenen LEH-Ketten Energie- und GWP-Einsparung bzw. „Klimafreundlichkeit“ als Imagefaktor und Wettbewerbselement mit wachsender Bedeutung gesehen.

Als Faktoren, die die Nachfrage nach energetisch optimierten und klimaverträglichen Kälteanlagen im LEH zukünftig stimulieren können, werden u.a. angesehen:

- Die zu erwartende stringente Umsetzung der F-Gas-Verordnung (Überwachung und Dichtigkeitsprüfungen), die den HFKW-Betrieb tendenziell verteuern wird.
- Es wird für denkbar gehalten, dass im Rahmen der öffentlichen klimapolitischen Diskussion weitergehende politische Rahmenbedingungen für den Betrieb von Kälteanlagen wie Verteuerung und/oder Begrenzung des HFKW-Verbrauchs gesetzt werden.
- Imagerelevante und öffentlichkeitswirksame Maßnahmen wie z. B. Kennzeichnung von Kühlmöbeln, -Anlagen oder Märkten unter dem Gesichtspunkt Energieeffizienz und Klimafreundlichkeit.

Es wird darauf verwiesen, dass solche Rahmenbedingungen in verschiedener Form außerhalb der Bundesrepublik in der Schweiz, in Luxemburg, Dänemark,

Norwegen und Schweden bestehen, also den Ländern, in denen in den letzten Jahren das Gros an alternativen Verbundanlagen für TK und NK ($CO_2$, Kälteträger etc.) errichtet wurde. Außerdem gibt es eine wachsende Zahl von LEH-Betrieben, die Klimafreundlichkeit als Wettbewerbsargument zu nutzen versuchen. Dass eine zunehmende Sensibilität der LEH-Kundschaft gegenüber Klimaargumenten beim LEH durchaus registriert wird, zeigt sich auch in der wachsenden Bereitschaft, mit Energieeinsparmaßnahmen zu experimentieren, die bisher eher als kunden- und absatzfeindlich galten. Dies betrifft z. B. Türen für NK-Regale, die bisher u.a. mit dem Argument abgelehnt wurden, sie würden Impulskäufe und den Abverkauf insgesamt behindern. Dies Argument wurde früher auch gegen die Abdeckung von TK-Truhen mit Schiebedeckeln vorgebracht.

# 3. Weitergehende Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz/Klimabilanz im Supermarkt: Sonderbetrachtung Energieeinsparpotential Kühlmöbelabdeckung

Die Energieeffizienz von Kälteanlagen hat in der Vergangenheit seitens des LEH bei Investitionsentscheidungen nach Ansicht des Anlagenbaus keine besondere Rolle gespielt. Von Belang waren i.d.R. nur die Investitionskosten. Energieeffizienz gewinnt heute jedoch als Entscheidungsfaktor an Bedeutung.

Eine Übersicht zu Möglichkeiten der Verbesserung der Energieeffizienz und der $CO_2$-Bilanz von Supermarktkälteanlagen enthält Kapitel 6 der AMrktübersicht.

Die durchgehende (Tag- und Nacht-)Abdeckung von Kühlmöbeln mit Schiebedeckeln (Truhen) bzw. Türen (Regale) gilt als bedeutende Energieeinsparquelle. Das Einsparpotential wird im Allgemeinen mit bis zu 40 Prozent des Energieverbrauchs der jeweiligen offenen, auch nachts nicht abgedeckten Verbrauchsstelle beziffert (vgl. Marktübersicht, Kapitel.6.1). Die Aus- und Nachrüstung von Kühlmöbeln, zuerst von Kühltruhen, mit durchgehender Abdeckung setzte vor etwa zehn Jahren ein. Neben der Energieeinsparung ist die bessere Temperaturgewährleistung für das Kühlgut ein entscheidendes Motiv für die Abdeckung von Kühlmöbeln.

Um die Bedeutung dieses Potentials näher einschätzen zu können, wurde hier der Stand der Kühlmöbelabdeckung in der Bundesrepublik (Mitte 2007) durch Befragung der relevanten LEH des Supermarktbereichs erhoben. Zudem wird auf die aktuelle Diskussion in den Niederlanden verwiesen, bei der Kühlmöbelabdeckung erstmals zum Gegenstand der öffentlichen Auseinandersetzung um Energieeinsparung im Supermarktbereich geworden ist.

## 3.1 Kühlmöbelbestand und -abdeckung in der Bundesrepublik Mitte 2007

Da keine Daten zum aktuellen Stand der Kühlmöbelabdeckung in Deutschland vorliegen und die Schätzungen von Kühlmöbelherstellern, -Nachrüstern und -Betreibern weit auseinander liegen, wurden die wichtigsten LEH-Ketten nach dem Stand der Kühlmöbelabdeckung Mitte 2007 befragt.

Die Befragung erfasste Unternehmen mit insgesamt rd. 28.600 Märkten[6], darunter etwa 14.440 Discount-Märkte und 14.140 andere (SB-Warenhäuser, Verbrauchermärkte, Supermärkte sowie eine gewisse Zahl kleinerer traditioneller LEH-Märkte; Bezugsjahr 2006/07). Die Gesamtzahl der Märkte in diesen Kategorien stimmt in etwa mit den Angaben des EHI-Retail Institutes, Köln, überein, das für 2006/07 von 26.170 SB Warenhäusern, Verbrauchermärkten, Discountern und Supermärkten in Deutschland ausgeht (EHI 2007). Die hier erfasste Marktzahl ist allerdings etwas höher, da auch eine Anzahl kleinerer, traditioneller LEH-Märkte durch die Gesamtschätzung für Edeka in die Befragung mit einging. Befragt wurden die Unternehmen nach ihrem Gesamtbestand an Truhen und Schränken/Regalen im TK- und NK-Bereich in laufenden Metern (lfm) sowie nach dem geschätzten Anteil an Kühlmöbeln mit Tag-/Nacht-Abdeckung. Theken, Sets (Truhen mit Schrankaufsatz) u.ä. andere Kühlmöbel wurden nicht erfasst.

Der LZ-Report 2007/2008 geht bei 51.000 Geschäften – also unter Einrechnung von auch kleineren Geschäften mit nur geringem Kühlmöbelbestand – für 2006 von 806,4 km Tiefkühltruhen und –schränken aus. Dies entspricht der in Tab. 1 wiedergegebenen Größenordnung (816,0 km), dürfte angesichts der höheren Ladenzahlen jedoch etwas zu niedrig geschätzt sein.

[6] Erfasst: Rewe-Gruppe, Tengelmann-Gruppe, Schwarz-Gruppe (Lidl, Kaufland), Aldi-Nord und -Süd, Edeka (incl. Marktkauf und Netto Marken-Discount), Netto-Nord, Norma, Coop/Kiel, Tegut. Keine Auskunft: Metro-Gruppe.

| Tab. 1: Kühlmöbelbestand in Deutschland Mitte 2007, Strukturdaten | | | |
|---|---|---|---|
| | Spanne/Laden (lfm) | ∅ pro Laden (lfm) | Gesamtbestand (lfm) |
| TK-Truhen | 8,5-72 | 27,5 | 785.050 |
| TK-Schränke | 0-15 | 1,1 | 30.970 |
| NK-Truhen | 0-45 | 2,3 | 66.575 |
| NK-Regale | 8,3-100 | 21,0 | 599.495 |
| Summe | | | 1.482.090 |

Basis: Angaben zu 28.528 Filialbetrieben; lfm: laufende Meter. Eigene Erhebung ÖR.

Von den knapp 1.500 km Kühlmöbeln entfallen nach laufenden Metern 55,1% auf den TK- und 44,9% auf den NK-Bereich. Es dominieren TK-Truhen (53% nach lfm) und NK-Regale (insbesondere für Molkereiprodukte; gut 40% nach lfm). Die Unterschiede in der Ausstattung der einzelnen LEH-Ketten und Ladenformate mit den jeweiligen Kühlmöbelkategorien sind ausgeprägt, was sich in z. T. großen „Spannen“ bei den einzelnen Kühlmöbeln ausdrückt (Tab. 1). Bei den Discountern beträgt der durchschnittliche Besatz mit Kühlmöbeln pro Laden etwa 31,5 lfm, beim übrigen LEH ist er mit 23,4 lfm geringer.

Über den erreichten Grad der Kühlmöbelabdeckung gibt Tab. 2 Auskunft. Wieder in laufenden Metern gerechnet war Mitte 2007 die Hälfte der Kühlmöbel mit Schiebedeckeln bzw. Türen ausgerüstet und damit auch tagsüber bei Nichtentnahme von Ware geschlossen (49,9%). Während TK-Truhen zu mehr als 4/5 (85,9%) und TK-Schränke komplett geschlossen sind, gilt dies nur für die Hälfte der NK-Truhen (49,6%) und für NK-Regale kaum (0,2%). Insofern fallen insbesondere die bisher durchweg offenen NK-Regale für Molkereiprodukte (MoPro), Wurst/Fleisch u.ä. ins Gewicht, die etwa 40% der Gesamtlänge des in der Befragung erfassten Kühlmöbelbestandes ausmachen.

| Tab.2: Kühlmöbelabdeckung Mitte 2007 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kühlmöbel Gesamtbestand | | | Bestand Discounter | | Bestand sonstiger LEH | |
| | insgesamt (lfm) | davon „geschlossen“ | | insgesamt (lfm) | davon „ge-schlos-sen“ (%) | insgesamt (lfm) | davon „ge-schlos-sen“ (%) |
| | | (lfm) | (%) | | | | |
| TK-Truhen | 785.050 | 674.687 | 85,9 | 454.700 | 95,5 | 330.350 | 72,8 |
| TK-Schränke | 30.970 | 30.970 | 100,0 | - | - | 30.970 | 100 |
| NK-Truhen | 66.575 | 33.000 | 49,6 | 33.000 | 100 | 33.575 | 0,0 |
| NK-Regale | 599.495 | 1.300 | 0,22 | 307.345 | 0,0 | 292.150 | 0,44 |
| Summe | 1.482.090 | 739.957 | 49,9 | 795.045 | 58,8 | 687.045 | 39,7 |

Basis: Angaben zu 28.528 Filialbetrieben; lfm: laufende Meter. Eigene Erhebung ÖR.

Zwischen den in der Befragung erfassten Discountern und den anderen Supermärkten zeigen sich nicht nur in der Kühlmöbelausstattung, sondern auch hinsichtlich der Kühlmöbelabdeckung deutliche Unterschiede.

Bei den Discountern beträgt der Anteil der geschlossenen TK-Truhen über 95 %, bei den anderen Märkten ist er mit knapp 73% niedriger. Offene NK-Truhen (zumeist „Aktionstruhen“) spielen bei Discountern keine Rolle, bei den anderen Supermärkten machen sie etwa 9% des gesamten Truhenbestandes aus. TK-Schränke (geschlossen) sind bei Discountern ebenfalls ohne Bedeutung, während sie bei den anderen Supermärkten häufiger vorkommen. Die fast durchweg offenen NK-MoPro-Regale machen bei den Discountern 38,7% am Gesamtbestand der Kühlmöbel in laufenden Metern aus, bei den anderen Supermärkten dagegen 42,5%.

Insgesamt beträgt Mitte 2007, wieder gemessen an der Frontlänge der Kühlmöbel, der Anteil der geschlossenen am erfassten Gesamtbestand bei den Discountern 58,8%, bei den anderen Supermärkten 39,7%. Die starke Expansion des Discounter-Sektors in den letzten Jahren hat offenbar auch zu einem

moderneren Kühlmöbelbestand bei ihnen im Vergleich zum Durchschnitt der Supermärkte geführt.

Bei den normalerweise *offenen* Kühlmöbeln verfügten nach Auskunft des befragten LEH Mitte 2007 etwa 87 % zumindest über eine Nachtabdeckung (Tab.3). Dies gilt für knapp die Hälfte der offenen TK-Truhen, für mehr als ein Viertel der NK-Truhen und für 98 % der offenen MoPro-Regale. Allerdings ist es hier fraglich, ob diese Nachtabdeckungen wirklich regelmäßig eingesetzt werden. Dies gilt besonders für die Kühltruhen, bei denen die Abdeckungen ggfs. per Hand aufgelegt und abgenommen werden müssen, was bei größeren Märkten wegen des erforderlichen Personal- und Zeitaufwandes meist nicht der Fall sein dürfte.

**Tab.3: Offene Kühlmöbel mit Nachtabdeckung Mitte 2007**

| | Gesamtbestand (lfm) | davon mit Nachtabdeckung | |
|---|---|---|---|
| | | in lfm | in % |
| TK-Truhen | 110.363 | 52.890 | 47,9 |
| NK-Truhen | 33.575 | 9.000 | 26,8 |
| NK-Regale | 599.495 | 587.245 | 98,0 |
| Zusammen | 743.433 | 649.134 | 87,3 |

Trend: Der Anteil der offenen Kühltruhen hat sich seit Mitte 2007 einerseits durch Nachrüstung von offenen Truhen mit Schiebedeckeln und andererseits durch Ersatz alter Truhen durch neue mit Abdeckung weiter verringert.

2007 berichteten erste LEH-Unternehmen über laufende Versuche mit der Verglasung von NK-Regalen. Untersucht wurden Energieverbrauch, Temperaturgewährleistung und die Frage einer möglichen Behinderung von Abverkäufen. Letzteres wird neben logistischen Aspekten (Raumbedarf) hauptsächlich als Argument gegen die Verglasung von MoPro-Regalen (und gelegentlich auch noch gegen die Abdeckung von Kühltruhen) angeführt. Quantitative Ergebnisse aus solchen Versuchen lagen aber noch nicht vor.

Zusammengefasst lassen Tab. 2 und 3 erkennen, dass heute im Bereich des TK-Mobiliars schon ein recht hoher Grad an Abdeckung erreicht ist, während bei NK-Truhen und insbesondere bei Kühlregalen Energieeinsparung durch Verglasung nur eine geringe bzw. keine Rolle spielt.

## 3.2 Erfahrungswerte zum Energieeinsparpotential bei Kühlmöbeln durch Abdeckung

Das Energie-Einsparpotential durch Abdeckung von Kühltruhen und Kühlvitrinen/-regalen wird im Allgemeinen durch Vorher-/Nachher-Vergleiche bei der Nachrüstung von Truhen mit Schiebedeckeln bzw. Vitrinen/Regalen mit Türen bestimmt.

Die Ausrüstung von Kühlmöbeln mit Schiebedeckeln bzw. Türen war Mitte 2007 in erster Linie ein Nachrüstungsgeschäft. Die Kühlmöbelhersteller stellen selbst keine Schiebedeckel bzw. Türen her, sondern beziehen sie für Standardkühlmöbel mit größerer Stückzahl von großen Glasfirmen. Der Nachrüstmarkt ist dagegen Domäne von kleinen Nachrüstspezialisten.

Anzumerken bleibt, dass eine Reihe praktischer Probleme wie die Verhinderung von Kondenswasserbildung bei Schiebedeckeln bzw. des Beschlagens von Regaltüren von den einzelnen Herstellern unterschiedlich gelöst werden, wobei dort, wo eine Rahmenheizung bzw. Glasheizung eingesetzt wird, der Energieeinspareffekt durch Abdeckung wieder etwas gemindert wird. Es gibt aber auch Beschichtungen, die ein Beschlagen verhindern, ohne Energie zu verbrauchen.

### 3.2.1 Kühltruhen

Bei der Umrüstung von Kühltruhen mit Schiebedeckeln ist die Anpassung der regeltechnischen Einstellung der Kühltruhen von besonderem Belang. Dies betrifft die Reduktion der Umluftmenge im Gerät und die Verminderung der Abtauphasen, wobei sich TK- und NK-Truhen hier deutlich unterscheiden. Die erste Maßnahme erreicht man durch entsprechende Drehzahlregelung der Lüfter/Ventilatoren (Drehzahlrückführung auf 30-40% des Ausgangswertes bei TK-Truhen, bei NK-Truhen deutlich geringere Reduktion) oder die Montage anderer Luftflügel. Bei abgedeckten TK-Truhen kann nach Auskunft von Handwerk und Betreibern auf etwa 2 Abtauphasen/Woche gegenüber den sonst (als Maximum) empfohlenen 2 Abtauphasen/Tag zurückgegangen werden. Bei der Abdeckung von NK-Truhen erfolgt demgegenüber i.d.R. keine gravierende Änderung des Abtauregimes.

Vom Handwerk und dem Nachrüstgewerbe[7] in der Bundesrepublik wird die durch diese Maßnahmen erreichbare Energieeinsparung mit etwa 40% bei TK-Truhen und ca. 10-15% bei NK-Truhen angegeben (Vergleich offener Truhen ohne Nachtabdeckung gegen geschlossene Truhen, Remis 2007; Pan-Dur 2007). Das niederländische ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN 2006) gibt für horizontales Tiefkühlmobiliar eine Einsparpotential durch Abdeckung von 40-52% an, wobei der niedrigere Wert auf Geräte mit Nachtabdeckung bezogen ist. Ähnliche Größenordnungen von 40 – 55 % werden in zwei Studien der niederländischen Ingenieurgesellschaft Van Beek Ingenieurs (Arnhem/NL) genannt (Van Beek 2003, 2004).
In Einzelfällen meinten Betreiber von Supermärkten in der Bundesrepublik, dass die von Handwerk und Nachrüstern angegebene Energieeinsparung durch Abdeckung bei TK-Truhen zu hoch sei und nur Einsparraten von etwa 10 % (gegenüber Geräten mit Nachtabdeckung) zu erreichen seien.

[7] Die Fa. Remis übermittelte Testberichte zu 6 TK-Inseln aus drei Märkten, denen zufolge die Energieeinsparung durch Abdeckung gegenüber den offenen Truhen zwischen 40,5% und 58,6% betrug. Der Energieverbrauch wurde nach Messung der Laufzeiten von Kompressoren, Ventilatoren und Abtauheizungen der Einzel-Geräte aus den Anschlussleistungen errechnet. (Remis 2007)

### 3.2.2 Kühlregale

Die Energieeinsparung durch die Ausrüstung von NK-Regalen für Fleisch, Milchprodukte und Gemüse mit Glastüren wird in einem Testbericht der Fa. Remis (Vergleich Regal mit Türen gegen Regal mit Nachtabdeckung) mit ca. 49 % beziffert (Remis 2007), wobei der Einspareffekt durch Nachtrollos allein (gegenüber Regalen ohne Nachtabdeckung) auf 20 – 25 % veranschlagt wird. Die niederländische ECN (2006) spricht von einem Mittelwert aus Praxismessungen von 55 % Energieeinsparung, wobei in diesen Mittelwert z. B. ein ungewöhnlich hoher Einsparwert von 86 % nicht eingeht (Wandkühlregal als Teil einer Ammoniak/Kälteträgeranlage: AGM 2004), der auch mit einer ungünstigen Beschaffenheit des offenen Kühlmöbels zusammenhängen könnte (wenig wirksamer Luftschleier; Remis 2007). Von diesem Einspareffekt ist die Einsparung durch die weit verbreiteten Nachtrollos abzuziehen, die in der Studie mit 18 – 20 % veranschlagt wird.

### 3.2.3 Entscheidung 2007: Abdeckpflicht von Kühlmöbeln in Amsterdam

Die zitierten Gutachten Van Beek 2003 und ECN 2006 zu den Energieeinsparpotentialen durch Abdeckung von Kühl- und Tiefkühlmöbeln wurden auch bei der Begründung von zwei Entscheidungen des niederländischen Raad van State (Staatsrat, oberstes Verwaltungsgericht) vom 12. September 2007 herangezogen, in denen die Klagen verschiedener niederländischer Supermarktbetreiber gegen Anordnungen der Amsterdamer Behörde für Umwelt und Bauaufsicht und der Umweltbehörde Ijsselmond zurückgewiesen wurden, Tiefkühlmöbel und vertikale Kühlmöbel bis zum 31.12.2009 zu 90 % mit Nacht- und Tagabdeckungen auszurüsten (Raad van State 2007). Diese Anordnungen stützen sich auf eine Festlegung im niederländischen Umweltgesetz von 1998, der zufolge Supermärkte mit einem Energieverbrauch von mehr als 50.000 kWh/Jahr zu Energieeinsparmaßnahmen verpflichtet werden können. Bis zum 31. Oktober 2008 soll eine Einsparrate von 32 % gegenüber dem Referenzjahr 1995 erreicht werden. Es geht dabei um Maßnahmen, bei denen die Amortisationszeit für Baulichkeiten und Einrichtungen unter 5 Jahren liegt. In der Entscheidung

werden die von ECN 2006 festgestellten Amortisationszeiten für Tagabdeckungen von durchschnittlich 2,9 Jahren (+/- 0,9 Jahre) für vertikale Kühlmöbel und 2,4 Jahre für horizontale Tiefkühlmöbel zu Grunde gelegt (Nachtabdeckungen: 1,8-4,1 Jahre). Der Stichtag 31.12.2009 orientiert sich an EG 2037/2000 (Verbot, teilhalogenierte FCKW wie das Kältemittel R 22 nach dem 31.12.2009 als Neuware in Verkehr zu bringen). Die klagenden Supermarktbetreiber hatten neben verwaltungsrechtlichen Gesichtspunkten u.a. gegen die Tagabdeckung von vertikalen Kühlmöbeln als Argumente angeführt, dies sei keine allgemein als Stand der Technik akzeptierte Maßnahme, durch die zudem höhere Unterhalts- und Reinigungskosten anfallen, der effektive Verkaufsraum gemindert und Impulskäufe abnehmen würden. Außerdem sei die Amortisationszeit der Abdeckung von Kühl- und Tiefkühlmöbeln länger als fünf Jahre.

# 4. Mögliche und erforderliche Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes von natürlichen Kältemitteln im LEH

Öffentliche Fördermaßnahmen

Die Entwicklung von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln einschl. $CO_2$ ist in der Vergangenheit in der Bundesrepublik und der EU verschiedentlich öffentlich gefördert worden.[8] Beim derzeit fortgeschrittenen Stand der Anlagentechnologie wird heute eine forschungsorientierte Entwicklungsförderung seitens des Anlagen- und Komponentenbaus in Deutschland kaum erwartet.

Anders sieht es bei der Technologie- und Markteinführung aus. Während auf Länderebene[9] höchstens in einzelnen Fällen Mittel für die finanzielle Förderung entsprechender Projekte verfügbar sind, sehen auf Bundesebene die im August 2007 verabschiedeten „Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm" der Bundesregierung („Meseberg-Papier") unter Ziff. 23 „Reduktion der Emissionen fluorierter Treibhausgase" u.a. die „Förderung der Entwicklung und Markteinführung von besonders energieeffizienten und klimafreundlichen Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln im Rahmen des Klimaschutz-Effizienz-Fonds" vor, wobei die „Förderung ... nach dem TEWI-Beitrag gestaffelt und zeitlich degressiv ausgestaltet" wird. Als wesentliche Voraussetzung für die erwartete Wirkung von Eckpunkt 23 (Emissionsminderung von F-Gasen um ca. 8 Mio. t $CO_2$ Äq.) gilt neben der rechtlichen Festlegung einer maximalen Leckagerate von 2 % bei stationären Kälteanlagen die Durchsetzung

[8] Vgl. Abschn. 1. Stand der Technik; zuletzt im Rahmen des EU-„Life"-Projekts „Development and demonstration of a prototype transcritical $CO_2$ refrigeration system" (2005-2007), sh. European Commission 2005, Madsen 2007.

[9] Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat zum Mai 2007 im Rahmen des Förderprogramms „Klimaschutz Plus" ein Unterprogramm „Energieeffizienz in KMU. Betriebliche Prozesse und Querschnittstechniken" ins Leben gerufen, das einen Förderbereich „Prozesskühlung" enthält. Hier können Maßnahmen an Kältemaschinen und Kühlsystemen gefördert werden. Bei Nachweis einer relevanten Energieeinsparung ist eine Förderung von max. 15 Prozent der Investitionssumme möglich. Als Antragsteller kommen nur kleine und mittlere Unternehmen nach EU-Definition (max. 250 Beschäftigte, Jahresumsatz unter 50 Mio. Euro) in Betracht. Zuständig ist die KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH, Karlsruhe.

eines Anteils von 50 Prozent an natürlichen Kühlmitteln bis 2020 (Umweltbundesamt 2007).

## 4.1 Fördervorschlag für Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln entspr. Eckpunkt 23

Entsprechend den Zielen von Eckpunkt 23 werden im Folgenden Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln im TK- und NK-Bereich des LEH vorgeschlagen. Sie sollen als Beitrag zur Verbesserung der Treibhausgasbilanz der Bundesrepublik Deutschland

- die Verbreitung von Demonstrationsanlagen vorantreiben,
- den Übergang zur Marktdurchdringung mit entsprechenden Standardanlagen erleichtern,
- neben dem Einsatz von Neuanlagen (Erweiterungsbedarf) auch im Bereich des verschleißbedingten Anlagen-Ersatzes sowie des Ersatzes von R22-Anlagen die Verwendung natürlicher Kältemittel fördern,
- eine Steigerung der Energieeffizienz von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln anreizen und
- die weitere Qualifikation des kältetechnischen Handwerks im Umgang mit natürlichen Kältemitteln unterstützen.

Neben Fördermaßnahmen, die grundsätzlich die Verbreitung von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln fördern sollen, wird zusätzlich ein öffentlichkeitswirksamer Wettbewerb vorgeschlagen, der Anlagen mit natürlichen Kältemitteln und besonders niedrigem TEWI belohnt und der – sollte die Fördermaßnahmen nicht möglich sein – auch eigenständig durchgeführt werden kann (vgl. IV.2).

Zielgruppe: Die Zielgruppe des Fördervorschlags sind Einzelhändler, Anlagenbauer und das kältetechnische Handwerk. Antragsberechtigt sollen Unternehmen des Einzelhandels mit Sitz in Deutschland sein. Der Antrag auf die

Zuwendung wird vom Einzelhändler für ein spezielles Ladenlokal in Deutschland gestellt. Dabei kann es sich bei den zu fördernden Anlagen um Neuanlagen in neu errichteten oder Ersatzanlagen in bestehenden Märkten handeln, wobei die Betreiber von R22-Altanlagen, die in naher Zukunft umgestellt werden müssen, eine besondere Zielgruppe darstellen.

Förderinstrument: Nicht rückzahlbarer Zuschuss zu den Zusatzkosten für kältetechnische Anlagen im Lebensmitteleinzelhandel unter ausschließlicher Verwendung von natürlichen Kältemitteln (also Förderung von natürlichen Kältemitteln in TK und NK, nicht von Kaskaden-Anlagen mit $CO_2$/HFKW, wohl aber von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln + Kälteträgern), gestaffelt danach, ob es sich

- um eine Neuanlage in einem neuen oder bestehenden Markt oder
- den Ersatz einer R22-Altanlage handelt.

Zusätzlich soll die Förderung durch ein kostenreduziertes Fortbildungsprogramm für das Kältetechnische Handwerk für Planung, Bau, Betrieb und Wartung von kältetechnischen Anlagen flankiert werden. Im Rahmen des Förder-Projektes sollten auch Informationsbroschüren für das Handwerk und den Lebensmitteleinzelhandel sowie begleitende Artikel in der Fachpresse erstellt werden.

Zusatzkosten von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln: Die Förderung von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln ergibt sich aus dem klimapolitischen Zwang zur $CO_2$-Emissionsminderung sowie dem Umstand, dass $CO_2$-Kälteanlagen gegenüber traditionellen Kälteanlagen höhere Investitionskosten verlangen, da transkritische Anlagen sich gegenwärtig erst in der Markteinführung befinden und noch keine Standardanlagen darstellen. Auch zukünftig („in drei bis fünf Jahren“) rechnet der Anlagenbau hier noch mit etwa 20-25 Prozent höheren Anlagenkosten, wobei jedoch gleichzeitig eine Einsparung von Betriebskosten möglich ist (Tillner-Roth 2008).

Bei der Förderung und Förderhöhe soll nach Neuanlagen in einem neu errichteten oder bestehenden Markt einerseits und dem Ersatz von R22-Altanlagen in bestehenden Märkten andererseits unterschieden werden, um einen besonderen Anreiz für den direkten Umstieg von dem ozonschicht- und klimaschädlichen HFCKW-Kältemittel R22 auf natürliche Kältemittel zu geben. Daher wird beim Ersatz von R22-Altanlagen durch Neuanlagen auf Basis natürlicher Kältemittel unabhängig vom Anlagenalter ein potentieller Restwert der Altanlage (ca. 35 Prozent) berücksichtigt. Eine Abschätzung der Zusatzinvestitionskosten für $CO_2$-Anlagen gegenüber herkömmlicher Technologie nach Ladenformaten enthält Tab. 4 (höhere Kosten bei R22-Ersatzanlagen wegen der erwähnten Anrechnung des potentiellen Restwerts der Altanlagen).

**Tab. 4: Zusatzinvestitionskosten für $CO_2$-Anlagen (Neuanlagen und R22-Ersatzanlagen)**

| Ladenformart | Zusatzkosten für $CO_2$-Anlagen pro Markt bei | | $CO_2$-Einsparpotential in $CO_2$ Äq. p.a. |
|---|---|---|---|
| | Neuanlagen in neuen oder bestehenden Märkten | R22-Ersatzanlagen incl. Altanlagenrestwert | |
| Discounter | 10-40 K€ | 40-80 K€ | 5-10 t |
| Verbrauchermärkte | 40-180 K€ | 180-360 K€ | 50-100 t |
| SB-Warenhäuser | 120-500 K€ | 500-1.000 K€ | 500-700 t |

Die Zusatzkosten für Systeme auf Basis anderer natürlicher Kältemittel wie Ammoniak oder Kohlenwasserstoffe liegen in der Regel in einer ähnlichen Größenordnung und fallen im Einzelnen eher etwas niedriger aus als bei $CO_2$-Anlagen. Es ist daher anzunehmen, dass die generelle Förderung von natürlichen Kältemitteln auch Ammoniak- und KW-Systeme begünstigt und damit zu einer größeren Breite von natürlichen Kältemitteln im Anlagenbestand führen wird.

Förderhöhe, Bemessungsgrundlagen: Der Zuschuss soll einen Teil der geschätzten Zusatzkosten für Anlagen mit natürlichen Kältemitteln abdecken (i.d.R. 20-50 Prozent) und wird nach Quadratmetern Verkaufsfläche (Lebensmittel) im Jahr der Inbetriebnahme der Neuanlage bemessen. Es sind auch andere Bezugsgrößen denkbar (z. B. installierte Kälteleistung; laufende Meter Kühlmöbel). Bei der näheren Ausgestaltung der Förderbedingungen sollte

darauf geachtet werden, dass durch entsprechende Auflagen zu Mindestgröße und Beschaffenheit der Kälteanlagen ein Anreiz für energieeffiziente Lösungen gegeben und ein Missbrauch durch eine mögliche „Überförderung“ vermieden wird.

Die in Tab. 5 vorgeschlagenen Zuschüsse sind ihrer Höhe nach zeitlich degressiv gestaffelt (Halbierung im Förderzeitraum). Der flächenbezogene Grundbetrag für R22-Ersatzanlagen ist doppelt so hoch wie für sonstige Neuanlagen (Berücksichtigung des Altanlagenwertes und besonderer Anreiz für direkten Umstieg).

**Tab. 5: Bezuschussung von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln in Euro/qm Verkaufsfläche (Lebensmittel) im LEH nach Jahr der Inbetriebnahme**

| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|---|---|---|---|---|---|
| Neuanlagen in neuen und bestehenden Märkten | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 |
| R22-Ersatzanlagen | 30 | 26 | 22 | 18 | 14 |

Es wird darauf verzichtet, Vorgaben zum realen Energieverbrauch zu machen, da dies die Abwicklung des Förderprogramms zeitlich verzögert und bürokratisiert (endgültige Abrechnung des Zuschusses erst nach einem vollen Laufjahr usw.). Eine Differenzierung der Förderung nach Ladenformaten wird ebenfalls nicht empfohlen. Der Flächenbezug begünstigt etwas größere Märkte und Anlagen, was aus ökologischen Gründen sinnvoll ist (klimafreundliche Umstellung größerer Kältemittelvolumina).

Die Mittel sollten trotz der damit oft erreichten Dynamisierung nicht gemäß dem Windhundprinzip vergeben werden, bei dem die begrenzten Mittel in der Reihenfolge der Antragstellung ausgezahlt werden. Die Anträge sollten stattdessen nach Sinnhaftigkeit des Konzeptes unter Berücksichtigung der Energieeffizienz priorisiert und ausgewählt werden. Es sollte eine breite Ansprache vieler Einzelhändler erreicht werden und damit vermieden werden, dass die Fördermittel auf wenige, besonders entschlussfreudige Einzelhändler bzw. LEH-Ketten konzentriert werden.

Fördervolumen und Mittelverwendung: Bei Zugrundelegung eines Fördervolumens von 22,7 Mio € im Rahmen eines über viereinhalb Jahre laufenden Programms (7/2008-12/2012) könnte insgesamt ab 2009 jährlich die Neuerrichtung von 265 Anlagen mit natürlichen Kältemitteln gefördert werden (Neuanlagen: 150 Discounter und 50 Verbrauchermärkte/Warenhäuser; R22-Ersatzanlagen: 50 Discounter, 15 Verbrauchermärkte/Warenhäuser). Dies würde entsprechend den Schwellenabschätzungen für den Übergang zur Serienfertigung die Markteinführung von $CO_2$-Anlagen wesentlich erleichtern. Die Mittelverwendung könnte wie in Tab. 6 dargestellt auf die verschiedenen Programmpunkte aufgeteilt werden. Die Gesamtzahl der zu fördernden Anlagen hängt stark von der Dynamik in den beiden Sektoren „Neuanlagen“ und „R22-Ersatz“ ab.

**Tab. 6: Mittelverwendung Förderprogramm natürliche Kältemittel (Tsd. €)**

| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|---|---|---|---|---|---|
| Förderung Neuanlagen | 1200 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Förderung R22-Ersatz | 900 | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 |
| Schulung des KT Handwerks | 300 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Administration des Programms | 100 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Sachkosten und Unteraufträge | 200 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Gesamtkosten | 2700 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |

## 4.2 Vorschlag für einen Wettbewerb „Auszeichnung energieeffizienter Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln für den Supermarktbereich“

Die Dimension des vorgeschlagenen Förderprogramms ist geeignet, Bewegung in einen Markt zu bringen, dessen Dynamik gegenwärtig noch durch die bei den verschiedenen Akteuren (Komponentenhersteller, Anlagenbau, LEH) bestehenden Kostenschwellen gebremst wird. Daneben sind für weitere Klimaschutzmaßnahmen im Supermarktbereich

- die Erhöhung der Aufmerksamkeit für die Klimarelevanz von Kälteanlagen im LEH sowohl beim LEH selbst wie in der Fach- und allgemeinen Öffentlichkeit, und
- die Stärkung der öffentlichen Akzeptanz und „Nachfrage“ von klimafreundlichen Kälteanlagen sowie deren „Imageförderung“

von großer Bedeutung.

Zugleich ist zu berücksichtigen, dass natürliche Kältemittel ihre ökologischen Vorteile gegenüber den bestehenden Systemlösungen – kein Kältemittel-bedingtes GWP – nur dann voll ausspielen können, wenn sie auch energetisch mindestens ebenso effizient sind wie Kälteanlagen mit konventionellen Kältemitteln (vgl. Bovea et al. 2007). Ziel des Wettbewerbs („Deutschland sucht den klimafreundlichen Supermarkt“) ist es also, die Reduzierung des Energieverbrauchs von Supermarktkälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln öffentlich zu thematisieren und weiter voranzutreiben.

Wettbewerbskonzept: Erwogen werden sollte daher die Verbindung der o.a. Fördermaßnahmen (so sie bewilligt werden) mit einem öffentlichkeitswirksamen Wettbewerb, in dessen Rahmen *neue Kälteanlagen für den Supermarktbereich mit natürlichen Kältemitteln und einem niedrigen TEWI-Wer*t ausgezeichnet werden. Ein Wettbewerb kann ggfs. auch allein durchgeführt werden, dürfte aber

für sich genommen nicht die „Breitenwirkung“ eines Förderprogramms haben. Anders als bei der Förderung, für die auf ein Energieverbrauchsmonitoring verzichtet wird, setzt diese Auszeichnung eine genaue Messung und Dokumentation des Energieverbrauchs der Anlagen und damit ein entsprechendes Bemühen der Anlagenbetreiber um Energieeinsparung und -bilanzierung voraus. Zielgruppe des Wettbewerbs sind daher eher jene Akteure (Komponenten- und Anlagenbau, LEH), die zukunftsfähige Standards für einen niedrigen Energieverbrauch von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln setzen wollen und damit eine „Treiber-Funktion“ wahrnehmen können. Durch einen solchen Wettbewerb werden auch die vielfältigen sonstigen Energieeinsparmaßnahmen durch Optimierung von Anlagenkomponenten, Anlagenbetrieb und Kühlmöbeln gefördert, die zur Minderung des TEWI einer Anlage beitragen können. Der Wettbewerb sollte über den gleichen Zeitraum laufen wie die Förderung von Neuanlagen mit natürlichen Kältemitteln.

Zielgruppe: Lebensmitteleinzelhandel nach Ladenformaten (Discounter, Verbrauchermärkte, SB-Warenhäuser) in Deutschland. Wie bei der Förderung richtet sich die Auszeichnung auch hier zuerst an den Anlagenbetreiber, der letztlich für Anlagenauslegung und Energieeinsparmaßnahmen verantwortlich ist. Da Kälteanlagen ausgezeichnet werden sollen, können auch der Anlagen- und Komponentenbau berücksichtigt und bei der Auszeichnung benannt werden (Anlagentyp, technische Spezifizierung usw.), was für die Wirkung in der Fachöffentlichkeit von Belang ist. Die Unterteilung nach Ladenformaten ist wegen der jeweils unterschiedlichen technischen Bedingungen und Auslegungen (größenbedingt) angezeigt und ermöglicht es auch, eine breitere Palette von LEH und Anlagenbau zu berücksichtigen.

Kriterien: Natürliche Kältemittel, möglichst niedriger TEWI, Neuanlagen (nicht älter als drei Jahre)

- Der Anlagenbetrieb erfolgt nur mit natürlichen Kältemitteln (Kohlenwasserstoffe, $NH_3$, $CO_2$) resp. Kälteträgern. Als „Anlage" gelten Verbundanlagen inkl. angeschlossene Kühlmöbel, nicht der gesamte Kühlgeräte- und -möbelbestand eines Marktes (also etwa Verbundanlage inkl. Standalone-Geräte).

- Ausgezeichnet werden Anlagen mit einem möglichst niedrigen TEWI-Wert pro laufendem Meter Kühlmöbel und Jahr, da neben dem Einsatz von natürlichen Kältemitteln die Energieverbrauchsminderung belohnt werden soll. Als Obergrenze für den TEWI-Wert gelten bei Discountern 2.800 kg $CO_2/a*m$, bei Verbrauchermärkten und SB-Warenhäusern 2.000 kg $CO_2/a*m$ (vgl. Teil 2 dieses Berichtes). Als Berechnungsfaktor für die indirekten, energieverbrauchsbedingten Emissionen werden 0,616 kg $CO_2$/kWh gemäß jüngster Berechnungen des Umweltbundesamtes angesetzt.

- Der Energieverbrauch der Anlage muss über einen gesamten Jahreszyklus tagesgenau gemessen und dokumentiert werden.

- Ziel des Wettbewerbs ist es, den Anteil an Neuanlagen mit größerer Energieeffizienz und vermindertem Treibhausgasausstoß zu erhöhen. Anlagen, die am Wettbewerb teilnehmen, sollten daher nicht älter als drei Jahre sein. Eine Anlage kann während der gesamten Wettbewerbsdauer nur einmal prämiert werden.

Auszeichnungsform: Die Prämierung im Rahmen des Wettbewerbs kann eine Kombination von öffentlichkeitswirksamer Symbolik als Hauptaspekt und (begrenztem) finanziellem Anreiz sein. Dafür sind eine Auszeichnung bzw. ein Qualitätssigel, die auch für PR- und Marketingzwecke eingesetzt werden können, und eine Anerkennungsprämie (5.000-10.000 Euro) denkbar. Die Anerkennungsprämie kann mit dem zusätzlichen Aufwand für die

Energieverbrauchsmessung und -dokumentation begründet werden. Ob es sich bei der Auszeichnung etwa um einen „Umweltengel“ oder um eine zitierfähige Urkunde („Auszeichnung im Rahmen des Wettbewerbs ...“) handelt, wäre bei der näheren Ausarbeitung der Wettbewerbskonzeption zu klären.

Wettbewerbskosten: Eine überschlägige Kalkulation nach Arbeitsaufwand, Material- und Jury- sowie Veranstaltungskosten für die drei Phasen Vorbereitung/Wettbewerb/Bewertung und Präsentation kommt auf Nettokosten von ca. 17.000 Euro im ersten Jahr: In den Folgejahren wären die Kosten wegen eines geringeren Aufwands in der Vorbereitungsphase niedriger (ca. 10.000 Euro). Die Auszeichnungskosten würden sich je nach Höhe der Anerkennungsprämie (5.000-10.000 Euro) und der Zahl der auszuzeichnenden Anlagen (nach o.a. Vorschlag 3 x 3/Jahr) auf ca. 45-90 T Euro belaufen. Bei 5 Jahren Laufzeit betragen die Kosten netto ca. 510.000 Euro, was etwa 2,2 % der Gesamtsumme von Förderaufwand (Tab. 6) und Wettbewerbskosten (Tab. 7) entspräche.

**Tab. 7: Kosten Wettbewerb „Energieeffiziente Supermärkte mit natürlichen Kältemitteln“**

| | Prämienhöhe 5.000 € | Prämienhöhe 10.000 € |
|---|---|---|
| Prämien für 9 Anlagen/a über 5 Jahre | 225.000 € | 450.000 € |
| Ausrichtungskosten | 57.000 € | 57.000 € |
| Gesamtkosten Wettbewerb | 282.000 € | 507.000 € |

Wettbewerbsauswertung: Die im Rahmen des Wettbewerbs zusammengetragenen Energieverbrauchsdaten und TEWI-Werte der ausgezeichneten Anlagen sollten für die Fachöffentlichkeit zusammen mit den sonstigen relevanten Anlagendaten ausgewertet und publiziert werden, um damit „Standards“ zu setzen.

Weitere zu klärende Aspekte: Träger des Wettbewerbs (Partner aus dem LEH usw.), Antragsverfahren und entspr. Unterlagen, Fachjury, detaillierte Zielfestlegung hinsichtlich Teilnahmequoten, Öffentlichkeits- und

Fachöffentlichkeitsbeteiligung, Kommunikationsformen (Presse, Fachzeitschriften, Internet usw.), Einhaltung der Bewertungskriterien u.ä., rechtliche Aspekte, Auftragnehmer für Abwicklungsmodalitäten und -organisation usw.

# 5. Literatur

## zu 1. Stand der Technik und 2. Hemmnisse


[Bachmann 2004] Stephan Bachmann, Elektronische Expansionsventile, in: Kälte Klima Aktuell 3/2004, S. 64-66

[Bitzer 2006a] Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Kältemittel-Report, 14. A., Sindelfingen o.J. [2006]

[Bitzer 2006b] Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen, Halbhermetische Hubkolbenverdichter für $CO_2$. Octagon®-Serie. KP-120-2, Sindelfingen 2006

[Bitzer 2007] Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen, Fachgespräch mit Albrecht Höpfer, 11.6.2007

[Bock 2007] Bock Kältemaschinen GmbH, Frickenhausen, Berthold Schnase, pers. Mitt. v. 31.5.2007; $CO_2$ auf einen blick – bis 40 bar unterkritisch; $CO_2$ auf einen blick – bis 130 bar Transkritisch

[Bock/Knudsen Koling Development 2007 Bock Kältemaschinen GmbH, Frickenhausen, $CO_2$ – Where we are today in Commercial Refrigeration, November 2007

[Bovea et al. 2007] Maria D. Bovea et al., Comparative Life Cycle Assessment of Commonly used Refrigerants in Commercial Refrigeration Systems, in: Int. J. LCA 5/2007, S. 299-307

[Brouwers 2007] Christian Brouwers, Carrier CR EMEA Food Retail Distribution Linde Kältetechnik GmbH, Trends in der Gewerbekälte in der EU, Vortrag $CO_2$OI-Food 23.5.2007, Berlin

[Danfoss 2007a] Danfoss A/S, Jens Christian Callesen, Business Development Manager $CO_2$ Applications Danfoss Food Retail, Designing $CO_2$-Systems. Danfoss

Systemlösungen für $CO_2$ basierte Kälteanlagen, EHI-Conference Köln, 24. April 2007

[Danfoss 2007b] Danfoss A/S, Jens Christian Callesen, Business Development Manager $CO_2$ Applications Danfoss Food Retail, Fachgespräch, Offenbach 29.5.2007

[DKV-Verbundvorhaben] DKV-Verbundvorhaben. Minderung von FCKW-Emissionen in der Kälte- und Klimatechnik, Statusseminare 1-7, 1990-1993

[DOE/AFEAS 1997] TEWI-III Report: Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies: TEWI-Phase III, Oak Ridge National Laboratories

[Epta 2007] Epta Deutschland GmbH, Mannheim, Fachgespräch mit Udo Görner, 27.3.2007

[European Commission 2005]
European Commission, Life-Environment projects 2005, Luxembourg 2005

[Gebhardt et al. 2003] Dirk Gebhardt, Horst Kruse, Pierluigi Schiesaro, Entwicklung einer transkritischen zweistufigen Supermarktkälteanlage für Tief- und Normalkühlung, in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 3/2003, S. 34-43 und 10/2003, S. 54-65

[Gerstel 2007] Joachim Gerstel, DuPont, Umstellung von R22 im Supermarktbestand, Vortrag DKV Tagung, 22. Nov. 2007

[Große-Kracht 2005] Rainer Große-Kracht, Moderne Hubkolben-Verdichter für den Einsatz von Hochdruckkältemitteln (wie R410A, $CO_2$). Anforderungen an Konstruktion und Schmiersystem, in: KI Luft- und Kältetechnik 5/2005, S. 167-171

[Haaf 1998] Siegfried Haaf, Ammoniak-Kälteanlagen für Supermärkte. Ein Beitrag zur TEWI-Reduzierung, in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 8/1998, S. 520-533

[Haaf/Heinbokel 2002] Siegfried Haaf, Bernd Heinbokel, Supermarktkälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln, in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 9/2002, S. 32-39

[Haaf/Heinbokel 2003] Siegfried Haaf, Bernd Heinbokel, Kälteanlagen für Supermärkte mit alternativen Kältemitteln, in: KI Luft- und Kältetechnik 11/2003, S. 508-512

[Haaf et al. 2005] Siegfried Haaf, Bernd Heinbokel, Andreas Gernemann, Erste $CO_2$-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung in einem Schweizer Hypermarkt, in : DIE KÄLTE & Klimatechnik 2/2005, S. 41-46

[Heinbokel 2001] Bernd Heinbokel, $CO_2$ als Kälteträger und Kältemittel in der Supermarkt-Tiefkühlung, in: KI Luft- und Kältetechnik 10/2001, S. 484-488

[Honeywell/DuPont 2007] HFO-1234yf. A Low GWP Refrigerant For MAC. Honeywell/DuPont Joint Collaboration. 2nd International Workshop on Mobile Air Conditioning and Auxiliary Systems, Torino/Italy Nov. 29, 2007

[Kauffeld/Christensen 2001] Michael Kauffeld, Kim Gardö Christensen, $CO_2$ und Propan im Supermarkt, in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 1/2001, S. 30-33

[KK 1/2008] Viele kleine Neuerungen sind auch ein großer Fortschritt. Ausgewählte Fachvorträge von der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 2007, in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 1/2008, S. 38-43

[Kröger 2007] J. Kröger, Fortschritte in der Kältetechnik – geringer Energieverbrauch ist gefragt, in: Kälte Klima Aktuell H. 1/2007, S. 70

[Kruse 2000] Horst Kruse, Refrigerant Use in Europe. in: ASHRAE Journal, September 2000, S. 16-24

[Kruse 2006a] Horst Kruse, Commercial Refrigeration – on the Way to Sustainability, in: IIR-Bulletin 1/2006

[Kruse 2006b] Horst Kruse, Supermarktkälte auf dem Weg zur Nachhaltigkeit, DKV-Vortrag 2006

[Linde 2007a] Fachgespräch mit Christian Brouwers und Bernd Heinbokel, Carrier CR EMEA Food Retail Distribution Linde Kältetechnik GmbH, Köln, 19.3.2007

[LZ-Report 2007/2008] Lebensmittelzeitung (Hrg.), LZ-Report. Markt- und Strukturzahlen der Nahrungs- und Genussmittelbranche, Frankfurt/M. [Verl.-Gruppe Dt. Fachverlag], 2007

[Madsen 2007] Kenneth B. Madsen, Danish Technological Institute, An International view of progress in $CO_2$ cooling, RAC Conference, London 2007

[Reichelt 2007] Johannes Reichelt, Wie heißt das künftige Kältemittel für die Pkw-Klimatisierung?, in: KI Kälte-Luft-Klimatechnik H. 4/2007, S. 3

[Renz 2003] Hermann Renz, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Anwendung von alternativen Kältemitteln aus Sicht eines Verdichterherstellers – Besonderheiten, Anforderungen, Vortrag KK-Fachtagung, Bingen 2003

[Renz 2007] Hermann Renz, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Challenges for Extended Application of Natural Refrigerants in Supermarkets, Vortrag $CO_2$OI-Food 23.5.2007, Berlin

[Tillner-Roth 2008] Reiner Tillner-Roth, Zukunftsweisende Kältemittel – Lösungen für den LEH, in: Kälte Klima Aktuell 1/2008, S. 26 – 28

[Umweltbundesamt 2007] Umweltbundesamt, Wirkung der Meseberger Beschlüsse vom 23. August 2007 auf die Treibhausgasemission in Deutschland im Jahr 2020, Oktober 2007

## Zu 3. Stand der Kühlmöbelabdeckung


[ECN 2006] Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), F.A.T.M. Ligthart, Onderzoek haalbaarheid dagafdekking koel- en vrieskasten in supermarkten, ECN-C-06-048

[AGM 2004] AGM Klagenfurt, Testreihe Glastüren für Wandkühlregale Remis, Klagenfurt 2004

[EHI 2007] EHI Retail Institute, Köln, pers. Mitt. Kempke/Cyganeck

[LZ-Report] 2007/2008: Lebensmittelzeitung (Hrg.), LZ-Report. Markt- und Strukturzahlen der Nahrungs- und Genussmittelbranche, Frankfurt/M. [Verl.-Gruppe Dt. Fachverlag], 2007

[Pan-Dur 2007] Pan-Dur, Osterburken, A. Weiß, Besondere qualitative Vorteile der Glasabdeckung Ecolux-Plus von Pan-Dur, 2007

[Raad van State 2007] uitspraaken vom 12. September 2007 zaaknummer 200607377/ (Amsterdam) und zaaknummer 200608606/1 (IJmond) unter www.raadvanstate.nl

[Remis 2007] REMIS GmbH, Köln, Fachgespräche mit P. Isfort und S. Swiderski März und Juni 2007; Test report PLUS Rechtuijt, Schoonhoven, 2003; Testbericht HIZ 32, Köln, 2004; Testbericht Edeka aktiv-Markt Trabold, Eisingen, 1998

[Van Beek 2003] Van Beek Ingenieurs, R. Roessink, Energiebesparing buiten verbouwing om. Maatregelen voor supermarkten, Arnhem 2003

[Van Beek 2004] Van Beek Ingenieurs, R. Roessink, Afdekking van koel- en vriesmeubelen, Arnhem 2004

# „VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER KLIMARELEVANZ VON KÄLTEANLAGEN UND -GERÄTEN FÜR DEN SUPERMARKT“ (FKZ 206 44 300)

## ANNEX 1 - Technologiedatenblätter

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

# Inhalt


| | | |
|---|---|---|
| 1. Einleitung | | 290 |
| 2. A | Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel | 300 |
| 2.1 A1: | Flaschenkühler mit HFKW R134a | 301 |
| 2.2 A2: | Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen (R600a und R290) | 306 |
| 2.3 A3: | Flaschenkühler mit Kohlendioxid (R744) | 314 |
| 2.4 A4: | Tiefkühltruhen mit HFKW (R134a, R404A) | 320 |
| 2.5 A5: | Tiefkühltruhen mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290) | 326 |
| 2.6 A6: | Tiefkühltruhen mit Kohlendioxid (R744) | 334 |
| 2.7 A7: | Kühltruhen | 339 |
| 2.8 A8: | Kühltheken mit HFKW (R134a, R404A) | 340 |
| 2.9 A9: | Kühlregale mit HFKW (R404A) | 346 |
| 2.10 A10: | Kühlregale mit Kohlendioxid (R744) | 352 |
| 2.11 A11: | Stopferaggregate | 357 |
| 3. B | Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz | 362 |
| B1: | Verflüssigungssätze | 362 |
| 4. C | Zentrale Verbundanlagen | 366 |
| 4.1 C1: | HFKW Direktverdampfung | 368 |
| 4.2 C2: | HFKW indirekt | 375 |
| 4.3 C3: | HFKW indirekt flüssig + verdampfend | 383 |
| 4.4 C4: | HFKW indirekt Eisbrei | 389 |
| 4.5 C5: | HFKW/R744-Kaskade | 397 |
| 4.6 C6: | HFKW indirekt/R744-Kaskade | 404 |
| 4.7 C7: | HFKW/R744-Kaskade – NK $CO_2$ | 410 |
| 4.8 C8: | Indirekte Ammoniakkälteanlage | 417 |
| 4.9 C9: | R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem Kälteträger | 426 |
| 4.10 C10: | R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 –Kälteverteilung für NK mit verdampfendem Kohlendioxid | 432 |
| 4.11 C11: | Kohlenwasserstoff indirekt | 439 |
| 4.12 C12: | Kohlenwasserstoff / R744 Kaskade | 444 |

4.13 C13: R744 Direktverdampfung 452
4.14 C14: R744 Direktverdampfung in Kaskade zu (H-F-)KW 468
4.15 C15: Distributed Systems 474
4.16 C16: Conveni-Pack – Kombinierte Kälteversorgung, Klimatisierung und Beheizung von kleinen bis mittelgroßen Ladenformaten 481

# 1. Einleitung

Im Rahmen der Studie wurden Daten für 28 verschiedene Geräte bzw. Anlagen recherchiert. Die Daten wurden dazu in 30 verschiedene Punkte unterteilt. Die Technologiedatenblätter enthalten die ausführlichen Daten zu den folgenden Modelltechnologien:

## A) Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel

Dezentrale steckerfertige Geräte gibt es als (in der Reihenfolge der Häufigkeit): Flaschenkühlschränke, Tiefkühltruhen, Kühltruhen, Kühltheken und Kühlregale. Die einzelnen Typen gibt es mit verschiedenen Kältemitteln, in der Regel mit HFKW, Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid. Die folgenden Modelltechnologien sind in Technologiedatenblättern beschrieben:

- A1 Flaschenkühler mit HFKW R134a
- A2 Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)
- A3 Flaschenkühlerkühler mit Kohlendioxid (R744)
- A4 Tiefkühltruhen mit HFKW (R134a, R404A)
- A5 Tiefkühltruhen mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)
- A6 Tiefkühltruhen mit Kohlendioxid (R744)
- A7 Kühltruhen – gibt es nur als umschaltbare Tiefkühltruhe
- A8 Kühltheken mit HFKW (R134a, R404A)
- A9 Kühlregale mit HFKW (R134a, R404A)
- A10 Kühlregale mit Kohlendioxid (R744)
- A11 Stopferaggregate

Kühlinseln und Tiefkühlinseln gibt es nicht steckerfertig. Es werden aber insbesondere bei einigen Discountern einzelne steckerfertige Geräte (siehe z. B. A4, A5 und A6) zu Inseln zusammengestellt. Es bleiben jedoch einzelne Geräte mit jeweils einzelner Kälteanlage.

## B) Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz

Ein Verflüssigungssatz besteht aus den Hauptbestandteilen Verdichter, Verflüssiger sowie Zubehör wie z. B. Sicherheitsdruckwächter, Ölabscheider, Filter/Trockner, Sammler etc.. Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz, wie sie früher in kleinen Lebensmittelgeschäften (sogenannte „Tante Emma Läden“) eingesetzt wurden, finden sich heute nur noch in Bäckereien, Fleischereien oder vereinzelt in Tankstellen. Die Größe heutiger Supermärkte erfordert in der Regel Kälteleistungen deutlich über 20 kW und damit die Parallelschaltung von mehreren Verdichtern [ASHRAE2002]. Systeme mit mehreren parallelgeschalteten Verdichtern werden als Verbundanlagen bezeichnet und im Abschnitt C behandelt.

Bei Erweiterungen bestehender Supermärkte bzw. der Aufstockung des Kühlwarensortiments kommen auch in Supermärkten z. T. Verflüssigungssätze für die zusätzlich installierten Kühlmöbel zum Einsatz, sofern die Verbundanlage bereits an ihrer Kapazitätsgrenze ist. Häufig ließe sich jedoch auch der Kältebedarf der bestehenden TK-Truhen durch Abdeckelung senken und dadurch die erforderliche zusätzliche Kälteleistung bereitstellen [Pries2008].

An Verflüssigungssätze können alle in einem Lebensmitteleinzelhandel eingesetzten Kühlmöbel, Kühltheken, Kühlregale, Kühlinseln, Tiefkühlinseln, Kühlräume und Tiefkühlräume angeschlossen werden. Die im Abschnitt A gewählte Untergliederung entsprechend dieser Verbraucher ist bei Verflüssigungssätzen wenig sinnvoll, da alle Verbraucher vom gleichen Verflüssigungssatz versorgt werden können.

## C) Zentrale Verbundanlagen

Zentrale Verbundanlagen finden sich heute in nahezu allen Supermärkten. In großen Verbrauchermärkten und Hypermärkten werden ausschließlich Verbundanlagen eingesetzt. Sie finden sich jedoch auch bei Discountern für den NK-Bereich. Kennzeichnend für diese Kälteanlagen ist die Parallelschaltung von

mehreren Verdichtern zu einem Verbund. Die Verdichter arbeiten mit einem gemeinsamen Verflüssiger der die verschiedenen Verbraucher mit Kältemittel versorgt. Verbraucher sind Kühltheken, Kühlregale, Kühlinseln, Tiefkühlinseln, Kühlräume und Tiefkühlräume. Die im Abschnitt A gewählte Untergliederung entsprechend dieser Verbraucher ist bei Verbundanlagen wenig sinnvoll, da alle Verbraucher vom gleichen Verdichterverbund versorgt werden. Die installierten Kälteleistungen liegen im Bereich von 1200 bis 1800 W pro laufenden Meter Kühlregal [Schneider2007].

Die verschiedenen am Markt verwendeten zentralen Kälteanlagen unterscheiden sich in der Wahl des/der Kältemittel(s) und auch in der Art der Kältemittelverteilung sowie bei manchen Anlagen durch die Kühlung des Verflüssigers.

In bisher ausgeführten Anlagen kommen die folgenden Kältemittel zum Einsatz: R404A, R410A, R507A, R290, R1270, R717 und R744. Diese Kältemittel haben alle einige unerwünschte Eigenschaften. So haben R404A, R410A und R507A ein hohes Treibhauspotential, R290 und R1270 sind brennbar, R717 ist giftig und entflammbar und R744 hat deutlich höhere Drücke und wirkt in Konzentrationen über 10 % letal. Um die Mengen des Kältemittels zu reduzieren und/oder im Falle der Brennbarkeit sowie Toxizität vom Konsumenten fern zu halten, werden deswegen häufig Anlagen mit einem Kälteverteilsystem mit einem Sekundärfluid (Kälteträger) gebaut. Das sekundäre Fluid mit dem die Kälte im Supermarkt verteilt wird, kann einphasig flüssig, oder mit Phasenwechsel ausgeführt werden. Gebräuchliche flüssige Kälteträger sind Propylenglykol und bestimmte Formiate sowie andere synthetische Stoffe. Im Gegensatz zum direktverdampfenden Kältemittel findet bei einem solchen Kälteträger kein Phasenwechsel statt. Die Kühllast wird einzig über sensible Wärme abgeführt und es sind deshalb vergleichsweise große Massenströme des Kälteträgers erforderlich. Um die zu pumpenden Mengen klein zu halten werden in manchen Anlagen Kälteträger mit Phasenwechsel verwendet. Dabei unterscheidet man Fluide mit Phasenwechsel flüssig/gasförmig, z. B. Kohlendioxid und solche mit Phasenwechsel fest/flüssig, z. B. Eisbrei.

Diese verschiedenen Technologien lassen sich auf vielfältige Weise mit einander kombinieren. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten. Die konventionelle R404A-Supermarkt-Verbundkälteanlage wäre demnach a1+b1+c1+d1+e1, siehe durchgezogene rote Linie in Tabelle 2. Eine Anlage mit R1290 und Kälteverteilung über einphasigen, flüssigen Kälteträger würde aus den Teilen a1+b2+c2+d2+e2 bestehen, siehe gestrichelte blaue Linie in Tabelle 2. Nicht alle Kombinationen sind wegen (sicherheits-) technischer Gründe sinnvoll bzw. akzeptabel. So ist Ammoniak auf Grund seiner hohen Toxizität für den Kundenbereich ausgeschlossen und wird daher niemals in Direktverdampfungssystemen im Verkaufsraum eines Supermarktes eingesetzt werden.

**Tabelle 1:** Verschiedene Technologien in zentralen Verbundanlagen.

| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| **a** | **Verflüssiger** | luftgekühlt (Außenluft) | Wassergekühlt, Wasserkühlung in Kühler auf dem Dach | wassergekühlt, Brauch- oder Heizwasser (WRG) | luftgekühlt (WRG) |
| **b** | **Kältemittel NK** | R404A / R507AA / R134a | KW (R290 oder R1270) | R717 [1)] | R744 |
| **c** | **Kälteverteilung NK** | Direkt-verdampfung | Kälteträger einphasig, flüssig | Kälteträger zweiphasig, verdampfend | Kälteträger zweiphasig, schmelzend |
| **d** | **Kältemittel TK** | R404A / R507AA | KW (R290 oder R1270) | R717 [1)] | R744 |
| **e** | **Kälte-verteilung TK** | Direkt-verdampfung | Kälteträger einphasig, flüssig | Kälteträger zweiphasig, verdampfend | Kälteträger zweiphasig, schmelzend |

[1)] eine unter dem Handelsnamen „R723“ vermarktete azeotrope Mischung aus Ammoniak und Dimethylether der Firma Schick hat ähnliche Eigenschaften in Bezug auf Toxizität und würde im Supermarktbereich zu ähnlichen Anlagen führen. Die Verdichtungsendtemperaturen wären jedoch um ca. 20 K reduziert sowie die Öllöslichkeit mit Mineralölen verbessert und Wärmeübergangskoeffizienten deshalb erhöht [Krauss2007]. Bisher sind jedoch keine Anwendungen im Supermarkt bekannt.

**Tabelle 2:** Beispiel der Anwendung von Tabelle 1. Die durchgezogenen rote Linie markiert eine konventionelle R404A Supermarkt Verbundkälteanlage, die gestrichelte blaue Linie eine Anlage mit R1290 und Kälteverteilung über einphasigen, flüssigen Kälteträger.

| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| **a** | **Verflüssiger** | luftgekühlt Außenluft | wassergekühlt, Wasserkühlung in Kühler auf dem Dach | wassergekühlt, Brauch- oder Heizwasser (WRG) | luftgekühlt (WRG) |
| **b** | **Kältemittel NK** | R404A / R507A /R134a | KW (R290 oder R1270) | R717 | R744 |
| **c** | **Kälteverteilung NK** | Direkt-verdampfung | Kälteträger einphasig, flüssig | Kälteträger zweiphasig, verdampfend | Kälteträger zweiphasig, schmelzend |
| **d** | **Kältemittel TK** | R404A / R507A | KW (R290 oder R1270) | R717 | R744 |
| **e** | **Kälte-verteilung TK** | Direkt-verdampfung | Kälteträger einphasig, flüssig | Kälteträger zweiphasig, verdampfend | Kälteträger zweiphasig, schmelzend |

In der Praxis bisher realisierte Verbundanlagen verwenden folgende Technologien[37]:

C1 HFKW Direktverdampfung: R404A-Supermarkt-Verbundkälteanlage[38] mit Direktverdampfung a1+b1+c1+d1+e1; Varianten verwenden Wärmerückgewinnung, d. h. a3 oder a4 anstatt a1. Neben R404A kommen auch R507A (selten) und für den NK-Bereich R134a zum Einsatz.

[37] Von einzelnen Varianten gibt es nur eine bzw. wenige dokumentierte Prototypenanlagen; diese werden in den entsprechenden Technologiedatenblättern entsprechend aufgeführt.
[38] Mit R404A als Kältemittel stellt diese Variante derzeit den Industriestandard für Supermarkt-Verbundkälteanlagen dar.

C2 HFKW Indirekt: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig a1+b1+c2+d1+e2; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1

C3 HFKW Indirekt Sole/$CO_2$: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung und verdampfend für Tiefkühlung a1+b1+c2+d1+e3; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder b3 anstelle von a1

C4 HFKW Eisbrei: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger Eisbrei für Normalkühlung und Direktverdampfung für die Tiefkühlung a1+b1+c4+d1+e1; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1

C5 HFKW/R744 Kaskade: R404A Direktverdampfung für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung a1+b1+c1+d4+e1

C6 HFKW/R744 Kaskade: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung a1+b1+c2+d4+e1; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1

C7 HFKW/R744 Kaskade – NK indirekt mit $CO_2$: R404A Kompaktanlage mit verdampfendem Kälteträger ($CO_2$) für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung a1+b1+c3+d4+e1; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1

C8 R717 indirekt: Ammoniak (R717) mit flüssigem Kälteträger a1+b3+c2+d3+e2, Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger a2 anstatt a1 und/oder verdampfenden Kälteträger e3

C9 R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem Kälteträger a1+b3+c2+d4+e1

C10 R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit verdampfendem Kohlendioxid a1+b3+c3+d4+e1

C11 KW indirekt: Kohlenwasserstoff mit flüssigem Kälteträger (a1+b2+c2+d2+e2), Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger a2 anstatt a1 und/oder verdampfenden Kälteträger e3

C12 KW/R744 Kaskade: Kohlenwasserstoff in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem oder verdampfendem Kälteträger (a1+b2+c2+d4+e1 bzw. a1+b2+c3+d4+e1)

C13 R744 Direktverdampfung: Kohlendioxid im gesamten Markt; anstelle einer Kältemittelverflüssigung findet hier- je nach Außentemperatur - im Sommer keine Verflüssigung sondern nur eine Gaskühlung statt. Die Drücke derartiger Kälteanlagen liegen bei derartigem Betrieb in der Regel über 100 bar auf der Hochdruckseite (a1+b4+c1+d4+e1), Häufig in Kombination mit Wärmerückgewinnung, d. h. a3 anstelle von a1

C14 R744 Direktverdampfung in Kaskade zu HFKW- bzw. KW. Kohlendioxid im ganzen Markt; Betrieb von NK und TK unterkritisch mit Verflüssigung an einer kompakten HFKW- bzw. KW-Anlage (a1+b1/b4+c1+d4+e1 bzw. a1+b2/b4+c1+d4+e1).

C15 Distributed Systems („Hussmann Protocol“, 1993 von der Fa. Hussmann vorgestellt) sind kompakte Verdichterverbünde mit Wassergekühlten Verflüssigern. Die Verdichterverbünde befinden sich in schallgedämmten Gehäusen, die im Supermarkt platziert werden können. Als Kältemittel wird von der Fa. Hussmann immer R404A eingesetzt.

C16 Conveni-Pack – Kombinierte Kälteversorgung, Klimatisierung und Beheizung von kleinen bis mittelgroßen Ladenformaten (a1/a4+b1+c1+d1+e1)

Andere Kombinationen sind denkbar und könnten in Zukunft realisiert werden.

Für jede Modelltechnologie, A1 bis A11, B1 und C1 bis C16, wurden, sofern verfügbar, die folgenden dreißig Angaben ermittelt und in Form der hier vorliegenden Technologiedatenblättern dokumentiert:

**Kältedaten**

1. Einsatzzweck
2. Kälteleistungsbereich
3. Art der Kälteübertragung
4. Kältemittelart
5. Kältemittelfüllmenge

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten
7. Quelle der Kältemittelverlust-Information
8. Art der Ableitung
9. Verbleib des Kältemittels nach Außerdienststellung

**Energie**

10. Energieverbrauch
11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung
12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung
13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

**Lebenszykluskosten**

14. Investitions- / Komponentenkosten
15. Installationskosten
16. Betriebskosten
17. Wartungsintervalle
18. Wartungskosten

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen
20. Regionale Verbreitung

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre mit Betriebserfahrung, sofern keine konkreten Daten vorliegen
22. Angaben zur Zuverlässigkeit
23. evtl. besondere Probleme
24. Beschreibung besonderer Eigenschaften
25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes
26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

**Bezugsquellen**

27. Hersteller
28. evtl. Importeur
29. Komponentenhersteller
30. Betreiber

**Literatur Einleitung**

[ASHRAE2002] ASHRAE Handbook 2002: Refrigeration, Chapter 47 Retail Food Store Refrigeration and Equipment. ASHRAE 2002, S. 47.1 – 47.19

[Krauss2007] Krauss, D.: Use of ammonia/dimethyl ether (Schick R723®) blend in medium refrigeration plants. IIR Ammonia Refrigeration Technology for Today and Tomorrow Conference, Ohrid, Macedonia, 19. – 21. April 2007

[Pries2008] Pries, A.: Energieeffizienz-Steigerung. Was ist in bestehenden Märkten wirtschaftlich sinnvoll? Vortrag auf der Vortragsveranstaltung Energieeffizienz im Lebensmittel-Einzelhandel. 19.02.2008, Haus der Wirtschaft Baden Württemberg, Stuttgart

# 2. A Dezentrale steckerfertige Kühlmöbel

## Inhalt des Abschnittes

A1 Flaschenkühler mit HFKW R134a
A2 Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)
A3 Flaschenkühler mit Kohlendioxid (R744)
A4 Tiefkühltruhen mit HFKW (R134a, R404A)
A5 Tiefkühltruhen mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)
A6 Tiefkühltruhen mit Kohlendioxid (R744)
A7 Kühltruhen mit HFKW (R134a, R404A), Kohlenwasserstoffen (R600a, R290) und Kohlendioxid (R744)
A8 Kühltheken mit HFKW (R134a, R404A)
A9 Kühlregale mit HFKW (R134a, R404A)
A10 Kühlregale mit Kohlendioxid (R744)
A11 Stopferaggregate

Technologie-Datenblatt zu

## 2.1 **A1: Flaschenkühler mit HFKW R134a**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Getränkekühler mit Türen vorwiegend an Tankstellen und in einigen Supermärkten oder Verbrauchermärkten in der Nähe der Kassen. Typische Größe 400 Liter Nutzvolumen.

2. Kälteleistungsbereich

400 bis 500 W für eine Tür und bis zu 950 W bei zwei Türen [Herstellerangaben der verschiedenen Produzenten]

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R134a

5. Kältemittelfüllmenge

23,5 bis 72 g/100 Liter Bruttovolumen

95 g für einen 405 Liter Schrank mit Glastür [Mammut Katalogdaten[2]]
120 g für einen 400 Liter Schrank mit Volltür [Mammut Katalogdaten]
145 g für einen eintürigen Coca Cola Schrank bei EDEKA, Rülzheim mit 410 W laut Typenschild [Norcool]

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.
[2] Die Firma MAMMUT Kühlanlagen GmbH ist ein Fachbetrieb für Kälte- und Klimatechnik und bietet darüber hinaus eine große Anzahl von steckerfertigen Kühlgeräten verschiedener Hersteller an. Im Gegensatz zu den Webseiten der einzelnen Hersteller, finden sich bei der Fa. Mammut zahlreiche technische Angaben zu den verschiedenen steckerfertigen Geräten. Der einzelne Hersteller geht jedoch nicht immer explizit aus diesen Daten hervor, weshalb hier in diesen Fällen die Fa. Mammut als Quelle angegeben wird, obwohl sie nicht Hersteller dieser Geräte ist.

210 g für einen 292 Liter Schrank [Liebherr, Typenschild eines Coca Cola Flaschenkühlers mit Glastür]
225 g für einen eintürigen Coca Cola Schrank bei EDEKA Gebauer mit 500 W Leistungsangabe auf Typenschild [Frigoglass]
230 g für einen 370 Liter Schrank mit Glastür [Mammut Katalogdaten]
230 g für einen 475 Liter Schrank mit Glastür [Mammut Katalogdaten]
260 g für einen 760 Liter Schrank mit zwei Glastüren [Mammut Katalogdaten]
310 g für einen 1050 Liter Schrank mit zwei Glastüren [Mammut Katalogdaten]

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Wird entsorgt.

**Energie**

10. Energieverbrauch

1,1 bis 1,6 kWh/24 h je 100 Liter Bruttoinhalt für Schränke Glastür und Beleuchtung.
*(0,6 kWh/24 h je 100 Liter Bruttoinhalt für Schränke mit Volltür ohne Beleuchtung)*

5,8 kWh/24 h für einen 370 Liter Schrank mit Glastür und Beleuchtung [Katalogdaten Mammut]

4,6 kWh/24 h für einen 405 Liter Schrank mit Glastür [Katalogdaten Mammut]
6,3 kWh/24 h für einen 475 Liter Schrank mit Glastür [Katalogdaten Mammut]
11,5 kWh/24 für einen 760 Liter Schrank mit zwei Glastüren [Katalogdaten Mammut]
16,0 kWh/24 für einen 1050 Liter Schrank mit zwei Glastüren [Katalogdaten Mammut]
2,3 kWh/24 h für einen 400 Liter Schrank mit Volltür – ohne Beleuchtung [Katalogdaten Mammut]

Alle Liter-Angaben sind Bruttovolumina.

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die Flaschenkühler sind in der Regel mit Glastüren versehen weshalb die Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum keinen so großen Einfluss hat wie bei offenen Kühlregalen (A9 und A10) oder offenen Kühl- und Gefriertruhen (A4 bis A6).

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, bedarfsgeregelte, d. h. taupunktabhängige Kanten- bzw. Türheizung, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Austausch des Kapillarrohrs durch ein (thermostatisches) Expansionsventil, verbesserte Verdampfer, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Keine Angaben

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Referenztechnologie für Flaschenkühler.

15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

16. Betriebskosten

Referenztechnologie für Flaschenkühler.

17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

18. Wartungskosten

Keine Wartung erforderlich.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Mehrere 100.000.

20. Regionale Verbreitung

Gesamte EU.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Mit R134a ca. 15 Jahre; jedoch vorher bereits mit FCKW mit ähnlichen Eigenschaften mehrere Jahrzehnte.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Hohe Zuverlässigkeit da ausgereifte und über Jahre (Jahrzehnte) entwickelte und verfeinerte Technik.

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil (WRG), in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

Viele, u. a. AHT (AT), Caravell (DK), Fricon (P), Frigoglass (GR), Liebherr (D), Norcool (N), Vestfrost (DK)

28. evtl. Importeur

Mammut u. a.

29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Coca-Cola, Aral, BP, Esso, Jet, Shell, Texaco und andere Tankstellen.

**Quellen**

Herstellerkataloge und Webseiten der genannten Hersteller

Technologie-Datenblatt zu

## 2.2 **A2: Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen (R600a und R290)**

Bei Haushaltskühl- und -gefriergeräten hat sich in Nord- und Westeuropa der Einsatz von R600a durchgesetzt. Seit der Markteinführung derartiger Geräte Anfang der 1990er Jahre sind inzwischen weit über 150 Millionen solcher Geräte hergestellt worden. Gründe für die Beliebtheit von R600a in Haushaltskühlgeräten sind neben dem Umweltaspekt des niedrigen Treibhauspotentials auch die höhere energetische Effektivität von R600a gegenüber R134a und die niedrigeren Systemdrücke welche zu deutlich leiserem Betrieb führen. Die niedrige volumetrische Kälteleistung von R600a begrenzt jedoch den Einsatz dieses Kältemittels auf Haushaltskühl- und –gefriergeräte sowie kleine gewerbliche Kühlgeräte. Solange die Kältemittelfüllmengen unter 150 Gramm bleiben sind nach IEC 60335 (International Electrotechnical Commission) keine besonderen Anforderungen in Bezug auf den Aufstellort zu erfüllen. Der Gerätehersteller muss jedoch bestimmte Anforderungen in Bezug auf z. B. Oberflächentemperaturen und Gasdichtheit erfüllen.

Gewerbliche Flaschenkühler haben in Regel Kälteleistungen über 500 W, was den Einsatz von R600a in solchen Geräten begrenzt, da die Verdichter zu große Hubvolumina benötigen würden. Für große steckerfertige Geräte mit Kohlenwasserstoffen wird deshalb R290 eingesetzt.

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Getränkekühler mit Tür vorwiegend an Tankstellen und in einigen Supermärkten oder Verbrauchermärkten in der Nähe der Kassen. Typische Größe 400 Liter Nutzvolumen.

#### 2. Kälteleistungsbereich

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

300 bis 600 W

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

Überwiegend R600a oder bei größeren Geräten R290

5. Kältemittelfüllmenge

Zurzeit maximal 150 Gramm; in Zukunft evtl. 500 g sofern IEC 60335-2-89 entsprechend geändert wird.

Liebherr z. B. 329 Liter Flaschenkühler mit 50 Gramm R600a [Pedersen2006a].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der Kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

In der Regel Entsorgung über Entsorgungsbetrieb. Könnte aber auf Grund seiner geringen Umweltrelevanz in die Atmosphäre abgegeben werden. Zündquellen sollten dann jedoch nicht in der Nähe sein. Da dabei jedoch Öl mitgerissen werden kann, ist die Entsorgung vorzuziehen.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Kalorimetermessungen mit drei hermetischen Verdichtern annähernd gleicher Kälteleistung mit R134a, R290 und R600a im Vergleich unter gleichen Randbedingungen zeigen um 8 bzw. 5 % höhere Kälteleistungszahlen für R290 bzw. R600a im Vergleich zu R134a [Jürgensen2004].

Vergleichsmessungen mit einem 600 Liter Flaschenkühler in einer Klimakammer zeigten mit R290 15 % weniger Energieverbrauch und mit R600a 30 % weniger Energieverbrauch als mit R134a [Jürgensen2004].

Liebherr Hausgeräte gibt für seinen Flaschenkühler mit Glastür einen Energieverbrauch von 0,251 kWh/24 h bezogen auf 100 Liter Gerätevolumen an [ProCool2006].

Ein Feldversuch von 18 Flaschenkühlern gleicher Baugröße, von denen 9 mit R744, 5 mit R134a sowie 4 mit R600a betrieben wurden, ergab die in Bild A2.1 gezeigten Energieverbräuche. Es handelt sich ausschließlich um Geräte der Marke Vestfrost, die im Frühjahr und Sommer 2006 in verschiedenen dänischen Supermärkten betrieben wurden. Die Umgebungstemperaturen lagen zwischen 20 und 28 °C [Pedersen2006b]. Die Flaschenkühler mit R600a verbrauchen im Durchschnitt ca. 28 % weniger Energie als die vergleichbaren R134a-Flaschenkühler.

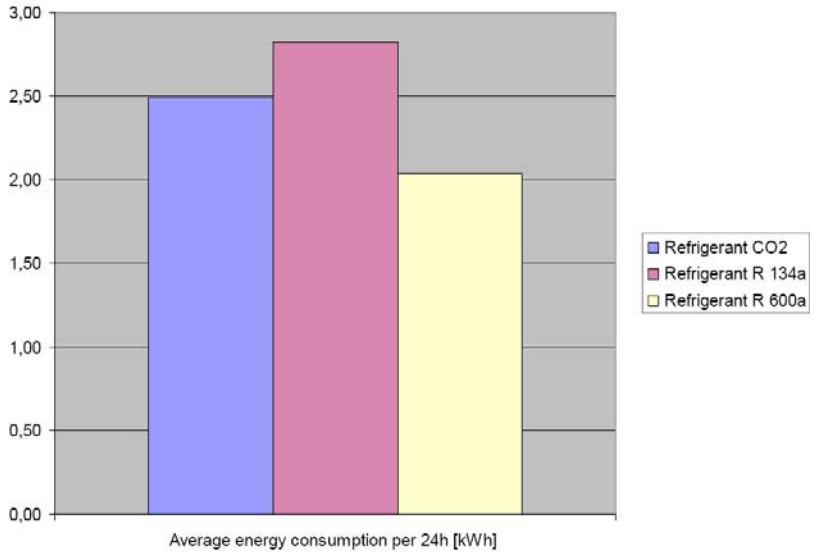



Bild A2.1: Energieverbrauch aller 18 im dänischen Feldversuch gemessenen Flaschenkühler [Pedersen2006b]. Die Geräte hatten ein Nettovolumen von 380 Liter sowie eine nominelle Kälteleistung von 570 W.

## 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

## 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die Flaschenkühler sind in der Regel mit Glastüren versehen, weshalb die Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum keinen so großen Einfluss hat wie bei offenen Kühlregalen (A9 und A10) oder offenen Kühl- und Gefriertruhen (A4 bis A6).

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, bedarfsgeregelte, d. h. taupunktabhängige Kanten- bzw. Türheizung, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Austausch des Kapillarrohrs durch ein (thermostatisches) Expansionsventil, verbesserte Verdampfer, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Kalorimetermessungen und Messungen in Klimakammern unter gleichen Bedingungen [Jürgensen 2004].

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Annähernd genauso teuer wie vergleichbare steckerfertige HFKW-Geräte [Pedersen2007]. Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

### 15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

### 16. Betriebskosten

Ca. 15 bis 30 % unter denen von vergleichbaren steckerfertigen Geräten mit HFKW, siehe auch unter Punkt „10. Energieverbrauch“. Durch Einsatz moderner drehzahlregelbarer Verdichter lassen sich bei steckerfertigen Geräten nochmals 10 bis 15 % Energie einsparen [Tiedemann2006].

### 17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

### 18. Wartungskosten

Keine Wartung erforderlich.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Über 1000 mit R600a und einige hundert mit R290.

### 20. Regionale Verbreitung

Bisher überwiegend in Skandinavien; Carlsberg hat 1000 Flaschenkühler mit R600a gekauft welche im Laufe des Jahres 2007 in ganz Skandinavien eingesetzt und getestet werden sollen [Wittrup2007].

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

In Haushaltskühlgeräten wird R600a bereits seit 1992 serienmäßig eingesetzt, in Flaschenkühlern seit ca. 2000.

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Hohe Zuverlässigkeit da ausgereifte und über Jahre (Jahrzehnte) entwickelte und verfeinerte Technik. Probleme mit der Lebensdauer von hermetischen R290-Verdichtern in frühen Wärmepumpenanwendungen sind inzwischen gelöst. Durch Einsatz geeigneter Öle ist die Lebensdauererwartung für hermetische R600a und R290-Verdichter sogar höher als die von R134a-Verdichtern [Jürgensen2004].

### 23. evtl. besondere Probleme

Solange die 150 g Füllgrenze laut IEC 60335 besteht, wird es keine großen steckerfertigen Flaschenkühler mit Propan geben. Für Hersteller von hermetischen Verdichtern gilt darüber hinaus die Druckgeräterichtlinie **97/23/EC**. Diese fordert ab einer gewissen Verdichtergröße (Druck-Volumen-Produkt größer als 50 bar Liter) besondere Kontrollen in der Fertigung. Es fertigt deshalb momentan kein Verdichterhersteller hermetische Verdichter für größere steckerfertige Geräte. Füllmengen ließen sich durch Einsatz von optimierten Wärmeüberträgern, z. B. Minichannel, auf unter 50 g/kW Kälteleistung reduzieren [Hoehne2004] und dadurch die Anwendungsgebiete von Kohlenwasserstoffen hin zu höheren Kälteleistungen erweitern.

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Solange die Kältemittelfüllmengen unter 150 Gramm bleiben sind nach IEC 60335 (International Electrotechnical Commission) keine besonderen Anforderungen in Bezug auf den Aufstellort zu erfüllen. Der Gerätehersteller muss jedoch bestimmte Anforderungen in Bezug auf z. B. Oberflächentemperaturen und Gasdichtheit erfüllen. Es wird daran gearbeitet, diese Füllgrenze für gewerbliche Tiefkühltruhen auf 500 g anzuheben, was nahezu alle steckerfertigen Gewerbekälteaggregate einschließen würde [Jürgensen2004].

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Liebherr (D), Vestfrost (DK)

### 28. evtl. Importeur

-

### 29. Komponentenhersteller

Expansionsventile: Danfoss
Verdichter: Danfoss

### 30. Betreiber

Carlsberg (DK)
Coca-Cola setzt keine brennbaren Kältemittel ein.

**Quellen**

[Hoehen2004] Hoehne, M.; Hrnjak, P.: Charge Minimization in Hydrocarbon System. IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids 2004, Glasgow, UK

[Jürgensen2004] Jürgensen, H., Nielsen, O.K., Tiedemann, T.: Application Related Design of Hermetic Propane Compressors for Small Refrigeration Systems. Proc. IIR Compressors Conference 2004, Castá Papiernicka, 29.9. – 1.10.2004

[Pedersen2006a] Pedersen, P.H.: Kommercielle køleskabe og frysere (Plug-in). HFC-fri Køling, 14. juni 2006 (rev. 4. august 2006)

[Pedersen2006b] Pedersen, P.H.; Walløe, H.; Madsen, K.: Slutrapport for projektet: Energibesparende flaskekøler med $CO_2$-kølemiddel. September 2006, Teknologisk Institut

[Pedersen2007] Pedersen, P.H.: Information bezüglich Investitionskosten vom 19.3.2007

[ProCool2006] Presseinformation in Verbindung mit dem ProCool Award 2006.

[Tiedemann2006] Tiedemann, T., Gespräch mit Thomas Tiedemann, Danfoss am 10.12.2006

[Wittrup2007] Wittrup; S.: Kolde øl med ren miljøsamvittighed. Ingeniøren, http://ing.dk/article/20070314/MILJO/103160021?top2 vom 14. März 2007

Technologie-Datenblatt zu

## 2.3 **A3: Flaschenkühler mit Kohlendioxid (R744)**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Getränkekühler mit Türen vorwiegend an Tankstellen und in einigen Supermärkten oder Verbrauchermärkten in der Nähe der Kassen. Typische Größe 400 Liter Nutzvolumen.

2. Kälteleistungsbereich

400 W bis 1000 W
Coca-Cola überwiegend mehr als 600 W [Pedersen2006].

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R744

5. Kältemittelfüllmenge

Bis 300 g

### Kältemittelverluste

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der Kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

### 8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

In der Regel Entsorgung über Entsorgungsbetrieb. Könnte aber auf Grund seiner geringen Umweltrelevanz in die Atmosphäre abgegeben werden. Da dabei jedoch Öl mitgerissen werden kann, ist die Entsorgung vorzuziehen.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Solange die Außenlufttemperatur unterhalb von 32 °C bleibt, ist der Energieverbrauch niedriger als der von vergleichbaren R134a Flaschenkühlern [Pedersen2006a]. Bei 24 °C Lufttemperatur ist der Energieverbrauch z. B. 9 % niedriger [Pedersen2006a]. Coca-Cola Feldversuche haben im Durchschnitt für alle untersuchten Flaschenkühler 4 % niedrigeren Energieverbrauch ergeben. Ein Feldversuch bei Carlsberg in dänischen Supermärkten (Umgebungstemperatur zwischen 20 und 28 °C) mit 380 Liter Nettovolumen Flaschenkühlern ergab einen um ca. 12 % niedrigeren Energieverbrauch mit R744 als mit R134a, siehe auch Bild A2.1 [Pedersen2006b]. In der gleichen Untersuchung wurde gezeigt, dass Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen einen noch niedrigeren Energieverbrauch haben, s. A2 insbesondere Bild A 2.1.

Andere Messungen zeigen bereits bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 25 °C einen höheren Energieverbrauch als mit R404A; gegenüber R134a sogar oberhalb von 18 °C [Cecchinato2007]. Allerdings geben sich die Autoren zuversichtlich, den Energieverbrauch des R744-Flaschenkühlers durch Weiterentwicklungen insbesondere bei den Wärmeüberträgern auf das Energieverbrauchsniveau eines R134a-Schrankes zu senken [Cecchinato2007].

Thermodynamisch gesehen ist ein Flaschenkühler mit R744 jedoch schlechter als einer mit HFKW oder KW als Kältemittel [Kruse2005]. Die genannten niedrigeren Energieverbräuche beruhen vermutlich auf Optimierungen einzelner Komponenten bzw. des gesamten Systems [Kruse2005].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die Flaschenkühler sind in der Regel mit Glastüren versehen, weshalb die Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum keinen so großen Einfluss hat wie bei offenen Kühlregalen (A9 und A10) oder offenen Kühl- und Gefriertruhen (A4 bis A6).

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, bedarfsgeregelte, d. h. taupunktabhängige Kanten- bzw. Türheizung, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Austausch des Kapillarrohrs durch ein (thermostatisches) Expansionsventil, verbesserte Verdampfer, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers – dies hat insbesondere an Aufstellorten mit hoher Lufttemperatur einen großen Einfluss, da bei Lufttemperaturen oberhalb von ca. 25 °C R744 nicht mehr verflüssigt werden kann.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Dänemark

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

R744 Flaschenkühler sind zurzeit noch deutlich teurer als vergleichbare steckerfertige HFKW- bzw. KW-Geräte, da insbesondere die benötigten kleinen hermetischen R744-Verdichter noch nicht in großen Stückzahlen gefertigt werden. Sollte ein Markt für steckerfertige R744-Geräte entstehen werden die Kosten fallen und der Mehrpreis wird vermutlich nur noch wenige Prozent betragen [Pedersen2006b].

Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

16. Betriebskosten

Bei moderaten Temperaturen des Aufstellraums geringere Energiekosten als vergleichbare HFKW-Flaschenkühler, siehe Pkt. 10.

17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

18. Wartungskosten

Keine.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Mindestens 4.000 bis 6.000, hauptsächlich Coca-Cola.
Coca-Cola soll im Jahr 2006 6.000 neue R744-Flaschenkühler installiert haben [Scanref 5/2007].

20. Regionale Verbreitung

Gesamte EU.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Prototypen seit 2003, Kleinserien seit 2004 und seit 2005 in größeren Serien. Im Rahmen der Fußball WM2006 wurden von Coca-Cola insgesamt mehr als 2.000 Flaschenkühler mit R744 in den verschiedenen Veranstaltungsorten aufgestellt [ScanRef2006] und für die olympischen Winterspiele in Turin 2006 über 1.000 [IIRNewsletter2008]. Für Ende 2006 erwartet Coca-Cola weltweit mehr als 6.000 Flaschenkühler mit R744 im Einsatz zu haben [Pedersen2006a].

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Zuverlässig.

### 23. evtl. besondere Probleme

Hohe Drücke, insbesondere an warmen (über 30 °C) Aufstellorten. Flaschenkühler mit R744 sind lauter als solche mir R134a oder R600a [Pedersen2006b].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Vestfrost (DK) u.a.

### 28. evtl. Importeur

-

### 29. Komponentenhersteller

Verdichter: Danfoss, Embraco, Sanden (?), Sanyo
Expansionsventil: Danfoss

## 30. Betreiber

Hauptsächlich Coca-Cola.

## Quellen

[Cechinato2007] Cecchinato, L.; Corradi, M.; Schiochet, G.; Fossat, C.: Development of a transcritical R744 bottle cooler. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[IIRNewsletter2008] IIR Newsletter: Green Olympics: Sanyo. IIR Newsletter No. 33, Januar 2008

[Kruse2005] Kruse, H.; Jakobs, R.; Rüssmann, H.: Effizienz von $CO_2$ in gewerblichen Kälteanwendungen kleiner Leistung. Die Kälte- und Klimatechnik 58, 9 (2005), S. 20 - 24

[Pedersen2006a] Pedersen, P.H.: Kommercielle køleskabe og frysere (Plug-in). HFC-fri Køling, 14. juni 2006 (rev. 4. august 2006)

[Pedersen2006b] Pedersen, P.H.; Walløe, H.; Madsen, K.: Slutrapport for projektet: Energibesparende flaskekøler med $CO_2$-kølemiddel. September 2006, Teknologisk Institut

[Scanref2006] Nytt från Världen runt. ScanRef 5 (2006), S. 10

Technologie-Datenblatt zu

## 2.4 **A4: Tiefkühltruhen mit HFKW (R134a, R404A)**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Tiefkühltruhen im Supermarkt, an Tankstellen und in anderen Anwendungen. Discounter bevorzugen wegen der hohen Flexibilität steckerfertige Tiefkühltruhen.

2. Kälteleistungsbereich

200 W bis 3000 W [z. B. COF oder ISA].

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

Bis ca. 650 Liter Nettovolumen R134a, bei größeren Truhen R404A und R507 [Rauschenbach].

5. Kältemittelfüllmenge

Füllmengen von 120 bis 1200 g, entsprechend 36 bis 162 g pro 100 Liter

Novum: Nettovolumen in Liter / Kältemittelfüllmenge in g: 540/230 R134a, 570/540 R404A, 752/270 R404A, 742/270 g R404A [Herstellerangaben der Fa. Novum]

Mammut mit Glasdeckel: Bruttovolumen in Liter / Kältemittelfüllmenge in g: 217/150, 349/225, 450/245, 530/260, 611/280, 722/310; Ecktruhe 130/105 alle mit R134a [Katalogdaten der Firma Mammut]

Mammut offen: Bruttovolumen in Liter / Kältemittelfüllmenge in g: 509/2 x 370, 691/2 x 560, 872/2 x 600 alle mit R404A [Katalogdaten der Firma Mammut zur Serie OLA]

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

## Kältemittelverluste

### 6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der Kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge.

### 7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung sowie Gespräch mit verschiedenen Herstellern.

### 8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Entsorgungsbetrieb.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Energieverbrauch hängt von der Größe der Tiefkühltruhe ab. Je kleiner die Tiefkühltruhe desto höher wird der spezifische auf das Volumen der Tiefkühltruhe bezogene Energieverbrauch. Energieverbräuche liegen mit Glasdeckel zwischen 0,8 und 1,8 kWh/24. Stunden je 100 Liter Nettovolumen. Bei offenen Tiefkühltruhen zwischen 3 und 5,4 kWh/24h je 100 Liter Nettovolumen.

Novum: Energieverbrauch pro 100 Liter Nettovolumen in kWh/24h: 0,8 bis 1,8
Mammut Glasdeckel: Energieverbrauch pro 100 Liter Bruttovolumen in kWh/24h: 0,95 bis 1,4 (2,3 für Ecktruhe mit 105 Liter Bruttovolumen)
Mammut offen: Energieverbrauch pro 100 Liter Bruttovolumen in kWh/24h: 3,9 bis 5,4.
AHT Energieverbräuche zwischen 3 und 10 kWh/24 h bei Volumina von 100 bis 950 Liter.

In der Praxis ist der Energieverbrauch auch abhängig vom Aufstellungsort. Bei deutschen Aldi Süd Märkten stehen die Tiefkühltruhen vor den Kühlregalen. Die Umgebungstemperatur ist deshalb niedriger als bei z. B. schweizerischen Aldi Märkten, bei denen die Tiefkühltruhen nicht vor den Kühlregalen stehen [Bader2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

Denkbar wäre auch eine Wasserkühlung der Verflüssiger von steckerfertigen Geräten. Dadurch würde die Verflüssigerwärme nicht in den Verkaufsraum abgegeben und die Kältemittelfüllmenge ließe sich beim Einsatz von kompakten Plattenverflüssigern reduzieren. Auf der EUROSHOP 2008 wurden erstmals von einer Firma derartige steckerfertige Geräte mit wassergekühlten Verflüssigern vorgestellt [AREA2008]..

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch korrektes Befüllen der Gefriermöbel, Glasdeckel, niedrige Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum, Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, bedarfsgeregelte, d. h. taupunktabhängige Kanten- bzw. Türheizung, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Austausch des Kapillarrohrs durch ein (thermostatisches) Expansionsventil, verbesserte Verdampfer, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers.

Heißgasabtauung wird insbesondere bei Tiefkühltruhen mit statischem Verdampfer, d. h. mit um die Tiefkühlbox gewickelter Rohrschlange, angewandt [AHT2007].

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Herstellerkatalogdaten

**Lebenszykluskosten**

### 14. Investition / Komponentenkosten

Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

### 15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

### 16. Betriebskosten

Energiekosten höher als TK-Truhe an Verbundanlage, Wartungskosten niedriger.

Durch Einsatz moderner drehzahlregelbarer Verdichter lassen sich bei steckerfertigen Geräten 10 bis 15 % Energie einsparen [Tiedemann2006].

### 17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

### 18. Wartungskosten

Keine Wartung erforderlich.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

AHT hat bis Anfang 2007 ca. 240.000 derartige Geräte in Supermärkten in der EU installiert [AHT2007].

### 20. Regionale Verbreitung

Gesamte EU, insbesondere kleinere Supermärkte und Discounter sowie Tankstellen.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit Anfang der 1990er Jahre mit HFKW; jedoch vorher bereits mit FCKW mit ähnlichen Eigenschaften mehrere Jahrzehnte.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig. Lebensdauererwartung für hermetische Verdichter für R404A oder R134a etwas geringer als diejenige von R600a oder R290-Verdichtern [Jürgensen2004].

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität, da nur Stromanschluss erforderlich ist.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

AHT, Carrier, Elcold, Hauser, ISA, KMW, Metalfrio Solutions (mit Firmen Caravel, Derby, Esta und Gram), Novum und Oscartielle (Teil der Arneg Gruppe) u. a.

28. evtl. Importeur

MAMMUT

29. Komponentenhersteller

Expansionsventile: u. a. Danfoss
Verdichter: u. a. Danfoss, Embraco,

30. Betreiber

Aldi, Lidl, Netto, Penny u. a.

**Quellen**


[AHT2007] Resch, R.: Email von Reinhold Resch, AHT vom 9. März 2007

[AREA2008] Area: Informationen der Fa. Area Cooling Solutions auf der EUROSHOP 2008 in Düsseldorf am 26.2.2008

[Bader2007] Bader, T.: Gespräch mit Thomas Bader von Tebeg am 18.1.2007 bei Aldi Süd in Mönchengladbach.

[Jürgensen2004] Jürgensen, H., Nielsen, O.K., Tiedemann, T.: Application Related Design of Hermetic Propane Compressors for Small Refrigeration Systems. Proc. IIR Compressors Conference 2004, Castá Papiernicka, 29.9. – 1.10.2004

[Tiedemann2006] Tiedemann, T., Gespräch mit Thomas Tiedemann, Danfoss am 11.12.2006

Technologie-Datenblatt zu

## 2.5 **A5: Tiefkühltruhen mit Kohlenwasserstoffen (R600a, R290)**

Bei Haushaltskühl- und -gefriergeräten hat sich in Nord- und Westeuropa der Einsatz von R600a durchgesetzt. Seit der Markteinführung derartiger Geräte Anfang der 1990er Jahre sind inzwischen weit über 150 Millionen solcher Geräte hergestellt worden. Gründe für die Beliebtheit von R600a sind neben dem Umweltaspekt des niedrigen Treibhauspotentials auch die höhere energetische Effektivität von R600a gegenüber R134a, die niedrigeren Systemdrücke welche zu deutlich leiserem Betrieb führen. Die niedrige volumetrische Kälteleistung von R600a begrenzt jedoch den Einsatz dieses Kältemittels auf Haushaltskühl- und –gefriergeräte. Solange die Kältemittelfüllmengen unter 150 Gramm bleiben sind nach IEC 60335 (International Electrotechnical Commission) keine besonderen Anforderungen in Bezug auf den Aufstellort zu erfüllen. Der Gerätehersteller muss jedoch bestimmte Anforderungen in Bezug auf z. B. Oberflächentemperaturen und Gasdichtheit erfüllen.

Gewerbliche Tiefkühltruhen haben in Regel Kälteleistungen über 500 W, was den Einsatz von R600a in solchen Geräten begrenzt, da die Verdichter zu große Hubvolumina benötigen würden. Es wird deshalb überwiegend R290 eingesetzt. In kleineren Geschäften werden jedoch zum Teil kleinere Haushaltsgeräte eingesetzt, die in der Regel mit R600a arbeiten.

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Tiefkühltruhen im Supermarkt, an Tankstellen und in anderen Anwendungen. Discounter bevorzugen wegen der hohen Flexibilität steckerfertige Tiefkühltruhen.

#### 2. Kälteleistungsbereich

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

200 W bis 1000 W [Herstellerangaben, siehe unten].
z. B. 2,1 m x 0,85 m x 0,83 m (L x B x H) bei $t_0$ = -35 °C ca. 430 W Kälteleistung

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R290, für kleine Tiefkühltruhen auch R600a.

5. Kältemittelfüllmenge

Zurzeit maximal 150 Gramm; in Zukunft evtl. 500 g sofern IEC 60335-2-89 entsprechend geändert wird.

724 Liter Nettovolumen AHT-Tiefkühltruhe enthält z. B. 120 g R290 [ProCool2006].
412 Liter Nettovolumen Liebherr-Tiefkühltruhe enthält z. B. 85 g R600a [ProCool2006]
189 Liter Nettovolumen Liebherr-Tiefkühltruhe enthält z. B. 63 g R600a [ProCool2006]
Liebherr auch: 150, 148 und 160 g R600a für 220, 283 und 346 l Bruttoinhalt [Katalogdaten der Firma Mammut GmbH]

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der Kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung sowie Gespräch mit verschiedenen Herstellern.

8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

In der Regel Entsorgung über Entsorgungsbetrieb. Könnte aber auf Grund seiner geringen Umweltrelevanz in die Atmosphäre abgegeben werden. Zündquellen sollten dann jedoch nicht in der Nähe sein. Da dabei jedoch Öl mitgerissen werden kann, ist die Entsorgung vorzuziehen.

**Energie**

### 10. Energieverbrauch

Kalorimetermessungen mit drei hermetischen Verdichtern annähernd gleicher Kälteleistung mit R134a, R290 und R600a im Vergleich unter gleichen Randbedingungen zeigen um 8 bzw. 5 % höhere Kälteleistungszahlen für R290 bzw. R600a im Vergleich zu R134a [Jürgensen2004].

Vergleichsmessungen mit Tiefkühltruhen in einer Klimakammer nach EN 441 zeigten mit R290 10 bis 15 % weniger Energieverbrauch als mit R404A [Jürgensen2004].

Messungen in einer Klimakammer an einem Seriengerät der Firma AHT ergaben 0,718 kWh/24 h je 100 Liter Volumen der Tiefkühltruhe. Entsprechende Messungen an zwei kleineren Geräten der Firma Liebherr ergaben 0,468 und 0,545 kWh/24 h für 100 Liter Volumen [ProCool2006].

In der Praxis ist der Energieverbrauch auch abhängig vom Aufstellungsort. Bei Deutschen Aldi Süd Märkten stehen die Tiefkühltruhen vor den Kühlregalen. Die Umgebungstemperatur ist deshalb niedriger als bei z. B. schweizerischen Aldi Märkten, bei denen die Tiefkühltruhen nicht vor den Kühlregalen stehen [Bader2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

Denkbar wäre auch eine Wasserkühlung der Verflüssiger von steckerfertigen Geräten. Dadurch würde die Verflüssigerwärme nicht in den Verkaufsraum abgegeben und die Kältemittelfüllmenge ließe sich beim Einsatz von kompakten Plattenverflüssigern reduzieren. Auf der EUROSHOP 2008 wurden erstmals von einer Firma derartige

steckerfertige Geräte (jedoch mit HFKW als Kältemittel) mit wassergekühlten Verflüssigern vorgestellt [AREA2008].

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch korrektes Befüllen der Gefriermöbel, Glasdeckel, niedrige Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum, Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, bedarfsgeregelte, d. h. taupunktabhängige Kanten- bzw. Türheizung, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Austausch des Kapillarrohrs durch ein (thermostatisches) Expansionsventil, verbesserte Verdampfer, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers.

Drehzahlregelung des Verdichters bringt ca. 10 bis 15 %, zusammen mit den Kältemittelbedingten Einsparungen beim Wechsel auf R290 (ca. 10 bis 15 %) sparen die R290 Tiefkühltruhen mit drehzahlregelbarem Verdichter gegenüber herkömmlichen R404A-Geräten ca. 25 % Energie [AHT2007, Jürgensen2004].

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Kalorimetermessungen und Messungen in Klimakammern unter gleichen Bedingungen [Jürgensen2004].

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Ca 15 % teurer als vergleichbare steckerfertige HFKW-Geräte [Katalogpreise der Fa. Mammut für Liebherrgeräte].

Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

### 15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

### 16. Betriebskosten

Ca. 10 bis 15 % unter denen von vergleichbaren steckerfertigen Geräten mit HFKW. Durch Einsatz moderner drehzahlregelbarer Verdichter lassen sich bei steckerfertigen Geräten nochmals 10 bis 15 % Energie einsparen [Tiedemann2006].

### 17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

### 18. Wartungskosten

Keine Wartung erforderlich.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Unilever setzt seit 2004 ausschließlich Speiseeiskühltruhen mit Kohlenwasserstoffen ein. Im Jahr 2004 waren 15.000 Geräte im Einsatz und für 2005 war die Anschaffung von 80.000 weiteren geplant [Jürgensen2004]. Im Jahr 2006 waren insgesamt bei Unilever 100.000 Eiskremtiefkühltruhen mit Kohlenwasserstoff als Kältemittel im Einsatz [Pedersen2006a]. AHT hat bis 2007 ca. 100.000 steckerfertige Eiscremtiefkühltruhen mit R290 verkauft [AHT2007].

AHT hat inzwischen mehrere 10.000 Tiefkühltruhen für den Supermarkt mit R290 verkauft – Tendenz stark steigend [AHT2007].

Aldi Süd hat 7.000 steckerfertige Tiefkühltruhen mit R290 im Einsatz und will in Zukunft nur noch Tiefkühltruhen mir R290 anschaffen.

### 20. Regionale Verbreitung

In Supermärkten überwiegend Nordeuropa. Als Speiseeiskühltruhe durch Unilever EU-weit [Pedersen2006a]. Seit 2007 setzt Unilever diese Speiseeiskühltruhen auch in

China, anderen asiatischen Ländern sowie Mexiko und Brasilien ein. In Nordamerika sind wegen der US-amerikanischen Produkthaftungsgesetze und der juristischen Lage keine Kohlenwasserstoffgeräte geplant.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Als Prototyp seit 2000. Als Feldtest seit 2003. Serienmäßig seit 2004.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr Zuverlässig. Probleme mit der Lebensdauer von hermetischen R290-Verdichtern in frühen Wärmepumpenanwendungen sind inzwischen gelöst. Durch Einsatz geeigneter Öle ist die Lebensdauererwartung für hermetische R290-Verdichter sogar höher als die von R404A oder R134a-Verdichtern [Jürgensen2004].

23. evtl. besondere Probleme

Solange die 150 g Füllgrenze laut IEC 60335 besteht, wird es keine großen steckerfertigen Tiefkühltruhen mit Propan geben. Für Hersteller von hermetischen Verdichtern gilt darüber hinaus die Druckgeräterichtlinie **97/23/EC**. Diese fordert ab einer gewissen Verdichtergröße (Druck-Volumen-Produkt größer als 50 bar Liter) besondere Kontrollen in der Fertigung. Es fertigt deshalb momentan kein Verdichterhersteller hermetische Verdichter für größere steckerfertige Geräte.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

Auch TK-Truhen mit stiller Kühlung, d. h. die Verdampferrohre sind um den Kühlraum gewickelt, werden automatisch abgetaut [AHT2007].

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode

ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Solange die Kältemittelfüllmengen unter 150 Gramm bleiben sind nach IEC 60335 (International Electrotechnical Commission) keine besonderen Anforderungen in Bezug auf den Aufstellort zu erfüllen. Der Gerätehersteller muss jedoch bestimmte Anforderungen in Bezug auf z. B. Oberflächentemperaturen und Gasdichtheit erfüllen. Es wird daran gearbeitet, diese Füllgrenze für gewerbliche Tiefkühltruhen auf 500 g anzuheben, was nahezu alle steckerfertigen Gewerbekälteaggregate einschließen würde [Jürgensen2004].

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

AHT (AT), Liebherr (D), Frost-trol (ES)

### 28. evtl. Importeur

MAMMUT

### 29. Komponentenhersteller

Expansionsventile: u. a. Danfoss
Verdichter: u. a. Danfoss

### 30. Betreiber

Aldi Süd, Lidl, Unilever u. a.

## Quellen

[AHT2007] Resch, R.: Email von Reinhold Resch, AHT vom 9. März 2007

[AREA2008] Area: Informationen der Fa. Area Cooling Solutions auf der EUROSHOP 2008 in Düsseldorf am 26.2.2008.

[Bader2007] Bader, T.: Gespräch mit Thomas Bader von Tebeg am 18.1.2007 bei Aldi Süd in Mönchengladbach.

[Jürgensen2004] Jürgensen, H., Nielsen, O.K., Tiedemann, T.: Application Related Design of Hermetic Propane Compressors for Small Refrigeration Systems. Proc. IIR Compressors Conference 2004, Castá Papiernicka, 29.9. – 1.10.2004

[Pedersen2006a] Pedersen, P.H.: Kommercielle køleskabe og frysere (Plug-in). HFC-fri Køling, 14. juni 2006 (rev. 4. august 2006)

[ProCool2006] Presseinformation in Verbindung mit dem ProCool Award 2006.

[Tiedemann2006] Tiedemann, T., Gespräch mit Thomas Tiedemann, Danfoss am 11.12.2006

Technologie-Datenblatt zu

## 2.6 **A6: Tiefkühltruhen mit Kohlendioxid (R744)**

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Eiskremtiefkühltruhen im Supermarkt, an Tankstellen und in anderen Anwendungen. Für den Supermarktbereich wird zumindest von einem Hersteller die Verwendung von R744 in steckerfertigen Tiefkühltruhen bezweifelt. Der Energieverbrauch von R744 Tiefkühltruhen ist höher als derjenige von R290-Truhen, Geräte mit R744 sind lauter als solche mit R290 und es gibt zur Zeit (Jahr 2007) noch keine Verdichter die mit R744 für den Tiefkühlbereich optimiert sind [AHT2007].

#### 2. Kälteleistungsbereich

200 W bis 1000 W.

#### 3. Art der Kälteübertragung

Direkt

#### 4. Kältemittelart

R744

#### 5. Kältemittelfüllmenge

Unbekannt.

### Kältemittelverluste

#### 6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge.

---

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

### 7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung sowie Gespräch mit verschiedenen Herstellern.

### 8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

In der Regel Entsorgung über Entsorgungsbetrieb. Könnte aber auf Grund seiner geringen Umweltrelevanz in die Atmosphäre abgegeben werden. Da dabei jedoch Öl mitgerissen werden kann, ist die Entsorgung vorzuziehen.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Unbekannt, bei hohen Aufstellraumtemperatur vermutlich höher als mit HFKW, bei niedrigen Aufstellraumtemperaturen vermutlich niedriger.

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben. Denkbar wäre auch eine Wasserkühlung der Verflüssiger von steckerfertigen Geräten. Dadurch würde die Verflüssigerwärme nicht in den Verkaufsraum abgegeben und die Kältemittelfüllmenge ließe sich beim Einsatz von kompakten Plattenverflüssigern reduzieren. Auf der EUROSHOP 2008 wurden erstmals von einer Firma derartige steckerfertige Geräte (jedoch mit HFKW als Kältemittel) mit wassergekühlten Verflüssigern vorgestellt [AREA2008].

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch korrektes Befüllen der Gefriermöbel, Glasdeckel, niedrige Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum, Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, bedarfsgeregelte, d. h. taupunktabhängige Kanten- bzw. Türheizung, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Austausch des Kapillarrohrs durch ein (thermostatisches) Expansionsventil, verbesserte Verdampfer,

verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers – dies hat insbesondere an Aufstellorten mit hoher Lufttemperatur einen großen Einfluss, da bei Lufttemperaturen oberhalb von ca. 25 °C R744 nicht mehr verflüssigt werden kann.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Keine bekannt.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Teurer als vergleichbare steckerfertige HFKW-Geräte. Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

### 15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

### 16. Betriebskosten

Unbekannt.

### 17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

### 18. Wartungskosten

Keine Wartung erforderlich.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Nestlé will weltweit R744-Tiefkühltruhen für Speiseeis einsetzen [Pedersen2006].

### 20. Regionale Verbreitung

Keine – bisher nur Prototypen.

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Bisher nur Prototypen, Vorstellung auf der EUROSHOP 2008.

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Zuverlässig.

### 23. evtl. besondere Probleme

Hohe Drücke, insbesondere an warmen (über 30 °C) Aufstellorten. Auf Grund der höheren Drücke sind höhere Geräusche zu erwarten.

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

U. a. Frost-trol (ES) und Novum (IRL).

### 28. evtl. Importeur

Unbekannt.

### 29. Komponentenhersteller

Expansionsventile: Danfoss
Verdichter: Danfoss

### 30. Betreiber

Nestlé (geplant)

## Quellen


[AHT2007] Resch, R.: Email von Reinhold Resch, AHT vom 9. März 2007

[AREA2008] Area: Informationen der Fa. Area Cooling Solutions auf der EUROSHOP 2008 in Düsseldorf am 26.2.2008.

[Pedersen2006] Pedersen, P.H.: Kommercielle køleskabe og frysere (Plug-in). HFC-fri Køling, 14. juni 2006 (rev. 4. august 2006)

Technologie-Datenblatt zu

## 2.7 **A7: Kühltruhen**

Es gibt überwiegend steckerfertige Tiefkühltruhen – diese können zum Teil durch entsprechende Einstellmöglichkeit des Thermostaten als Kühltruhe verwendet werden bzw. werden vom Hersteller mit anderen Thermostaten bestückt, siehe u. a. Katalog der Fa. Mammut, die eine Vielzahl steckerfertiger Geräte verschiedenster Hersteller vertreibt. Bestätigt durch Thomas Tiedemann, Danfoss sowie durch verschiedene Produktkataloge der Hersteller AHT, KMW auf der EUROSHOP 2008.

Technologie-Datenblatt zu

## 2.8 **A8: Kühltheken mit HFKW (R134a, R404A)**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Kühltheken vorwiegend an Tankstellen und in einigen kleinen Supermärkten oder für Verkaufsaktionen

2. Kälteleistungsbereich

Mammut: 420 bis 1657 W [Katalogdaten].

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R134a (Hauser) und R404A (Mammut)

Auf der EUROSHOP2008 waren auch erste Kühltheken mit R744 ausgestellt – technische Daten gab es keine dazu [NOVUM2008].

5. Kältemittelfüllmenge

210 g bis 1400 g (245 bis 700 g/m$^2$ Ausstellfläche)

Mammut: Ausstellfläche in m$^2$/Kältemittelfüllmenge in g: 0,46/210, 0,55/210, 0,72/310, 0,75/400, 0,84/350, 0,86/600, 0,89/400, 0,98/410, 1,06/600, 1,12/450, 1,14/410, 1,15/750, 1,24/500, 1,33/450, 1,40/500, 1,50/500, 1,50/600 1,60/850, 1,70/600 1,72/1000, 1,78/500, 2,13/950, 2,22/600, 2,30/1200, 2,66/650, 2,66/1150, 2,87/1300, 3,20/1400, 3,44/1400 [Serien NOVA, GIOVE, MARTE, MERCURY XM, ZVP 01 und ZVP 02 sortiert nach Ausstellfläche; Herstellerangaben]

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Entsorgungsbetrieb.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Energieverbräuche von 0,5 (stille Kühlung) bzw. 5,9 (Umluftkühlung) bis 12,5 kWh/24h bezogen auf den Quadratmeter Ausstellfläche.

Mammut NOVA bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 8,1 kWh/24 h, 8,7 kWh/24 h und 10,8 kWh/24 h für 0,75, 1,12 und 1,5 $m^2$ Ausstellfläche bei stiller Kühlung und 9,4 kWh/24h, 10,0 kWh/24 h und 12,4 kWh/24 h für 0,75, 1,12 und 1,5 $m^2$ Ausstellfläche bei Umluftkühlung [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut GIOVE bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 5,5 kWh/24 h, 8,3 kWh/24 h, 10,8 kWh/24 h, 12,0 kWh/24 h und 14,6 kWh/24 h für 0,89, 1,33, 1,78, 2,22 und 2,66 $m^2$ Ausstellfläche bei stiller Kühlung [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut MARTE bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 7,4 kWh/24 h, 9,7 kWh/24 h, 12,1 kWh/24 h, 15,0 kWh/24 h und 19,0 kWh/24 h für 1,06, 1,60, 2,13, 2,66 und 3,20 $m^2$ Ausstellfläche bei Umluftkühlung [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut MERCURY XM bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 8,9 kWh/24 h, 10,5 kWh/24 h, 13,5 kWh/24 h, 23,3 kWh/24 h, 29,2 kWh/24h und 31,15 kWh/24 h für 0,86, 1,15, 1,72, 2,30, 2,87 und 3,44 $m^2$ Ausstellfläche bei Umluftkühlung [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut ZVP 01 bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 0,30 kWh/24 h, 0,31 kWh/24 h, 0,47 kWh/24 h, 0,59 kWh/24 h und 0,69 kWh/24 h für 0,55, 0,84, 1,14, 1,40 und 1,70 $m^2$ Ausstellfläche bei stiller Kühlung [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut ZVP 02 bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 0,30 kWh/24 h, 0,31 kWh/24 h, 0,47 kWh/24 h, 0,59 kWh/24 h und 0,69 kWh/24 h für 0,46, 0,72, 0,98, 1,24 und 1,50 $m^2$ Ausstellfläche bei stiller Kühlung [Katalogdaten von Fa. Mammut].

## 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

## 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch korrektes Befüllen der Kühltheken Glasdeckel / Glastüren, niedrige Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum, Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes, Verbesserter Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, Drehzahlregelung des Verdichter, Drehzahlregelung des Ventilators, Ersatz des Kapillarrohres durch ein (thermostatisches) Expansionsventile, Verbesserte Verdampfer, bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer, Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers – dies hat insbesondere an Aufstellorten mit hoher Lufttemperatur einen großen Einfluss.

## 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Bei 25 °C Umgebungstemperatur, 60 % rel. Feuchte.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

### 15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

### 16. Betriebskosten

Energiekosten höher als Kühltheke an Verbundanlage, Wartungskosten niedriger.

### 17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

### 18. Wartungskosten

Keine.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Unbekannt.

### 20. Regionale Verbreitung

Gesamte EU.

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit Mitte der 1990er Jahre mit HFKW; jedoch vorher bereits mit FCKW mit ähnlichen Eigenschaften mehrere Jahrzehnte.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

Cryosbanc, HAUSER, KMW, Oscartielle (Teil der Arneg Gruppe), Epta u. a.
Frost-trol und Novum auch mit R744

28. evtl. Importeur

MAMMUT

29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Unbekannt.

**Quellen**

[Novom2008] Novum und Frost-trol stellten Kühltheken mit R744 auf der EUROSHOP 2008 aus

Technologie-Datenblatt zu

## 2.9 **A9: Kühlregale mit HFKW (R404A)**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Kühlregale vorwiegend an Tankstellen und in kleinen Supermärkten oder für Verkaufsaktionen

2. Kälteleistungsbereich

590 bis 4.700 W [Herstellerangaben, siehe unten]

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R404A (Mammut)

5. Kältemittelfüllmenge

R404A: 390 g bis 3300 g
(290 bis 730 g/m$^2$ Ausstellfläche oder 84 bis 125 g/100 l Bruttoinhalt)

Mammut: Ausstellfläche in m$^2$/Kältemittelfüllmenge in g: 0,94/550, 1,36/390, 1,40/720, 1,42/800, 1,43/850, 1,46/950, 1,86/780, 1,87/950, 1,90/1005, 1,96/1250, 2,12/950, 2,19/1600, 2,26/930, 2,52/1250, 2,70/1030, 2,82/1250, 2,86/1250, 2,93/1675, 2,95/1600, 3,72/(3 x 780), 3,77/1600, 3,95/(2 x 1250), 4,25/1700, 4,40/(2 x 1500), 4,52/(3 x 930), 5,04/(2 x 1250), 5,46/(2 x 1030), 5,64/(2 x 1250), 5,87/(2 x 1650) [Serien ALASKA, MINOR, MIRA, NORMIX, SATURNO, VENERE SL/MT und FV sortiert nach Ausstellfläche; Herstellerangaben]

Mammut Serie STYLOS Angaben bezogen auf Bruttoinhalt: 730 g/870 l, 950 g/1045 l, 1350 g/1570 l, 1750 g/2095 l.

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

Mammut Serie KU Angaben bezogen auf Bruttoinhalt: 450 g/360 l, 730 g/686 l und 930 g/850 l.

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Entsorgungsbetrieb.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Energieverbräuche von 7,3 bis 19,4 kWh/24h bezogen auf den Quadratmeter Ausstellfläche oder 2,5 bis 4,4 kWh/24 h bezogen auf 100 Liter Bruttoinhalt.

Mammut ALASKA bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 10,7/0,94, 11,7/1,40, 14,7/1,86, 18,0/2,26, 22,5/2,70, 29,4/3,72, 36,0/4,52 und 45,0/5,46 (kWh/24h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut VENERE bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 18,1/1,43, 25,3/1,90 und 30,2/2,86 (kWh/24 h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut MINOR bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 18,7/1,42, 20,6/2,12, 23,0/2,82, 34,3/4,25 und 54,0/5,64 (kWh/24h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut]

Mammut SATURNO SL/MT bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 21,6/1,87, 26,8/2,52, 39,0/3,77 und 56,2/5,04 (kWh/24h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut SATURNO FV bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 21,6/1,46, 26,8/1,96, 39,0/2,95 und 56,2/3,95 (kWh/24h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut NORMIX bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 25,4/1,36 und 26,4/1,36 (kWh/24h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut MIRA bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 19,4/2,19, 21,3/2,93, 41,7/4,40 und 46,0/5,87 (kWh/24h)/$m^2$ Ausstellfläche [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut STYLOS bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 29,4/870, 37,6/1045, 44,5/1570, 51,6/2095 (kWh/24h) pro Liter Bruttoinhalt [Katalogdaten von Fa. Mammut].

Mammut KU bei 25 °C und 60 % relativer Feuchte: 15,9/360, 17,0/686 und 25,0/850 (kWh/24h) pro Liter Bruttoinhalt [Katalogdaten von Fa. Mammut].

## 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

## 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich durch korrektes Befüllen der Kühlregale, den Einbau von Glastüren, niedrige Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum, Lüftermotor außerhalb des Gerätes, verbesserter Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Expansionsventile anstelle Kapilarrohr, Verbesserte Verdampfer, bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer, Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers – dies hat insbesondere an Aufstellorten mit hoher Lufttemperatur einen großen Einfluss.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Bei 25 °C Umgebungstemperatur, 60 % rel. Feuchte.

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

16. Betriebskosten

Energiekosten höher als Kühlregal an Verbundanlage, Wartungskosten niedriger.

17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

18. Wartungskosten

Keine.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Unbekannt.

20. Regionale Verbreitung

Gesamte EU.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Mit HFKW seit Mitte der 1990er Jahre; jedoch vorher bereits mit FCKW mit ähnlichen Eigenschaften mehrere Jahrzehnte.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine.

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

Criocabin, Epta, Fogal (I), Hauser (AT), Linde/Carrier (D), Oscartielle (Teil der Arneg Gruppe), u. a.

28. evtl. Importeur

MAMMUT

29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Zahlreiche.

**Quellen**

Technologie-Datenblatt zu

## 2.10 **A10: Kühlregale mit Kohlendioxid (R744)**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige, flexible[1] Kühlregale vorwiegend an Tankstellen und in einigen kleinen Supermärkten oder für Verkaufsaktionen

2. Kälteleistungsbereich

Unbekannt, aber prinzipiell alle möglich.

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R744

5. Kältemittelfüllmenge

2.300 g für ein 493 Nettovolumen Kühlregal [ProCool2006], entspr. 467 g/100 Liter Nettovolumen.

### Kältemittelverluste

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

[1] Steckerfertige Geräte benötigen für den Betrieb nur einen Stromanschluss. Sie können deshalb im Markt beliebig, d. h. **flexibel**, platziert werden.

### 8. Art der Ableitung

In den Verkaufsraum direkt am Aufstellort.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

In der Regel Entsorgung über Entsorgungsbetrieb. Könnte aber auf Grund seiner geringen Umweltrelevanz in die Atmosphäre abgegeben werden. Da dabei jedoch Öl mitgerissen werden kann, ist die Entsorgung vorzuziehen.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Messungen in einer Klimakammer durch den TÜV haben für ein 493 Liter Nettovolumen Tiefkühlregal einen Energieverbrauch von 7,5 kWh/24 h bezogen auf 100 Liter ergeben [ProCool2006].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch korrektes Befüllen der Kühlregale, den Einsatz von Glastüren, niedrige Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum, Lüftermotor außerhalb des Gerätes, verbesserter Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung des Ventilators, Expansionsventil anstelle von Kapillarrohr, verbesserte Verdampfer, bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer, Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger, verbesserte Beleuchtung, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers – dies hat insbesondere an Aufstellorten mit hoher Lufttemperatur einen großen Einfluss, da bei Lufttemperaturen oberhalb von ca. 25 °C R744 nicht mehr verflüssigt werden kann.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Klimakammer des TÜV [ProCool2006].

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Teurer als vergleichbare steckerfertige HFKW-Geräte. Da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind, sind die Investitionskosten in der Regel niedriger als für zentrale Verbundanlagen.

15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

16. Betriebskosten

Energiekosten höher als Kühlregal an Verbundanlage, Wartungskosten niedriger.

17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

18. Wartungskosten

Keine.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Unbekannt, aber vermutlich nur wenige hundert.

20. Regionale Verbreitung

Unbekannt.

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Prototypen seit 2003, Kleinserien seit 2004 und seit 2005 in größeren Serien.

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Unbekannt, aber vermutlich ähnlich derjenigen von Flaschenkühlern mit R744, siehe A3.

### 23. evtl. besondere Probleme

Hohe Drücke, insbesondere an warmen (über 30 °C) Aufstellorten. Auf Grund der hohen Drücke ist mit höheren Geräuschemissionen zu rechnen.

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Verkaufsraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Frigoglass

### 28. evtl. Importeur

-

## 29. Komponentenhersteller

Verdichter: Danfoss, Embraco, Sanyo
Expansionsventil: Danfoss

## 30. Betreiber

Coca-Cola.

**Quellen**

[ProCool2006] Presseinformation in Verbindung mit dem ProCool Award 2006.

Technologie-Datenblatt zu

## 2.11 **A11: Stopferaggregate**

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Als steckerfertige Kälteaggregate speziell für Kühlzellen.

2. Kälteleistungsbereich

Ca. 0,5 bis 9 kW.

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R404A, Prototypen auch mit R410A und R290 [Hwang2006]

5. Kältemittelfüllmenge

0,5 bis 3 kg

In USA mit R404A bis zu 5 kg – R410A 4,7 kg und R290 1,8 kg [Hwang2006].

### Kältemittelverluste

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nahe Null, da fabrikgefertigt und Verwendung von hermetischen Komponenten. Nur bei Leitungsbruch oder Beschädigung der kältemittelführenden Bauteile kommt es zu einem Verlust der Füllmenge

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung und Gespräche mit verschiedenen Herstellern.

8. Art der Ableitung

In den Aufstellraum direkt am Aufstellort.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Entsorgungsbetrieb.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

In Abhängigkeit von der Kälteleistung. Typische Kälteleistungszahlen bei 18,3 °C Umgebungstemperatur betragen mit R404A als Kältemittel für NK 2,39 und für TK 1,24 und bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C NK 1,57 und TK 0,78 [Hwang2006].

Versuche mit R410A und R290 zeigten für TK-Anwendungen einen gegenüber R404A um ca. 2 bzw. 12 % reduzierten Energieverbrauch und für NK-Anwendungen einen um ca. 9 % bzw. 14 % reduzierten Energieverbrauch – jeweils bei 35 °C Umgebungstemperatur gemessen [Hwang2006].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Verflüssiger- und Verdichterwärme wird ganzjährig an den Aufstellraum, z. B. Lager, abgegeben.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich z. B. durch verbesserte Verdampfer-Lüfter und/oder –Lüftermotor, Drehzahlregelung des Verdichters, Drehzahlregelung der Ventilatoren, verbesserte Expansionsventile, verbesserte Verdampfer und Verflüssiger, bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer, Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger, Absenkung der Verflüssigertemperatur durch Wasserkühlung des Verflüssigers – dies hat insbesondere an Aufstellorten mit hoher Lufttemperatur einen großen Einfluss.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Je nach Aufstellort preiswerter als mit Verbundanlage gekühlter Kühlraum.

15. Installationskosten

Keine, da vor Ort keine kältetechnischen Installationen nötig sind.

16. Betriebskosten

Können über denen eines mit einer Verbundanlage gekühlten Kühlraumes liegen.

17. Wartungsintervalle

Keine. Allerdings wird die regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger empfohlen.

18. Wartungskosten

Keine.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Sehr viele.

20. Regionale Verbreitung

Gesamte EU.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Mit HFKW seit Mitte der 1990er Jahre; jedoch vorher bereits mit FCKW mit ähnlichen Eigenschaften mehrere Jahrzehnte.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität da nur Stromanschluss erforderlich ist.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Sehr gut. Für steckerfertige Geräte sind keine kältetechnischen Installationen erforderlich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte Verflüssiger- und Verdichterwärme an den Lagerraum abgegeben werden. Während der Heizperiode ist dies ein Vorteil, in den Sommermonaten führt es bei nichtklimatisierten Märkten evtl. zu einer unbehaglich hohen Raumtemperatur. Sofern der Supermarkt mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, steigt deren Energieverbrauch.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

Cibin, Isobar, KBS Kältetechnik, Kobol u. a.

28. evtl. Importeur

Diverse

29. Komponentenhersteller

Viele

30. Betreiber

Alle Supermarktketten.

**Quellen**

[Hwang2006] Hwang, Y.; Jin, D.-H.; Radermacher, R.: Comparison of R290 and two HFC blends for walk-in refrigeration systems. Int. J. of Refr. 30, (2007), S. 633 - 641

# 3. B Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz

Technologie-Datenblatt zu

## B1: Verflüssigungssätze

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Verflüssigungssatz mit luftgekühltem Verflüssiger und halbhermetischem Verdichter für Klima-, NK- und TK-Anwendungen.

2. Kälteleistungsbereich

Klimaanwendungen 2,5 kW - 50 kW, NK 1,8 kW - 45 kW, TK 0,75 kW - 25 kW [Bitzer2007].

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R404A, R134a, R507A, R407C.

5. Kältemittelfüllmenge

10 bis 20 kg, abhängig vom erforderlichen Rohrleitungsnetz im Markt.

### Kältemittelverluste

6. Typische Kältemittelverlustraten

Bei geringerer Lötstellenanzahl niedriger als bei Verbundanlagen.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Bitzer [Bitzer2007].

8. Art der Ableitung

In den Markt.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Ähnlich dem einer Verbundanlage mit gleicher Verdichtertechnologie, d. h. Ein/aus- oder Drehzahlregelung.

11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Anlagenseitig möglich.

12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Viele der in Kapitel 6 beschriebenen Technologien, z. B. Drehzahlregelung, Heißgasabtauung oder Verflüssigerdruckabsenkung.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Weltweit

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Geringer als bei einer Verbundanlage.

15. Installationskosten

Geringer als bei einer Verbundanlage.

16. Betriebskosten

Ähnlich denen einer Verbundanlage.

17. Wartungsintervalle

Verflüssigereinigung nach Bedarf, ansonsten nach F-Gaseverordnung 1 (bis 30 kg) oder 2 (ab 30 kg) Mal im Jahr.

18. Wartungskosten

Gering.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Viele Millionen weltweit.

20. Regionale Verbreitung

Weltweit, mit Schwerpunkten in Europa, Mittelost und Asien. Für gesamten Supermarkt in Deutschland seit 1985 auf dem Rückzug, in Südeuropa in kleineren Märkten noch verbreitet.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit Mitte der 1990er-Jahre mit HFKW, davor jahrzehntelang mit FCKW..

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Große Kältemittelauswahl, robust, langlebig, flexibel.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Ideal für Erweiterungen und Anlagen mit einer oder mehreren Kühlstellen. Flexible Kältemittelwahl. Bei Kältemittelwechsel Reinigung beachten.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Bei größeren Märkten Redundanz und Leckagerisikostreuung durch Verwendung mehrerer Einzelanlagen.

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

Bitzer, Bock, Copeland, Danfoss, Dorin, Frigopohl u. a.

28. evtl. Importeur

-

29. Komponentenhersteller

Zahlreiche, da Standardkomponenten.

30. Betreiber

Alle Supermarktketten.

**Quellen**

[Bitzer2007] Email von Albrecht Höpfer, Fa. Bitzer vom 12.10.2007

# 4. C Zentrale Verbundanlagen

## Inhalt des Abschnittes

C1 HFKW Direktverdampfung: R404A Supermarkt Verbundkälteanlage mit Direktverdampfung; Varianten verwenden Wärmerückgewinnung.

C2 HFKW Indirekt: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet.

C3 HFKW Indirekt Sole/$CO_2$: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung und verdampfend für Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet.

C4 HFKW Eisbrei: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger Eisbrei für Normalkühlung und Direktverdampfung für die Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet.

C5 HFKW/R744 Kaskade: R404A Direktverdampfung für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung.

C6 HFKW/R744 Kaskade: R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet.

C7 HFKW/R744 Kaskade – NK indirekt mit $CO_2$: R404A Kompaktanlage mit verdampfendem Kälteträger ($CO_2$) für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung; neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet.

C8 R717 indirekt: Ammoniak (R717) mit flüssigem Kälteträger, Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger und/oder verdampfenden Kälteträger.

C9 R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem.

C10 R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit verdampfendem Kohlendioxid.

C11 KW indirekt: Kohlenwasserstoff mit flüssigem Kälteträger, Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger und/oder verdampfenden Kälteträger

C12 KW/R744 Kaskade: Kohlenwasserstoff in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem oder verdampfendem Kälteträger.

C13 R744 Direktverdampfung: Kohlendioxid im gesamten Markt; anstelle einer Kältemittelverflüssigung findet hier- je nach Außentemperatur - im Sommer keine Verflüssigung sondern nur eine Gaskühlung statt. Die Drücke derartiger Kälteanlagen liegen bei derartigem Betrieb in der Regel über 100 bar auf der Hochdruckseite, häufig in Kombination mit Wärmerückgewinnung.

C14 R744 Direktverdampfung: Kohlendioxid im gesamten Markt. Verflüssigung des R744 an einer kompakten HFKW- oder KW-Anlage mit kleiner Füllmenge.

C15 Distributed Systems („Hussmann Protocol“, 1993 von der Fa. Hussmann vorgestellt) sind kompakte Verdichterverbünde mit Wassergekühlten Verflüssigern

C16 Conveni-Pack – Kombinierte Kälteversorgung, Klimatisierung und Beheizung von kleinen bis mittelgroßen Ladenformaten

Technologie-Datenblatt zu

## 4.1 **C1: HFKW Direktverdampfung**

HFKW Supermarkt-Verbundkälteanlage mit Direktverdampfung (a1+b1+c1+d1+e1 nach Tabelle 1; Varianten verwenden Wärmerückgewinnung, d. h. a3 anstatt a1)

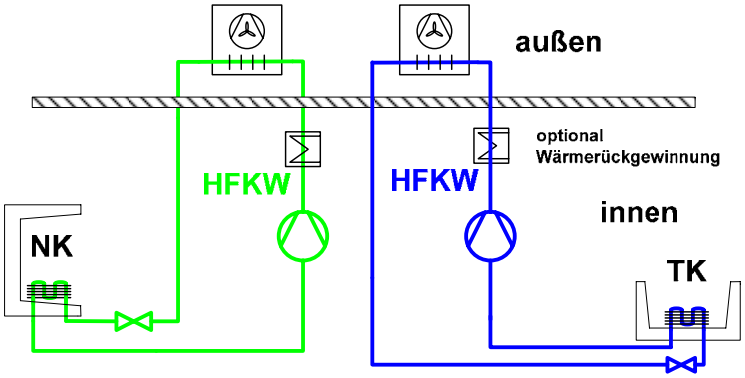



Bild C1.1: Zentrale Verbundkälteanlage mit HFKW in Direktverdampfung.

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

2. Kälteleistungsbereich

40 bis 1000 kW

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R404A, seltener R134a (nur in Normalkühlung) oder R507A und R410A

5. Kältemittelfüllmenge

Typische Aldi Anlage (Discounter mit steckerfertigen Tiefkühltruhen; Verbundanlage nur für Normalkühlung und Tiefkühlraum) enthält 60 bis 80 kg [Görner2007]. Kältemittelfüllung kann für gleiche Anlagen 5 % nach oben oder unten abweichen, ohne dass der Betrieb davon beeinträchtigt wäre [Görner2007].
Metro Warenhaus enthält ca. 600 kg für Tiefkühlung und 1000 kg für Normalkühlung [Görner2007].
Discounter 60 – 80 kg, Supermarkt 300 – 600 kg, Verbrauchermarkt 800 – 1500 kg [Linde2007].
Anlagen mit R410A enthalten wegen der größeren Dichte von R410A ca. 30 % weniger Kältemittel als vergleichbare R404A-Anlagen [Rivet2007].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

4 % [Görner2007]. Mit R134a sind die Betriebs- und Stillstandsdrücke in der Kälteanlage deutlich niedriger als mit R404A, z. B. Verflüssigungsdruck mit R134a bei 40 °C 10,2 bar gegenüber 18,2 bar mit R404A. Durch die niedrigeren Drücke treten zum einen Kältemittelverluste seltener auf und zum anderen sind bei kleinen Kältemittelverlustöffnungen, z. B. einem Spalt an einer nicht richtig angezogenen Bördelverschraubung, die Kältemittelverlustmengen kleiner, da die treibende Druckdifferenz kleiner ist [Schmidt2007a].

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Epta-Deutschland [Görner2007]

8. Art der Ableitung

Sehr selten über Sicherheitsventile – typische HFKW-Anlage enthält 1 maximal 2 Sicherheitsventile – diese blasen ins Freie ab. Kältemittelverluste über Undichtigkeiten und bei Leitungsbruch.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Rückgabe an Hersteller [Görner2007].

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Eine Supermarktkälteanlage mit R404A in Direktverdampfung stellt den derzeitigen Industriestandard dar. In der Normalkühlung ließe sich auch R134a einsetzen mit ca. 10 % besserer Kälteleistungszahl bzw. niedrigerem Energieverbrauch [Schmidt2007b].

3400 kWh/a/m - Mittelwert pro Laufmeter Kühlmöbel für TK + NK in schweizerischen Supermärkten, mit WRG. Im Winter durch die WRG etwas höhere Verflüssigungstemperatur und damit höherer Energieverbrauch [Linde2007].

Märkte mit R410A müssten weniger Energie verbrauchen. R410A-Anlagen verbrauchen theoretisch zwischen 5 und 15 % weniger Energie. In der Praxis verbrauchte eine Anlage in einem Kühllager mit drehzahlregelbaren Verdichtern und elektronischen Expansionsventilen sogar 30 % weniger Energie in der Tiefkühlung und 50 % weniger Energie in der Normalkühlung verglichen mit einer Standard-R404A-Anlage ohne drehzahlregelbaren Verdichter und ohne elektronische Expansionsventile [Frommann2006]. Wenn man der Drehzahlregelung und den elektronischen Expansionsventilen jeweils ca. 15 % Energieeinsparung zubilligt, decken sich die Werte mit den von Rivet [Rivet2007] genannten theoretischen Einsparpotentialen allein auf Grund des Kältemittelwechsels in Höhe von 5 bis 15 %.

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden. Bei Discountern in der Regel über zusätzlichen Wärmerückgewinnungsverflüssiger in der Lüftungszentrale der Supermarkt Be- und Entlüftung [Görner2007].

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Deutschland[1] [Frommann2006], Frankreich [Rivet2007], Schweiz [Linde2007].

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Preiswerter als R744 oder R717.

### 15. Installationskosten

Zurzeit am preiswertesten von allen Modelltechnologien.

### 16. Betriebskosten

Referenztechnologie.

### 17. Wartungsintervalle

Bisher einmal im Jahr [Görner2007]. In Zukunft je nach Füllmenge bis zu viermal im Jahr.

### 18. Wartungskosten

Referenztechnologie.

[1] Frommann2006 beschreibt ein ausgeführtes Kühllager mit R410A – keine Supermarktkälteanlage.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen

Der Marktanteil an HFKW-Direktverdampfungsanlagen ist sehr hoch. Neue Anlagen verwenden überwiegend R404A. REWE hat ca. 1000 Märkte mit R134a in der Normalkühlung [Schmidt2007b].

20. Regionale Verbreitung

Überall in Europa.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

R404A seit 1998, davor R22 und davor R12 bzw. R502 [Görner2007]. R410A in Klimaanlagen seit ca. 2000, in großen Kälteanlagen seit ca. 2006 [Frommann2006].

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig [Görner2007].

23. evtl. besondere Probleme

Keine [Görner2007].

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität [Görner2007].

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Vorhanden. Es können sogar Altkomponenten weiterverwendet werden, z. B. Wärmeübertrager oder Kühlmöbel sowie Rohrleitungen [Görner2007]. Beim Umstellen von R22 auf R404A ist das Öl zu wechseln. Das für R404A anzuwendende Esteröl greift die Elastomere in für R22 vorgesehenen Ventilen an. Diese und andere Elastomer-Dichtungen müssen deshalb bei einer Umstellung einer R22 Altanlage auf R404A ausgetauscht werden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Maximaler Anlagendruck beträgt mit R134a und R404A 25 bar. Sicherheitsmaßnahmen sind daher weniger komplex als für Anlagen mit R744 und höheren Drücken. Bei R410A-Anlagen beträgt der maximale Druck in der Praxis 28 bar [Frommann2006], was einer Verflüssigungstemperatur von 46 °C entspricht. Die meisten Komponenten werden jedoch inzwischen für 40 bar ausgelegt [Rivet2007].

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Alle Kältefirmen, z. B. Carrier/Linde, Dresdner Kühlanlagenbau, Epta etc.

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Viele

### 30. Betreiber

Mit R404A alle Supermarktketten, NK mit R134a hauptsächlich Rewe [Schmidt2007a], R410A in einem Kühl- und Gefrierlager bei Ökoring [Frommann2006].

## Quellen

[Frommann2006] Frommann, A.: Wie man Betriebskosten halbiert. Kälte Klima Aktuell 1 (2006), S. 50 - 53

[Görner2007] Görner, U.: Gespräch mit Udo Görner, EPTA Deutschland am 12.1.2007

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Rivet2007] Rivet, P.: Move to HFC 410A in Refrigeration Applications. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[Schmidt2007a] Schmidt, R.: Beitrag von Schmidt, REWE beim ersten Treffen des Expertenkreises am 28. Februar 2007 in Berlin

[Schmidt2007b] Schmidt, R.: Technologieauswahl aus Sicht der REWE Group. Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2007, Hannover, 22. – 23. November 2007

Technologie-Datenblatt zu

## 4.2 **C2:** **HFKW indirekt**

R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig (a1+b1+c2+d1+e2, siehe Tabelle 1); neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1.

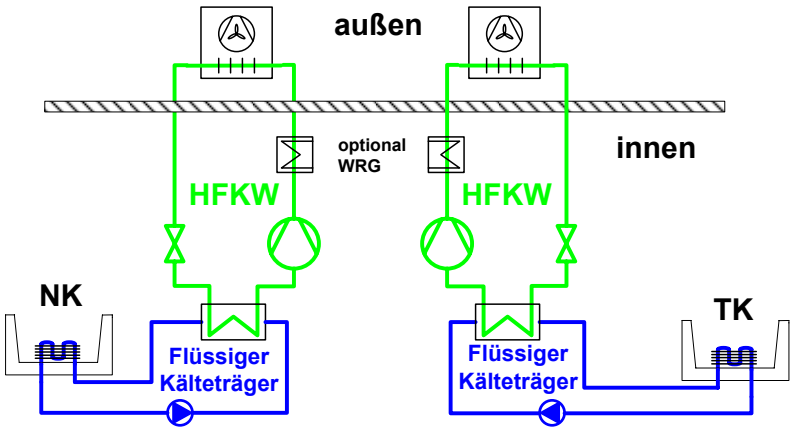



Bild C2.1: Indirekte HFKW-Kälteanlage.

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Zentrale Supermarktkälteanlage für NK und TK.

#### 2. Kälteleistungsbereich

Alle in Supermärkten vorkommenden Kälteleistungen.
Sehr gut dokumentierter amerikanischer Supermarkt hat bei 3894 $m^2$ Verkaufsfläche eine installierte Kälteleistung von 82 kW für TK und 113 kW für NK.

#### 3. Art der Kälteübertragung

Indirekt

4. Kältemittelart

R404A, R507A oder für NK auch R134a.

5. Kältemittelfüllmenge

In USA in einem 3895 $m^2$ großen Verbrauchermarkt wurden 634 kg R507A eingesetzt. Allerdings verfügt der Markt über ein umfangreiches WRG-System; ohne WRG-System wäre die Füllmenge bei ca. 230 kg gewesen [Faramarzi2004]. Für einen kanadischen Hypermarkt mit 7000 $m^2$ Verkaufsfläche und 196 kW TK sowie 410 kW NK werden 454 kg R507A verwendet [Minea2007b]. Bezogen auf die Anschlussleistung der NK- und TK-Verdichterverbünde gibt Minea eine spezifische Füllmenge von 1,63 kg/kW an, dies sei 61 % weniger als für eine vergleichbare HFKW-Direktverdampfungsanlage [Minea2007b]. Durch weitere Optimierungen im Bereich der Kältemittelleitungen und Sammler prognostiziert Minea eine Kältemittelfüllmengenreduzierung von bis zu 70 % für zukünftige Anlagen [Minea2007b].

Ein im April 2005 in Stockholm, Schweden, eröffneter Supermarkt mit 2500 $m^2$ Verkaufsfläche enthält für den NK-Bereich in zwei parallel geschalteten R404A-Anlagen jeweils 16 kg R404A. Jede der beiden Anlagen hat eine Kälteleistung von 97 kW. Die Verflüssiger werden mit einem Ethylenglykol/Wasser-Kreislauf gekühlt. Für die Tiefkühlung sind zwei parallel arbeitende R404A Anlagen mit jeweils 33 kW Kälteleistung installiert, die jeweils 14 kg R404A enthalten. Als Kälteträger kommen für NK Propylenglykol und für TK ein Formiat zum Einsatz. Alle Angaben von Mats Schenk, Frigotech während einer Besichtigung des Marktes im Juni 2007.

Ein im Juni 2007 in Stockholm, Schweden, eröffneter Supermarkt mit 1500 $m^2$ Verkaufsfläche enthält für den NK-Bereich in vier parallel geschalteten R404A-Anlagen jeweils 5 kg R404A. Jede der vier Anlagen hat eine Kälteleistung von 40 kW. Die Verflüssiger werden mit einem Ethylenglykol/Wasser-Kreislauf gekühlt. Für die Tiefkühlung sind zwei parallel arbeitende R404A Direktverdampfungsanlagen mit jeweils 12 kW Kälteleistung installiert, die jeweils 21 kg R404A enthalten. Als Kälteträger kommt für den NK-Bereich Propylenglykol zum Einsatz, welches auch die Verflüssiger der beiden TK-Anlagen kühlt. Alle Angaben von Mats Schenk, Frigotech während einer Besichtigung des Marktes im Juni 2007.

In einem amerikanischen Supermarkt wurde durch den Ersatz von einer Direktverdampfungsanlage durch eine neue Kälteträgeranlage die Kältemittelfüllmenge von 1.200 kg auf 50 kg (R507A) reduziert [Dahlberg2005].
In der Schweiz sind Kälteträgeranlagen ab Kälteleistung von 80 kW gesetzlich vorgeschrieben. NK-Anlagen enthalten bei luftgekühltem Verflüssiger und Wärmerückgewinnung ca. 2 kg HFKW pro kW Kälteleistung [Gerber2008].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Amerikanischer Supermarkt ca. 14 % durch einen Fittingbruch [Faramarzi2004]. Generell dürften die Kältemittelverluste deutlich unter denen von vergleichbaren Direktverdampfungsanlagen liegen, da die gesamte Kälteanlage auf einen Maschinenraum und evtl. den Verflüssiger im Außenbereich beschränkt ist. Insbesondere in Norwegen und Schweden werden fabrikgefertigte, hermetische Systeme verwendet, die sehr kleine Kältemittelverlustraten aufweisen [Hellsten2007].

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Faramarz2004

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

Entsorgung über Entsorgungsbetrieb.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Kälteträgeranlagen können je nach Größe und Ausführung mehr oder weniger Energie verbrauchen als vergleichbare Direktverdampfungsanlagen. Verdampfungstemperaturen von modernen Kälteträgeranlagen liegen bei ca. -31 °C für

TK und -10 °C für NK [Kaltenbrunner2007], typische Direktverdampfungsanlagen haben Verdampfungstemperaturen von -35 bzw. -14 °C [Kaltenbrunenr2007].

Linde gibt für TK-Kälteträgeranlagen mit luftgekühltem Verflüssiger einen ca. 20 % höheren Energiebedarf gegenüber Direktverdampfungsanlagen mit R404A an. Für reine NK-Anlagen schätzt Linde den Energieverbrauch ca. 10 % höher ein [Linde2007].

Eine amerikanische Studie der California Energy Commission, die zwei neu gebaute Verbrauchermärkte mit jeweils 3895 $m^2$ Verkaufsfläche – einen mit einer R404A bzw. R22 Verbundanlage und einen mit einer R507A Kälteträgeranlage – vergleicht, kommt zu dem Schluss, dass der Markt mit der indirekten Kälteanlage ca. 5 % weniger Energie verbraucht [Faramarzi2004]. Die Energieverbräuche wurden vor Ort über ein ganzes Jahr gemessen. Es wurden bei der Kälteträgeranlage speziell für Kälteträger ausgelegte Möbel verwendet, kurze Saugleitungen realisiert, ein Pumpenverbund mit entsprechend anpassbarer Pumpenleistung eingesetzt, ein Kälteträger mit niedriger Viskosität (Dynalene) verwendet sowie eine Abtauung durch Warmsole etabliert [Faramarzi2004]. Die Erwärmung des Kälteträgers für die Abtauung (Warmsole) erfolgt durch die bei der Unterkühlung des R507A anfallende Wärme. Diese Unterkühlung des R507A durch den Kälteträger steigert die Kälteleistungszahl um ca. 2 %. Durch die sehr kurzen Saugleitungen und die damit verbundenen geringen Druckverluste sowie durch die speziell auf Sole ausgelegten Wärmeüberträger in den Kühlmöbeln entsprachen die Verdichtersauggasbedingungen der Kälteträgeranlage denen der zum Vergleich dienenden Direktverdampfungsanlage [Faramarzi2004].

Ein klimatisierter kanadischer Hypermarkt mit 7.000 $m^2$ Verkaufsfläche hat 196 kW TK und 410 kW NK installiert. Beide Anlagen arbeiten mit R507A als primärem Kältemittel. Als TK-Kälteträger kommt Kaliumformiat mit einer Vorlauftemperatur von -25,2 °C (über ein Jahr ermittelter Mittelwert)[1] zum Einsatz; in der NK 35 % Propylenglykol/Wasser mit einer Vorlauftemperatur von -6 °C (ebenfalls Mittelwert eines Jahres). In beiden Kreisen sind jeweils drei Pumpen mit 5,6 kW Anschlussleistung installiert, d. h. die Pumpen machen ca. 9 % in der TK bzw. 4 % in der NK der Kälteleistung aus. Die Verdampfungstemperatur betrugen über ein Jahr

[1] In nicht klimatisierten Märkten liegt die Vorlauftemperatur im Sommer in der Regel bei -27 bis -28 °C [Schmutz2007].

gemittelt für die TK-Anlage -33 °C und für die NK-Anlage -10 °C. Der Energieverbrauch der gesamten Kälteanlage betrug bezogen auf den Quadratmeter Verkaufsfläche 27,8 W/$m^2$ oder 841 kWh/$m^2$/Jahr, was ca. 8 % weniger ist als vergleichbare kanadische Direktverdampfungssysteme verbrauchen [Minea2007b].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden und bei Kühlung der Verflüssiger über einen Wasserkreislauf, wie er häufig in Schweden eingesetzt wird, um die Kältemittelfüllmenge klein zu halten, einfacher zu realisieren. Bei luftgekühltem Verflüssiger analog zu HFKW-Direktverdampfung, d. h. C1.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Südostkalifornien, USA [Faramarzi2004], Kanada [Minea2007a+b] und Mitteleuropa [Linde2007].

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Die Kosten für eine Kälteträgeranlage sind in der Regel höher als diejenigen einer Direktverdampfungsanlage [Melinder2007].

### 15. Installationskosten

je nach verwendetem Rohrmaterial und Installationsfirma z. T. niedriger als C1.

### 16. Betriebskosten

15 % niedriger bis 15 % über C1.

### 17. Wartungsintervalle

In Zukunft je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Minea gibt für einen kanadischen Hypermarkt mit 7000 $m^2$ Verkaufsfläche für die ersten beiden Jahre 21.500 USD/Jahr als Wartungskosten an. Während dieser Zeit waren umfangreiche Verbesserungsmaßnahmen bei Kugel- und Magnetventilen der Kälteträgerkreisläufe notwendig. Für die kommenden Jahre wird mit einer Halbierung der jährlichen Wartungskosten gerechnet [Minea2007a]. Laut Minea entsprechen die bisherigen Wartungskosten in etwa denen einer Direktverdampfungsanlage für einen vergleichbaren Markt, d. h. dass eine HFKW-Anlage mit Kälteträgerkreisen für NK und TK voraussichtlich ca. 50 % niedrigere Wartungskosten haben wird [Minea2007a].

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Weltweit mehrere tausend, insbesondere in Kanada, Luxemburg, Norwegen, Schweden, der Schweiz und den USA (ca. 400 bis 500 in den USA [Bulmer2008]).

### 20. Regionale Verbreitung

Sehr verbreitet in Europa insbesondere in Luxemburg, Norwegen, Schweden und der Schweiz; es finden sich auch Anlagen in Kanada und den USA (ca. 4-500 Märkte in den USA [Bulmer2008]).

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Ca. 13 Jahre. Erste Supermarktanlagen mit Kälteträger entstanden Mitte der 1990er Jahre.

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig sofern der richtige Kälteträger verwendet wird und keine Luft in den Kälteträgerkreislauf gelangt.

### 23. evtl. besondere Probleme

In den Anfängen der Kälteträgeranlagen führten falsche Inhibitoren und/oder falsche Betriebsbedingungen zu Ausfällen der Pumpen und zu Schäden durch Korrosion an Rohrleitungen und Fittings. Inzwischen gibt es Kälteträger, die solche Probleme nicht mehr haben.

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Sehr flexibel, nichtverpackte Waren trocknen bei richtiger Einregelung des Kälteträgerkreislaufes weniger aus. Möglichkeit des Einsatzes von Kunststoffrohren für alle Kälteträgerleitungen. In den USA werden bei ca. 75 % der im Jahr 2007 erstellten Supermärkte mit Kälteträgern Kunststoffrohre verwendet [Bulmer2008].

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Gegeben, allerdings sollten aus Gründen des Energieverbrauchs keine bestehenden Möbel verwendet werden. Es sollten stattdessen für Kälteträger angepasste Wärmeüberträger eingesetzt werden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Hoch

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Zahlreiche, in den USA überwiegend Hill Phoenix.

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Nahezu alle schwedischen Supermarktketten (Hellsten2007], Coop und Migros (CH) [Gerber2008], Safeway (USA) [Faramarzi2004].

**Quellen**


[Bulmer2008] Bulmer, M.: Email von Mark Bulmer von Georg Fischer vom 8. April 2008 mit Daten zu Kälteträgeranlagen in den USA

[Dahlberg2005] Dahlberg, O.: Swede inspired refrigeration technique in USA. Scanref, 2 2005

[Farramarzi2004] Faramarzi, R.T.; Walker, D.H.: Investigation of secondary loop supermarket refrigeration systems. California Energy Commission 500-04-013, März 2004

[Gerber2008] Gerber, R.: Email von Raphael Gerber, Frigo-Consulting vom 26. Mai 2008

[Hellsten2007] Gespräch mit Jan Hellsten von Temper am 7. März 2007

[Kaltenbrunner2007] Gespräch mit Bernd Kaltenbrunner von KWN Engineering am 10.1.2007

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Melinder2007] Melinder, Å.: Aussage während seiner Doktorprüfung am 8. Juni 2007 in Stockholm.

[Minea2007a] Minea, V.: Energy Efficiency of a Supermarket Refrigeration/Heat Recovery System with Secondary Fluids. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[Minea2007b] Minea, V.: Supermarket Refrigeration System with completely secondary loops. ASHRAE Journal 49, 9 (2007), S. 40 – 56

[Schmutz2007] Schmutz, Beat: Email vom 25.09.2007

Technologie-Datenblatt zu

## 4.3 C3: HFKW indirekt flüssig + verdampfend

R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung und verdampfend für Tiefkühlung (a1+b1+c2+d1+e3 siehe Tabelle 1), siehe auch Technologiedatenblatt C7 für $CO_2$ als Kälteträger. Neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1. Es findet sich auch mindestens eine Anlage mit schmelzendem Kälteträger für die Normalkühlung (siehe C4 für den Eisbreiteil in der NK). Einzelne Anlagen sind mit R717 anstelle R404A ausgeführt [Kauffeld1995].

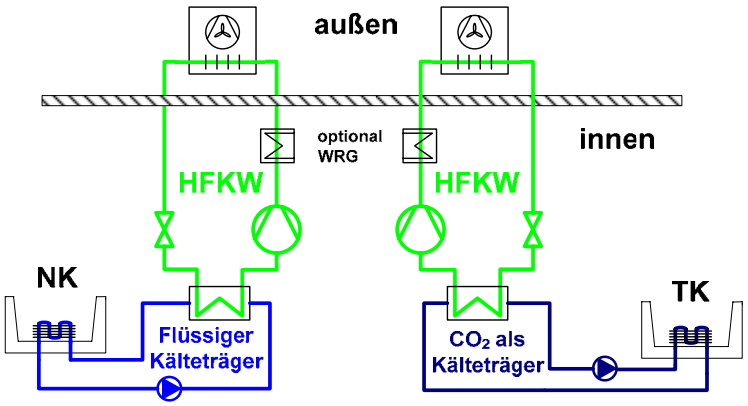



Bild C3.1: HFKW indirekt NK flüssiger Kälteträger, TK verdampfendes $CO_2$ als Kälteträger.

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Supermarktkälteanlage

2. Kälteleistungsbereich

Alle

3. Art der Kälteübertragung

NK und TK indirekt.

4. Kältemittelart

Primäres Kältemittel in der Regel R404A – einzelne Anlagen verwenden R717 [Kauffeld1995], als flüssiger NK-Kälteträger kommt in der Regel Propylenglykol und als verdampfender TK-Kälteträger kommt in der Regel $CO_2$ zum Einsatz.

5. Kältemittelfüllmenge

Ein 15.000 $m^2$, davon 6.100 $m^2$ frische Lebensmittel, großes SB-Warenhaus in Frankreich hat bei einer Kälteleistung von 1.104 kW Kälteleistung, davon 232 kW TK mit verdampfendem $CO_2$ (67 m Tiefkühlregale, 34 m Tiefkühltruhen und 225 $m^3$ bzw. 80 $m^2$ Tiefkühlräume) und 872 kW NK mit Eisbrei (siehe C4), eine R404A-Füllmenge von 600 kg für NK (Eisbrei) und 300 kg für TK; eine vergleichbare Direktverdampfungsanlage hätte ca. 2.000 kg Füllmenge im NK-Bereich und 1.200 kg im TK-Bereich [Lagrabette2005]. Die $CO_2$-Füllmenge beträgt 1.200 kg in vier Kreisläufen [Lagrabette2005].

Ein schwedischer Supermarkt mit 14.000 $m^2$ Fläche enthält für 165 kW TK 450 kg $CO_2$ [Arias2004].

Ein schwedischer Supermarkt mit einer Kälteleistung von 165 kW 20 kW im TK-Bereich enthält 450 kg CO2 [Sawalha2008].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Keine Kältemittelverluste [Lagrabette2005], jedoch dürften auch diese Anlagen in der Praxis Leckagen aufweisen.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Erfahrungen aus einem (!) französischem Verbrauchermarkt [Lagrabette2005].

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

HFKW Entsorgung über Fachbetrieb, $CO_2$ kann auch in die Umwelt abgeblasen werden. Bei Verwendung von $CO_2$ als Kälteträger ist dieses ölfrei.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Einschätzung für NK: bis zu 10 % höher. TK-Anlage mit verdampfenden $CO_2$ als Kälteträger: ca. 6 % höherer Energiebedarf gegenüber Direktverdampfung mit R404A [Linde2007].

In einem französischen Verbrauchermarkt verbraucht die TK-Anlage mit verdampfendem $CO_2$ genauso viel Energie wie eine vergleichbare R404A Direktverdampfungsanlage [Lagrabette2005].

Eine TK-Anlage in einem amerikanischen Supermarkt verbraucht weniger Energie als eine vergleichbare HFKW-Direktverdampfungsanlage [Martin2006]. Energetische Vorteile ergeben sich insbesondere durch die überflutete Verdampfung [Martin 2006].

11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden.

12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Frankreich [Lagrabette2005], Deutschland und die Schweiz [Linde2007].

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Bis zu 20 % höher als bei C1.

### 15. Installationskosten

Je nach verwendetem Rohrmaterial und Installationsfirma z. T. niedriger als C1.

### 16. Betriebskosten

Ähnlich C1, niedriger als C2.

### 17. Wartungsintervalle

In Zukunft je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Bis zu 50 % niedriger als C1.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Ca. 100 bis Mitte 2005, hauptsächlich in Skandinavien [Sawalha2005].

### 20. Regionale Verbreitung

U. a. Schweden und Schweiz, z. T. auch mit R717 als primärem Kältemittel.

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Erste Märkte mit $CO_2$ als Kälteträger (allerdings mit R717 als primärem Kältemittel) wurden Mitte der 1990er Jahre in der Schweiz bei Migros [Schmutz2007] und bei ICA Fokus in Schweden gebaut [Kauffeld1995].

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

### 23. evtl. besondere Probleme

Hohe Stillstandsdrücke im TK-Kälteträgerteil. $CO_2$ hat z. B. bei +5 °C einen Druck von 40 bar – deutlich mehr, als der maximale Betriebsdruck der meisten im TK-Teil verwendeten Komponenten. Ein Verbrauchermarkt in Frankreich kann ca. 1 Stunde Stillstand vertragen, bevor $CO_2$ abgeblasen wird [Lagrabette2005].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Im TK-Bereich können herkömmliche für Direktverdampfung konstruierte Möbel eingesetzt werden. Es ist lediglich das Expansionsventil durch ein einfaches Regulierventil zu ersetzen [Lagrabette2005].

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Vorhanden. TK-Möbel können nach Reinigung der Kältemittelseite und Austausch der Ventile weiterverwendet werden [Lagrabette2005].

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Hohe Drücke im $CO_2$-TK-Kreis, Sicherheitsventile und $CO_2$-Sensoren erforderlich.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Zahlreiche.

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Viele.

### 30. Betreiber

Einige in Dänemark, Frankreich, Schweden und der Schweiz.

## Quellen

[Arais2004] Arias, J.; Claesson, J.; Sawalha, S.; Rogstam, J.: Effektivare Kyla – en inventring. Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2004

[Kauffeld1995] Kauffeld, M.: Neue $NH_3$-Technologie – $NH_3$ mit $CO_2$ als Kälteträger. Die Kälte- und Klimatechnik, 11 (1995), S. 931 - 932

[Lagrabette2005] Lagrabette, O.: Kältetechnik im Einzelhandel – Carrefour setzt auf die “grünen” Medien. KKA 1 (2005), S. 20 - 24

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Martin2006] Martin, S.: $CO_2$ low temperature refrigeration systems for Supermarkets. 2006 Energy and Technical Services Conference des Food Marketing Institutes, Phoenix, 10. – 13. September 2006

[Sawalha2005] Sawalha, S.: Using $CO_2$ in Supermarket Refrigeration. ASHRAE Journal, 8 (2005), S. 26 – 30

[Sawalha2008] Sawalha, S.: Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration. Dissertation Royal Inst. Of Technology, Stockholm, Sweden 2008, Trita REFR Report No. 08/60 ISSN 1102-0245

[Schmutz2007] Schmutz, Beat: Email vom 25.09.2007

Technologie-Datenblatt zu

## 4.4 C4: HFKW indirekt Eisbrei

R404A Kompaktanlage mit Kälteträger Eisbrei für Normalkühlung und Direktverdampfung für die Tiefkühlung (a1+b1+c4+d1+e1 siehe Tabelle 1); neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1. Es finden sich auch Anlagen die für den TK-Bereich Kälteträger einsetzen, diese können flüssig oder verdampfend sein.

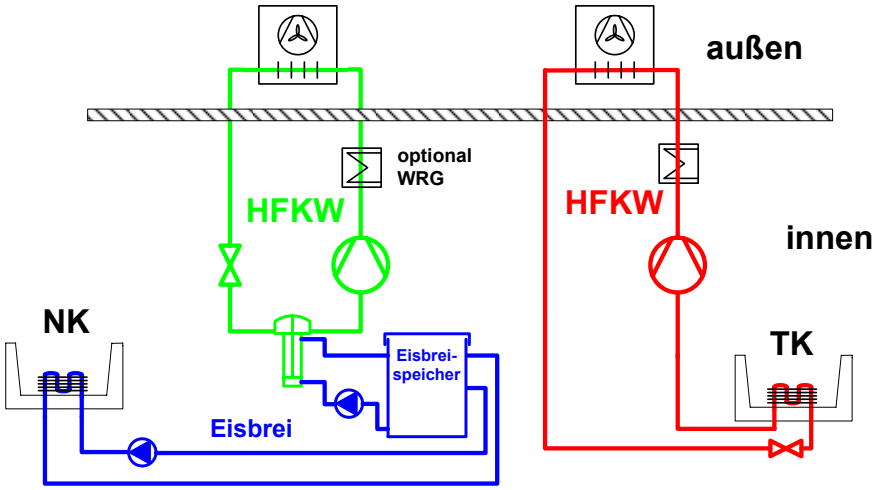



Bild C4.1: HFKW Normalkühlung mit Eisbrei, Tiefkühlung Direktverdampfung.

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Zentrale Supermarktkälteanlage; in ausgeführten Anlagen wird Eisbrei bisher nur für NK eingesetzt; es gibt jedoch entsprechende Forschungsvorhaben, die die energetische Überlegenheit gegenüber einphasigen Kälteträgern auch für den TK-Bereich demonstriert haben [Hägg2005].

#### 2. Kälteleistungsbereich

In Supermärkten hauptsächlich von ca. 10 bis 100 kW, mit einzelnen Ausnahmen bis 800 kW [Rivet2007]. In Japan in Klimaanlagen auch Kälteleistungen bis zu mehreren MW. Bei Ausnutzung der Kältespeicherfähigkeit des Eisbreis kann die Kälteanlage 15 bis 30 % kleiner ausgeführt werden [Rivet2007].

Ein 15.000 $m^2$, davon 6.100 $m^2$ frische Lebensmittel, großes SB-Warenhaus in Frankreich hat 1.104 kW Kälteleistung, davon 232 TK mit verdampfendem $CO_2$ und 872 NK mit Eisbrei. Die vier Eisbreierzeuger haben nur eine Kälteleistung von 680 kW, der Rest wird über einen 50 $m^3$ großen Kältespeicher abgepuffert [Lagrabette2005]. Der Verbrauchermarkt verfügt im mit Eisbrei betriebenen NK-Bereich über 188 m Normalkühlregale, 61 m halbhohe Normalkühlmöbel, 160 m Normalkühltruhen und Displays und 2865 $m^3$ bzw. 995 $m^2$ Normalkühlräume; Im mit $CO_2$ betriebenen TK-Bereich befinden sich 67 m Tiefkühlregale, 34 m Tiefkühltruhen und 225 $m^3$ bzw. 80 $m^2$ Tiefkühlräume [Lagrabette2005].

In der Schweiz drei Supermärkte mit Eisbrei in der Normalkühlung mit jeweils 28 kW bzw. 39,4 kW [Weissenborn2006].

### 3. Art der Kälteübertragung

NK: Indirekt mittels schmelzendem Eisbrei.
TK: Direkt; einzelne Systeme haben auch für TK eine indirekte Kälteverteilung mit Eisbrei, jedoch wird der Eisbrei bei tiefen Temperaturen sehr zähflüssig.

### 4. Kältemittelart

R404A, bei wenigen Anlagen auch R717, als primäres Kältemittel. Eine schweizer Anlage arbeitet mit R134a für die Eisbreierzeugung [Weissenborn2006]. In Europa überwiegend Wasser-Ethanol-Gemische für den Eisbrei; in Japan häufiger Wasser-Glykol-Gemische. Bei der ebenfalls möglichen Lebensmitteldirektkühlung mit Eisbrei wird in der Regel Natriumchlorid-Wasser eingesetzt.

### 5. Kältemittelfüllmenge

In der NK 70 – 80 % unterhalb der von Direktverdampfungssystemen [Rivet2007]; TK entspricht derjenigen von Direktverdampfungsanlagen – siehe C1.

Ein 15.000 $m^2$, davon 6.100 $m^2$ frische Lebensmittel, großes SB-Warenhaus in Frankreich hat 1.104 kW Kälteleistung, davon 232 kW TK mit verdampfendem $CO_2$ und 872 kW NK mit Eisbrei; die R404A-Füllmenge dieses Marktes beträgt 600 kg; eine vergleichbare Direktverdampfungsanlage hätte ca. 2.000 kg Füllmenge [Lagrabette2005].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Keine Kältemittelverluste [Lagrabette2005], jedoch dürften auch diese Anlagen in der Praxis Leckagen aufweisen.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Erfahrungen aus einem französischem Verbrauchermarkt [Lagrabette2005].

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

Entsorgung über Entsorgungsbetrieb.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Ca. 10 % niedriger als der von einer vergleichbaren Kälteträgeranlage mit einphasigem Kälteträger [Rivet2007]. Eisbrei hat einen bis zu doppelt so guten Wärmeübergang und einen bis zu achtmal größeren Wärmeinhalt als ein einphasiger Kälteträger. Die umzupumpenden Mengen reduzieren sich deshalb beträchtlich. Da der Druckverlust beim Pumpen von Eisbrei nur unwesentlich über demjenigen eines einphasigen Kälteträgers liegt, reduziert sich der Energieverbrauch für die Pumpen [Kauffeld1999].

Der Energieverbrauch kann unter dem einer vergleichbaren Direktverdampfungsanlage liegen, da bei einer Direktverdampfungsanlage häufig durch die Überhitzung des Kältemittels in den Verdampfern tiefere Verdampfungstemperaturen erforderlich sind.

Diese führen wiederum zu einer stärkeren Vereisung der Verdampfer und damit verbundene Abtauverluste. Auch sind die Saugleitungen in Direktverdampfungsanlagen in Supermärkten zum Teil sehr lang. Lange Saugleitungen führen zu Druckverlusten und damit zu einer höheren erforderlichen Verdichterleistung [Rivet2007]. Messungen im Labor und Berechnungen für einen Supermarkt mit 20 kW Kälteleistung für NK ergaben ca. 3 % geringeren Energieverbrauch mit einer Eisbreianlage im Vergleich zu einer Direktverdampfungsanlage [Sieger-Koser2003].

Durch die Möglichkeit der Kältespeicherung mit Eisbrei kann die primäre Kälteanlage zu Zeiten betrieben werden, bei denen die Außenlufttemperatur niedrig ist. Dadurch kann der Energieverbrauch gesenkt werden [Rivet2007]. Der Spitzenstrombedarf sinkt durch die Kältespeicherung ebenfalls. So beträgt er in einem französischen SB-Warenhaus 1.500 kWh gegenüber 1.800 kWh für eine Direktverdampfungsanlage [Lagrabette2005].

Ausgeführte Eisbreianlagen können jedoch auch mehr Energie verbrauchen als vergleichbare Direktverdampfungsanlagen. Dies insbesondere, wenn die Anlagen falsch betrieben werden und z. B. die Regelung für eine zu tiefe Verdampfungstemperatur sorgt [Rivet2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

Im französischen Verbrauchermarkt erfolgt die Abtauung durch einfache Schleifen-rückführung des Eisbreis, d. h. ohne elektrische Abtauung und ohne Warmgas [Lagrabette2005]. Dadurch dass die Oberflächentemperatur der mit Eisbrei betriebenen NK-Wärmeüberträger höher ist als beim Betrieb mit einphasigem flüssigem Kälteträger oder beim Betrieb mit direktverdampfendem Kältemittel, muss seltener abgetaut werden [Lagrabette2005].

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Frankreich

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Über denen von vergleichbaren Kälteträgeranlagen mit einphasigen Kälteträgern, da die gängigen Eisbreigeneratoren verhältnismäßig teuer sind. Durch den Einsatz eines Eisspeichers kann jedoch die primäre Kälteanlage kleiner ausgeführt und dadurch Kosten gespart werden.

### 15. Installationskosten

Niedriger als die einer vergleichbaren Kälteträgeranlage mit einphasigem Kälteträger, da die Rohrleitungen, Pumpen und Ventile auf Grund des höheren Wärmeinhalts von Eisbrei kleiner gewählt werden können [Rivet2007]. Die Isolierung wird dann ebenfalls deutlich preiswerter [Rivet2007].

### 16. Betriebskosten

Energiekosten niedriger als für ein vergleichbares System mit flüssigem Kälteträger ohne Phasenwechsel; allerdings höhere Ausgaben für Service, da die heute gebräuchlichen Eisbreigeneratoren Verschleißteile beinhalten, z. B. die Schaber.

Energiekosten können in Gegenden wo es Tagesschwankungen im Strompreis gibt, durch die Möglichkeit der Kältespeicherung reduziert werden. Eisbrei wird dann z. B. mit preiswertem Nachtstrom erzeugt und die Verdichter und Eisbreierzeuger der Kälteanlage stehen während des Tages. Dies ist der Hauptgrund, weshalb es in Japan weit über 3000 Eisbreianlagen in allen Bereichen der Kältetechnik, Gebäudeklimatisierung, Kühllager, Brauereien, Schlachthöfe etc. gibt.

### 17. Wartungsintervalle

Für den Eisbreigenerator zurzeit noch häufiger als bei einer Direktverdampfungsanlage; zweimal anstatt einmal im Jahr. Allerdings fallen evtl.

Probleme mit Ölrückführung, KältemittelKältemittelverlusten im Markt, defekte Expansionsventile etc. [Lagrabette2005]. Für die Kälteanlage in Zukunft je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Ähnlich denen einer HFKW-Direktverdampfungsanlage (C1).

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Eisbreianlagen in Europa in Supermärkten zwischen 10 und 50. In Japan wird Eisbrei sehr häufig für Kühlhäuser, Gebäudeklimatisierung und Prozesskühlung eingesetzt; es finden sich dort weit über 3.000 Anlagen mit zum Teil sehr großen Kälteleistungen (bis 4 MW) [Kauffeld2005].

### 20. Regionale Verbreitung

Hauptsächlich Japan – hervorgerufen durch die starken tageszeitlichen Schwankungen im Strompreis. In Europa sind Anlagen in Frankreich und der Schweiz bekannt.

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Erste Anlagen in Supermärkten in der Schweiz, Frankreich und den Niederlanden in 1995 [Rivet2007]. In Japan seit Anfang der 1990er-Jahre [Kauffeld2005]. Französischer Verbrauchermarkt seit 2003 [Lagrabette2003].

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Wenn man den richtigen Eisbreierzeuger einsetzt und diesen entsprechend wartet, sehr zuverlässig.

### 23. evtl. besondere Probleme

Wenn die Anlage von mit Eisbrei unerfahrenen Personen aufgebaut wird, kann es Probleme im Betrieb geben, z. B. Verstopfungen, schlechtes Mischverhalten im Speicherbehälter u. a..

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Hohe Flexibilität. Eisbreileitungen lassen sich für größere Flexibilität auch als Schlauchleitungen ausführen. Durch den Einsatz eines Eisbreispeichers lassen sich Lastspitzen abfangen. Der elektrische Anschlusswert des Supermarktes kann dadurch kleiner und damit preiswerter ausfallen [Lagrabette2005].

Durch die im Vergleich zu einer Direktverdampfungsanlage höhere Oberflächentemperatur der in den Kühlmöbeln befindlichen Wärmeüberträger, bleibt die umgewälzte Luft feuchter und die Waren werden weniger ausgetrocknet [Lagrabette2005]. Bei den meisten Produkten wirkt sich dies positiv auf den Verkaufspreis aus. Die höhere Wärmeüberträgertemperatur vermeidet auch das Einfrieren derjenigen Waren, die dicht am Wärmeüberträger liegen. Etwas das bei Direktverdampfungsanlagen manchmal auftreten kann [Lagrabette2005].

Es kommt ebenfalls durch die Abtauung im reinen Umluftbetrieb ohne elektrische Heizelemente nicht zu Temperaturanstiegen eines Teils der Ware während des Abtauvorgangs, wie er bei Direktverdampfungsanlagen auftreten kann [Lagrabette2005].

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Vorhanden, jedoch können für den Eisbreiteil keine Komponenten weiterverwendet werden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sehr sicher.

**Bezugsquellen**

27. Hersteller

Wenige, Eisbrei z. B. Axima (D), Heatcraft (F), Sunwell (CAN) u. a.

28. evtl. Importeur

Axima importiert Sunwell Eisbreianlagen.

29. Komponentenhersteller

Eisbreierzeuger: Heatcraft (F), Sunwell (CAN), Müller (USA)

30. Betreiber

Migros (CH), Carrefour (F)

**Quellen**

[Hägg2005] Hägg, C.: Ice Slurry as secondary fluid in refrigeration systems. KTH Stockholm, Schweden, ISBN 91-7178-192-7

[Kauffeld1999] Kauffeld, M.; Christensen, K.G.; Lund, S.; Hansen, T.: Experience with ice slurry. XX$^{th}$ Int. Congress of Refrigeration, Sydney, Australia, 19 – 24 September 1999

[Kauffeld2005] Kauffeld, M.; Kawaji, M.; Egolf, P.W.: Handbook on Ice Slurries – Fundamentals and Engineering. IIFIIR 2005, ISBN 2-913149-42-1

[Lagrabette2005] Lagrabette, O.: Kältetechnik im Einzelhandel – Carrefour setzt auf die “grünen” Medien. KKA 1 (2005), S. 20 - 24

[Rivet2007] Rivet, P.: Ice Slurries: State of the Art. IIFIIR Bulletin 2007-1

[Sieger-Koser2003] Sieger-Koser, U.; Herfurth, T.: Drehzahlregelung oder FLO-ICE? Ein Vergleich von Energieverbrauch und Kosten. ki Luft- und Kältetechnik, 9 (2003), S 390 – 393

[Weissenborn2006] Weissenborn, P.: Goetz AG, Interlaken. Die Kälte & Klimatechnik 11 (2006), S. 28 - 40

Technologie-Datenblatt zu

## 4.5 **C5: HFKW/R744-Kaskade**

R404A Direktverdampfung für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung (a1+b1+c1+d4+e1, siehe Tabelle 1).

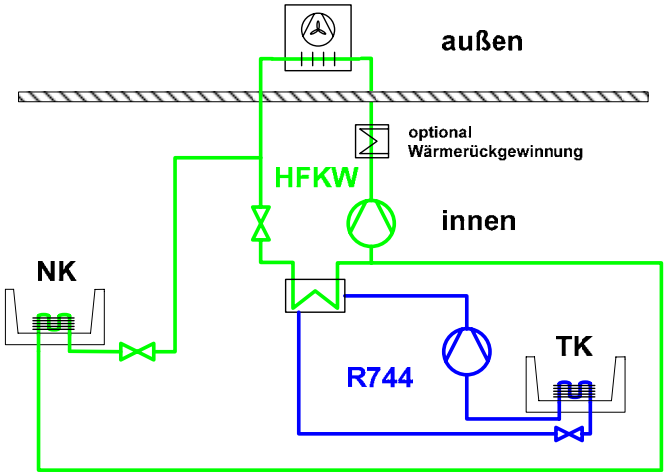



Bild C5.1: HFKW / R744 Kaskade

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

2. Kälteleistungsbereich

40 kW bis 1000 kW möglich; bisher von Linde installiert im TK-Bereich 14 bis 81 kW [Sienel2007]. Von Linde serienmäßig verfügbar als R744-TK-Anlage von 10 bis 120 kW [Sienel2007].

3. Art der Kälteübertragung

NK HFKW direkt, TK R744 direkt

4. Kältemittelart

NK meist R404A, in Deutschland einzelne Anlagen mit R134a, welches bessere Kälteleistungszahlen erzielt als R404A; TK R744 als Kaskade zur NK-Anlage.

In Dänemark hat die Supermarktkette Føtex ca. 100 Anlagen mit NK R134a und TK R744 als Kaskade in Betrieb [Madsen2007]. Darüber hinaus gibt es einzelne Anlagen mit R410A für NK und R744 für TK [Callesen2006].

5. Kältemittelfüllmenge

Eine Anlage in einem 5000 $m^2$ EDEKA-Markt enthält für NK (268 kW Kälteleistung) 1150 kg R404A und für TK (34,5 kW Kälteleistung) 70 kg R744 [Post2007].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

HFKW-Verlustraten niedriger als bei C1.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

HFKW Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

NK-Anlage siehe C1. R744-TK-Anlage energetisch gleichwertig zu R404A-DX [Heinbokel2003, Linde2007]. Durch bessere Wärmeübergangseigenschaften und geringere Druckverluste in der Saugleitung ist die Verdichtersauggastemperatur ca. 3 K höher als bei vergleichbaren R404A Direktverdampfungsanlagen, der Energieverbrauch der Kaskadenanlage damit dem einer HFKW-Anlage (C1) vergleichbar [Sienel2007]. Bei hohen Verflüssigungstemperaturen ist der Energieverbrauch der HFKW/R744 Kaskade niedriger als derjenige vergleichbarer einstufiger HFKW-Anlagen, bei 49 °C Verflüssigungstemperatur z. B. 5 % [Rees2007].

Bei spezieller Anpassung der TK-Anlage an das Kältemittel R744 lässt sich der Energieverbrauch um bis zu 50 % reduzieren [Kulde2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen; gleichwertig zu herkömmlicher HFKW-Anlage.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Viele der in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen Maßnahmen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Deutschland und Norwegen.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

R744-TK-Anlage: keine höheren Investitionskosten im Vergleich zu R404A-Direktverdampfungs-Systemen [Heinbokel2003, Linde2007]. Bei der R744-Tiefkühlkälteanlage (in Kaskade zu R404A) eines 5000 $m^2$ großen EDEKA-Marktes mit einer TK-

Kälteleistung von 34,5 kW haben die Einsparungen bei den Rohrleitungen und beim Kältemittel (70 kg R744 gegenüber ca. 140 kg R404A einer vergleichbaren Anlage) die Mehrkosten bei den Verdichtern, Sicherheitsventilen und Gassensorik aufgewogen [Post2007].

15. Installationskosten

Je nach Anlagengröße zwischen 0 und 10 % höher als C1.

16. Betriebskosten

Zwischen 0 und 5 % niedriger als C1.

17. Wartungsintervalle

In Zukunft je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr.

18. Wartungskosten

Denen einer vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlage vergleichbar.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Bis 2006 wurden insgesamt ca. 90 TK-Anlagen von Linde in 7 europäischen Ländern gebaut [Linde2007]. Bis August 2007 hat Linde weit über 100 derartige Anlagen mit einer Kälteleistung von insgesamt über 4000 kW gebaut [Sienel2007]. Von Norild wurden bis Ende 2006 in Norwegen 27 Supermärkte mit derartigen Anlagen ausgerüstet [Kulde2007]. Insgesamt in der EU von allen Herstellern vermutlich mehrere hundert.

20. Regionale Verbreitung

Linde-Anlagen finden sich in Dänemark (15), Deutschland (6), Italien (18), Luxemburg (12), Norwegen (18), Schweden (7) und der Schweiz (14) – die Zahlen in Klammern geben die bis 2006 im jeweiligen Land erstellten Anlagen an [Sienel2007].

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Ca. 5 Jahre in ausgeführten Supermarktkälteanlagen; davor bereits seit 1995 Erfahrungen mit R744-TK-Anlagen mit diversen Laboranlagen z. B. am Dänischen Technologischen Institut [Kauffeld1995].

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Im Stillstand steigt die Temperatur der R744-TK-Stufe und damit auch der Druck. Der maximale Auslegungsdruck beträgt in der Regel 40 bar. Darüber wird R744 in die Atmosphäre abgeblasen [Sienel2007].

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Die große Dichte des R744-Dampfes führt zu sehr kleinen Saugleitungen und Verdichtern. $CO_2$ hat sehr gute Wärmeübergangseigenschaften, weshalb die Verdampfungstemperatur im TK-Teil höher als bei einer vergleichbaren HFKW-Anlage sein können [Sienel2007].

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

HFKW NK-Teil problemlos. Um für den R744-TK-Teil alle Vorteile ausschöpfen zu können, ist eine Neuinstallation nötig. Alle Bauteile können und sollten bei R744 deutlich kleiner gewählt werden.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Der gesamte R744-Kreislauf der TK-Stufe wird auf einen Druck von 40 bar begrenzt [Sienel2007]. Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Carrier/Linde, EPTA, Knudsen Køling, Norild, Superkøl und viele weitere. Derartige Anlagen sind inzwischen Stand der Technik auch für kleinere Betriebe.

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Viele.

### 30. Betreiber

Nahezu alle Supermarktketten.

## Quellen


[Callesen2006] Callesen, J.C.: $CO_2$ in Food Retail Applications. 2006 Energy and Technical Services Conference des Food Marketing Institutes, Phoenix, 10. – 13. September 2006

[Heinbokel2003] Heinbokel, B.: Alternative Kältemittel für Supermarkt-Kälteanlagen. 19th Refrigeration and Air Conditioning Conference, 8 – 10 Mai 2003 Balatonszéplak

[Kauffeld1995] Kauffeld, M.: Neue $NH_3$-Technologie – $NH_3$ mit $CO_2$ als Kälteträger. Die Kälte- und Klimatechnik, 11 (1995), S. 931 – 932

[Kulde2007] Kulde: $CO_2$-fryseanlegg (Norild) til 27 butikker. Kulde 22, 1 (2007), S. 40

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Madsen2007] Madsen, K.: Gespräch mit Kenneth Madsen vom Dänischen Technologischen Institut am 11. April 2007

[Post2007] Post: Gespräch mit Herrn Post, Linde am 7.2.2007 im Gebauer EDEKA aktiv Markt Filderstadt.

[Rees2007] Rees, B.; Rohrer, C.; Shapiro, D.; Trachta, J.: Performance testing and comparison of liquid overfeed and cascade $CO_2$ systems with R404A primary. IIR ICR 2007, Beijing, Cina, B2-123

[Sienel2007] Sienel, T.; Finckh, O.: $CO_2$-DX Systems for Medium- and Low-Temperature Refrigeration in Supermarket Applications. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

Technologie-Datenblatt zu

## 4.6 C6: HFKW indirekt/R744-Kaskade

R404A Kompaktanlage mit Kälteträger flüssig für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung (a1+b1+c2+d4+e1, siehe Tabelle 1); neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1.

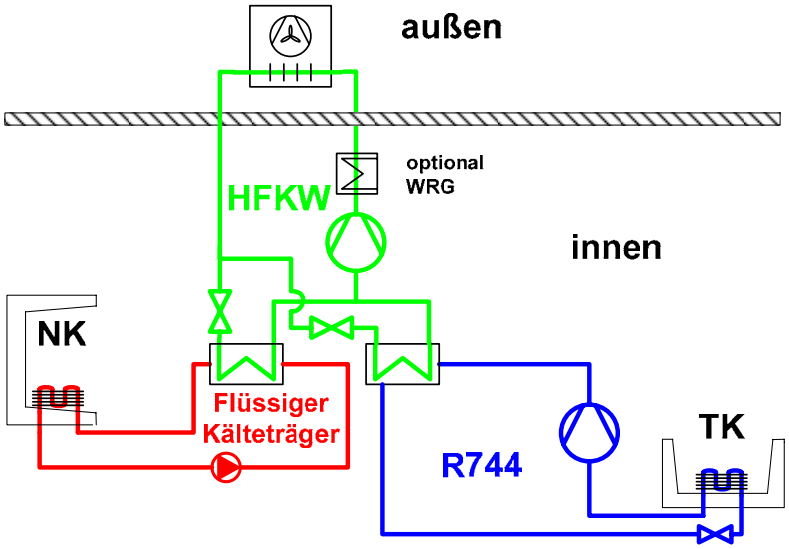



Bild C6.1: HFKW / R744 Kaskade – in Schweden ist eine Variante mit R404A anstelle von R744 im TK-Teil sehr verbreitet [Sawalha2007].

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

#### 2. Kälteleistungsbereich

Alle Leistungen möglich.

#### 3. Art der Kälteübertragung

NK indirekt, TK R744 direkt

In Schweden häufig auch mit R404A im TK-Teil [Sawalha2007].

4. Kältemittelart

Bei REWE ein Markt in Betrieb mit R134a für NK und R744 als Kaskade für TK [Schmidt2007].

In Norwegen überwiegend R507A mit 39 % Propylenglykol/Wasser als Kälteträger für NK und R744 für TK [Frogner2005].

In Schweden häufig auch mit R404A im TK-Teil [Sawalha2007].

Die Goetz AG hat in der Schweiz in den Jahren 2003 und 2006 drei Märkte mit R404A für die Kühlung des NK-Kälteträgers und einer R744-Kaskade für TK gebaut [Weissenborn2006].

5. Kältemittelfüllmenge

NK-Anlage ca. 60 % weniger HFKW als C1.
Typische $CO_2$-Fülmengen betragen 200 bis 290 kg bei TK-Kälteleistungen von 41 bis 66 kW, entsprechend einer spezifischen Füllmenge von 4,8 bis 5,6 kg/kW [Heinbokel2001]. In der Schweiz sind $CO_2$-Fülmengen von 3 kg/kW üblich [Gerber2008].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

HFKW-Verlustraten niedriger als bei C1.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

HFKW Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Ca. 15 % weniger Energieverbrauch als indirekte Kälteanlagen [Frogner2005].
NK-Anlage siehe C2; TK-Anlage siehe C5 [Linde2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Norwegen und Schweiz.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Bei der R744-Tiefkühlkälteanlage (in Kaskade zu R404A) eines 5000 $m^2$ großen EDEKA-Marktes mit einer Kälteleistung von 34,5 kW haben die Einsparungen bei den Rohrleitungen und beim Kältemittel (70 kg R744 gegenüber ca. 140 kg R404A einer vergleichbaren Anlage) die Mehrkosten bei den Verdichtern, Sicherheitsventilen und Gassensorik aufgewogen [Post2007].

### 15. Installationskosten

Je nach Anlagengröße zwischen 0 und 10 % höher als C1.

16. Betriebskosten

Zwischen 5 und 10 % niedriger als C1.

17. Wartungsintervalle

In Zukunft je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

18. Wartungskosten

Unter denen einer vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlage (C1).

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Linde hat im Zeitraum 2000 bis 2005 über 100 R744-TK-Kaskadenanlagen geliefert, die meisten davon jedoch nicht mit Kälteträger für NK [Frogner2005]. Die Goetz AG hat in den Jahren 2003 und 2006 drei derartige Anlagen in der Schweiz installiert [Weissenborn2006].

20. Regionale Verbreitung

Überall in Europa.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit Ende der 1990er Jahre.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Bei Stillstand der Anlage treten hohe Drücke im TK-Teil der Anlage auf. Da die meisten Komponenten nur bis 25 bzw. 40 bar ausgelegt sind, wird bei Überschreiten dieses

Druckes R744 über die Sicherheitsventile abgeblasen. Dies geschieht bei in Betrieb befindlichen Anlagen bei Stromausfall nach ca. 2 bis 3 Stunden. Nach 6 Stunden Stromausfall sind ca. 15 bis 20 % der R744-Füllmenge aus der Anlage entwichen und müssen von einem Monteur nachgefüllt werden [Frogner2005].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Sehr flexibel, unverpackte NK-Waren trocknen weniger aus, TK-Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Bedingt vorhanden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].
Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Carrier/Linde, Goetz, Truttmann, Liechti, Unifroid

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Norwegen: 2005 5 Anlagen bei Coop, 2 Anlagen bei ICA, je 1 bei Eide Mat und CC-Gjøvik [Frogner2005]. Schweiz 2 Anlagen bei Coop und eine bei Migros [Weissenborn2006].

**Quellen**


[Frogner2005] Frogner, V.: $CO_2$ i dagligvarehandelen. FOKU Seminar, 29.11.2005

[Gerber2008] Gerber, R.: Email von Raphael Gerber, Frigo-Consulting vom 26. Mai 2008

[Heinbokel2001] Heinbokel, B.: $CO_2$ als Kälteträger und Kältemittel in der Supermarkt-Tiefkühlung. ki Luft- und Kältetechnik 37, 10 (2001), S. 484 – 488

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Post2007] Post: Gespräch mit Herrn Post, Linde am 7.2.2007 im Gebauer EDEKA aktiv Markt Filderstadt.

[Sawalha2007] Sawlha, S.; et al.: Experimental investigation of $NH_3/CO_2$ cascade system and comparison to R404A system for supermarket refrigeration. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Schmidt2007] Schmidt, R.: Beitrag von Schmidt, REWE beim ersten Treffen des Expertenkreises am 28. Februar 2007 in Berlin

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 – 33

[Weissenborn2006] Weissenborn, P.: Goetz AG, Interlaken. Die Kälte & Klimatechnik 11 (2006), S. 28 – 40

Technologie-Datenblatt zu

## 4.7 C7: HFKW/R744-Kaskade – NK $CO_2$

HFKW/R744 Kaskade – NK indirekt mit $CO_2$ im Pumpenumlauf (Verdampfung zu ca. 50 %). R134a, R404A oder R507A Kompaktanlage mit verdampfendem Kälteträger (R744) für Normalkühlung sowie einer R744 Kaskade für die Tiefkühlung (a1+b1+c3+d4+e1, siehe Tabelle 1); neben luftgekühlten Verflüssigern wird hier zum Teil, um die Kältemittelfüllmenge gering zu halten, mit wassergekühlten Verflüssigern gearbeitet, d. h. a2 oder a3 anstelle von a1.

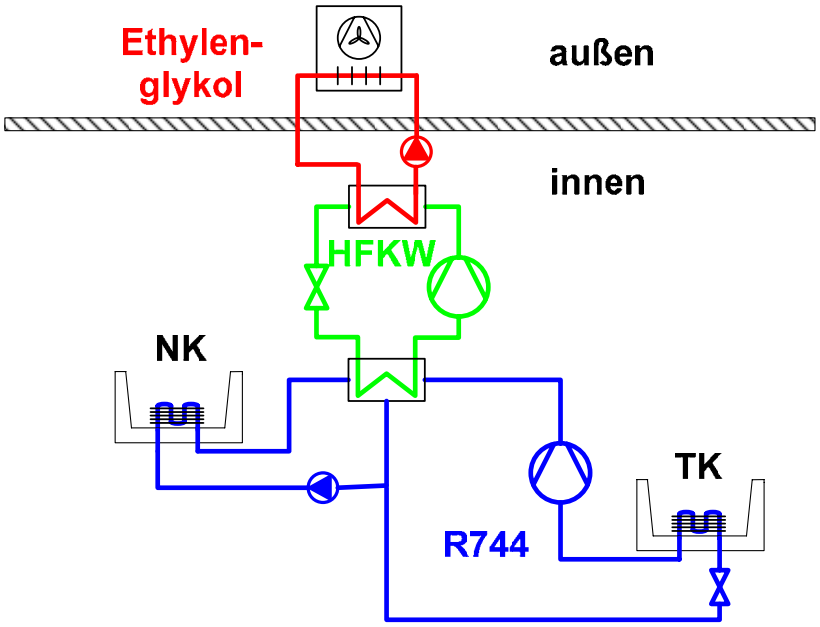



Bild C7.1: Kaskadenkälteanlage mit HFKW in einem kompakten Kühlsatz. Verflüssigung mit Ethylenglykol welches an der Außenluft gekühlt wird. Normalkühlung (NK) und Tiefkühlung (TK) mit R744; in der NK mit Pumpenumlauf in der TK als Direktverdampfung.

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

2. Kälteleistungsbereich

Alle Bereiche möglich.

3. Art der Kälteübertragung

NK $CO_2$ indirekt, TK R744 direkt.

In Dänemark verwendet ein Hersteller (Birton A/S) ein thermisches Pumpprinzip. Es wird über die Unterkühlungswärme der HFKW-Anlage in einem Druckbehälter etwas $CO_2$ verdampft und damit flüssiges $CO_2$ in einen zweiten Druckbehälter gefördert, siehe Bild C7.2. Dabei durchströmt das $CO_2$ die Wärmeüberträger in den Kühlmöbeln und verdampft. So sollen bis zu 10 % Energie eingespart werden, die in Systemen mit mechanischen Pumpen für das Pumpen des $CO_2$ verwendet werden [Madsen2007].

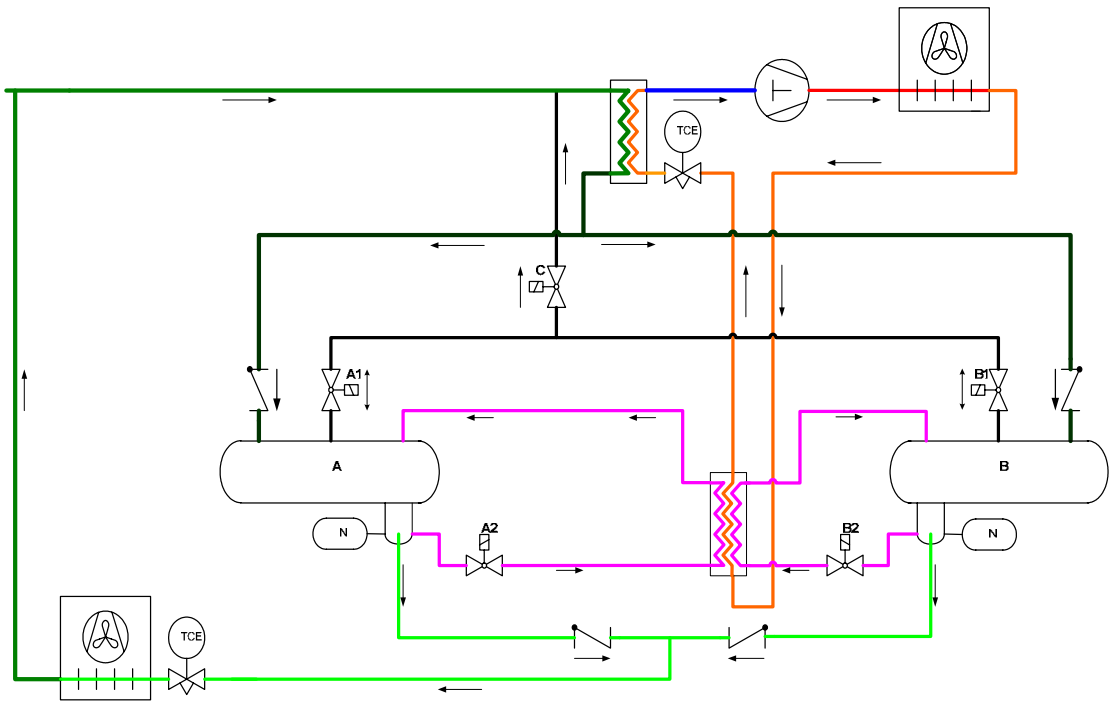



Bild C7.2: Thermisches Pumpprinzip für $CO_2$-Kreislauf [Madsen2007]

4. Kältemittelart

R134a, R404A oder R507A in einer kompakten (fabrikgefertigten) Kälteanlage mit R744-Kaskade für TK und verdampfendem $CO_2$ für NK.

5. Kältemittelfüllmenge

NK: 70 - 80 % weniger HFKW als C1.

Zwei australische Supermärkte in Gisborne und Winmalee enthalten bei einer Kälteleistung von TK 46,3 kW und NK 239 kW 180 kg R507A und 600 kg R744 bzw. bei einer Kälteleistung von TK 41,4 kW und NK 231 kW 180 kg R507A und 500 kg R744. Vergleichbare Märkte mit HFKW-Direktverdampfung desselben Anlagenbauers enthalten 1.300 kg R507A [Informationen der Fa. Frigrite, Australien].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

HFKW-Leckagen niedriger als bei C1.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

HFKW Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

**Energie**

10. Energieverbrauch

ca. 15 % weniger als C2.

Ein australischer Supermarkt verbraucht ca. 13 % weniger Energie als ein vergleichbarer HFKW-Direktverdampfungsmarkt (C1) [Informationen der Fa. Frigrite, Australien]

11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden

12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Dänemark und Norwegen.

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Bis zu 20 % höher als bei C1.

15. Installationskosten

Je nach Anlagengröße zwischen 0 und 10 % höher als C1.

16. Betriebskosten

Zwischen 10 und 15 % niedriger als C1.

17. Wartungsintervalle

In Zukunft je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr.

18. Wartungskosten

Unter denen einer vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlage (C1).

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Linde hat im Zeitraum 2000 bis 2005 über 100 R744-TK-Kaskadenkälteanlagen geliefert [Frogner2005]. Anlagen mit Pumpenumlauf von $CO_2$ für NK zusätzlich zur TK-Kaskade sind jedoch nur wenige in Dänemark und Norwegen bekannt.

20. Regionale Verbreitung

Norwegen zwei Anlagen von Linde [Frogner2005], darüber hinaus einige Anlagen von Birton in Dänemark [Madsen2007].

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Wenige.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Bei Stillstand der Anlage treten hohe Drücke im R744-Teil der Anlage auf. Da die meisten Komponenten nur bis 25 bzw. 40 bar ausgelegt sind, wird bei Überschreiten dieses Druckes R744 über die Sicherheitsventile abgeblasen. Dies geschieht bei in Betrieb befindlichen Anlagen bei Stromausfall nach ca. 2 bis 3 Stunden. Nach 6 Stunden Stromausfall sind ca. 15 bis 20 % der R744-Füllmenge aus der Anlage entwichen und müssen von einem Monteur nachgefüllt werden [Frogner2005].

In der Normalkühlung mit Pumpenumlauf von $CO_2$, bewegt sich dieses nur mit Gefälle aus dem Möbel zurück [EPTA2004].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Unverpackte Waren trocknen weniger aus, NK- und TK-Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Bedingt vorhanden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Carrier/Linde

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Einzelne Ketten in Dänemark sowie Coop und Hurtigrutenterminal in Bergen (Norwegen), beide 2004 installiert [Frogner2005].

**Quellen**

[Frogner2005] Frogner, V.: $CO_2$ i dagligvarehandelen. FOKU Seminar, 29.11.2005

[Madsen2007] Madsen, K.: Gespräch mit Kenneth Madsen vom Dänischen Technologischen Institut am, 11. April 2007

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 - 33

Technologie-Datenblatt zu

## 4.8 **C8: Indirekte Ammoniakkälteanlage**

Ammoniak (R717) mit flüssigem Kälteträger (a1+b3+c2+d3+e2, siehe Tabelle 1); Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger a2 anstatt a1 und/oder verdampfenden Kälteträger e3

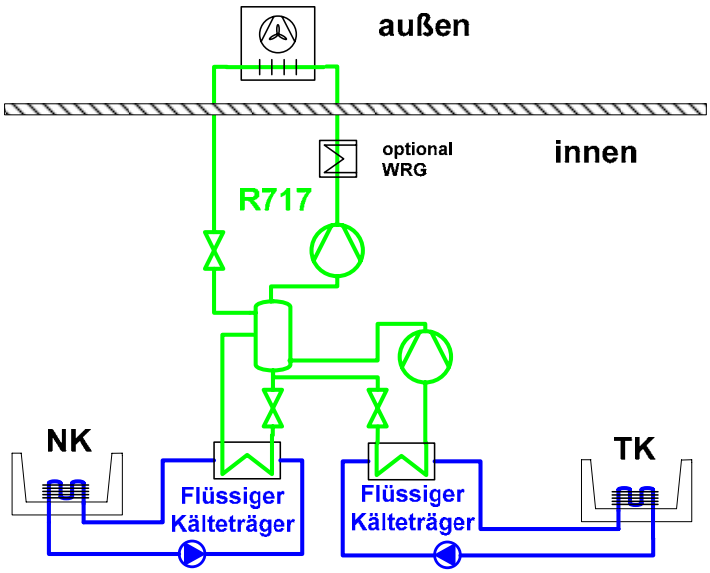



Bild C8.1: R717 indirekt mit flüssigem Kälteträger in NK und TK.

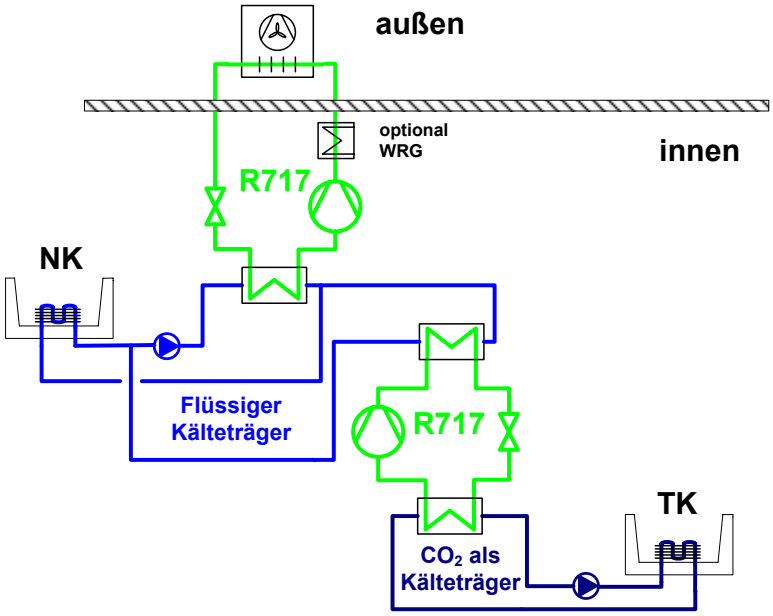



Bild C8.2: R717 indirekt mit verdampfendem Kälteträger für die Tiefkühlung. R717-Anlagen als eigenständige Kälteanlagen mit Kondensation der TK-Stufe am Kälteträger der NK-Stufe [Kauffeld1995].

**Kältedaten**

1. Einsatzzweck

Zentrale indirekte Kälteanlage für NK und TK.

2. Kälteleistungsbereich

Beliebig groß; ein Supermarkt in Dänemark hatte ca. 100 kW Kälteleistung [Kauffeld1998]. Linde hat Anlagen bis 400 kW in der NK und 80 kW in der TK gebaut [Heinbokel2003].

3. Art der Kälteübertragung

Indirekt; Die Anlagen werden mit separaten Kälteträgerkreisläufen für die Normalkühlung (Vorlauftemperatur: ca. -9 °C) und für die Tiefkühlung (Vorlauftemperatur: ca. -28 °C) aufgebaut [Kauffeld1998].

4. Kältemittelart

R717 und Kaliumazetat/Wasser [Kauffeld1998] oder Propylenglykol/Wasser für die Normalkühlung sowie andere organische Salze als Kälteträger für die Tiefkühlung [Heinbokel2003].

5. Kältemittelfüllmenge

Dänische Anlage in Roskilde enthält mit luftgekühltem R717-Verflüssiger 75 kg R717 bei ca. 100 kW Kälteleistung [Kauffeld1998]. Eine Anlage in Lund, Schweden arbeitet mit Solekreisläufen für die Verflüssigerkühlung. Drei R717-Anlagen stellen zusammen 145 kW Kälte mit jeweils 9 bis 14 kg Ammoniak zur Verfügung [Kauffeld1995].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Da R717 sehr stark riecht sind die Kältemittelverluste sehr niedrig, da bei kleinsten Kältemittelverlusten sofort der Kältemonteur gerufen wird.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Mit flüssigem Kälteträger ca. 10 bis 15 % höherer Energieverbrauch als Direktverdampfungssysteme [Johansen2006].

Die im dänischen Supermarkt in Roskilde eingebaute Anlage wurde vor und nach dem Umbau umfassend vermessen. Die alte Kälteanlage war eine HFKW-Direktverdampfungsanlage. Die neue indirekte R717-Anlage verbrauchte zwar 35 % weniger Energie, jedoch war die alte Anlage nicht optimal. Im Vergleich mit einer simulierten modernen HFKW-Anlage verbrauchte die indirekte Ammoniakkälteanlage etwa 8% mehr Energie [Kauffeld1998].

Kaltenbrunner gibt für eine österreichische R717-Anlage mit TK-Kälteträgerkreislauf eine Verdampfungstemperatur von -32 °C an; ihm zufolge würde eine vergleichbare R404A-Direktverdampfungsanlage mit einer Verdampfungstemperatur von – 38 °C arbeiten [Kaltenbrunner2007]. Die höhere Verdampfungstemperatur der R717-Anlage würde einen geringeren Energieverbrauch der indirekten Kälteanlage bedeuten.

Erfahrungen der Fa. Metro an einigen älteren (z. T. 10 Jahre) Anlagen zeigen einen ca. 10 bis 20 % höheren Energieverbrauch von R717-Kälteträgeranlagen. Aktuelle Anfragen bei einem Anlagenbauer ergeben für optimierte Kälteträgeranlagen einen einer R404A-Verbundanlage gleichwertigen Energieverbrauch. Allerdings wären die Investitionskosten einer derartigen Anlage ca. 25 bis 30 % teurer [Sollbach2007].

Brasilianische Supermärkte arbeiten durch entsprechende Auslegung der Wärmeüberträger und Anpassung der Kälteträgerdurchflussmenge mit einer NK-Kälteträgertemperatur von -2 °C. Dadurch kann auf eine Abtauung vollständig verzichtet werden [Presotto2001]. Der Energieverbrauch dieser Supermärkte entsprach im NK-Bereich in etwa dem vergleichbarer R22-Direktverdampfungsanlagen [Presotto2001]. Im TK-Bereich verbrauchen die brasilianischen Supermärkte ca. 6 % mehr Energie als vergleichbare R22-Direktverdampfungsanlagen [Presotto2001].

Für indirekte R717-Anlagen, bei denen die TK-Stufe mit dem NK-Kälteträger gekühlt wird, d. h. einer Kaskadenkälteanlage gibt Linde ca. 10-20 % mehr Energiebedarf gegenüber R404A Direktverdampfung an [Heinbokel2003, Linde2007]. Dem stehen an zwei französischen Hypermärkten im Jahr 2002 ermittelte Messungen gegenüber. Verglichen wurde eine neue R404A Direktverdampfungsanlage mit einer neuen indirekten R717-Anlage, bei der die TK-Stufe ihre Kondensationswärme an den NK-Kälteträgerkreislauf abgab. Die Verflüssigungswärme der TK-Stufe wurde für die

Abtauung verwendet. Der Energieverbrauch der Kälteanlagen der beiden Märkte lag in der gleichen Größenordnung. Die Verdampfungstemperaturen der NK-Stufe waren identisch, die der R717-TK-Stufe sogar 8 K über denen der R404A-Anlage. Dafür waren die luftseitigen Wärmeüberträgerflächen der R717-Kälteträgeranlage um ca. 70 % größer als diejenigen der R404A-Direktverdampfungsanlage. Die R717-Anlage hatte darüber hinaus ca. 5 % zusätzlichen Energiebedarf für die Kälteträgerpumpen [Zoughaib2005].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6,, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Mitteleuropa und Brasilien.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Allgemein für NK+TK (Kaskade): 20-35 % mehr Investitionskosten gegenüber R404A DX [Heinbokel2003, Linde2007]. Für einen in Brasilien installierten Supermarkt mit 5.000 $m^2$ Verkaufsfläche betrugen die Mehrinvestitionen ca. 1 bis 2 % [Presotto2001]. Für französische Hypermärkte werden mit HFKW-Direktverdampfungsanlagen vergleichbare Preise angegeben [Zoughaib2005].

### 15. Installationskosten

Höher als bei vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlagen (C1) [Linde2007].

### 16. Betriebskosten

Ca. 10 % über denen von C1 [Linde2007]. Brasilianische Märkte haben annähernd gleiche Betriebskosten [Presotto2001].

### 17. Wartungsintervalle

Einmal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Bis zu 50 % weniger als bei einer vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlage (C1), siehe auch ausführliche Beschreibung bei C2.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Linde: 1994-2002 ca. 60 Anlagen mit R717 NK: 80-400 kW; TK: 20-80 kW [Heinbokel2003, Linde2007]. In der Schweiz gibt es ca. 15 derartige Anlagen [Schmutz2007]. In Brasilien wurden in den Jahren 1996 bis 2001 6 Märkte gebaut – die beiden ersten aus den Jahren 1996 und 1997 verwendeten für den TK-Bereich eine Direktverdampfungsanlage mit R22 [Presotto2001].

### 20. Regionale Verbreitung

Brasilien, Dänemark, Deutschland, Luxemburg, Norwegen, Schweden, Schweiz.

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit 1995 in Schweden in Betrieb [Kauffeld1995].

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

### 23. evtl. besondere Probleme

R717 ist sehr giftig, hat jedoch eine hohe geruchliche Warnwirkung. Bei Verwendung von $CO_2$ als Kälteträger sind die Drücke in der Regel auf 25 bar begrenzt. Bei einem längeren Stillstand kommt es zum Abblasen eines Teils der $CO_2$-Füllung.

## 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Die Abtauung von Kühl- und Gefrierstellen geschieht mittels warmer Sole bei +10 °C. Die warme Sole wird zur Unterkühlung des Ammoniakkondensates benutzt [Kauffeld1998]. Diese Art der Abtauung ist bei Kälteträgeranlagen relativ einfach zu bewerkstelligen und verbraucht deutlich weniger Energie als eine elektrische Abtauung.

Bei Verwendung von $CO_2$ als verdampfendem Kälteträger für die Tiefkühlung können die Drücke unterhalb 25 bar gehalten werden. Es lassen sich deshalb alle Standardkomponenten verwenden [Kauffeld1995].

## 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Nur bedingt geeignet, da umfangreiche Sicherheitsanforderungen an Maschinenraum gestellt werden und der/die flüssigen Kälteträgerkreisläufe im Markt in der Regel neue Rohrleitungen und Wärmeüberträger erfordern. Bei Verwendung von $CO_2$ als TK-Kälteträger können die Komponenten teilweise weiterverwendet werden.

## 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

R717 ist giftig. Es sind entsprechende Vorkehrungen zu treffen, damit R717 nicht in den Verkaufsraum gelangen kann.

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der niederdruckseitigen Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Carrier/Linde, Johnson Controls (Sabroe) u. a.
R723: Frigopohl

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Zahlreiche.

### 30. Betreiber

U. a. Auchan in Frankreich, Migros in der Schweiz, ICA in Schweden und Bourbon sowie Zaffari in Brasilien

## Quellen


[Heinbokel2003] Heinbokel, B.: Alternative Kältemittel für Supermarkt-Kälteanlagen. 19th Refrigeration and Air Conditioning Conference, 8 – 10 Mai 2003 Balatonszéplak

[Johansen2006] Johansen, E.: Energiriktige kuldeleveranser til dagligvarehandelen. FOKU 5.12.2006

[Kaltenbrunner2007] Kaltenbrunner, B.: Email vom 8. Mai 2007 mit beigefügtem Messprotokoll

[Kauffeld1995] Kauffeld, M.: Neue $NH_3$-Technologie – $NH_3$ mit $CO_2$ als Kälteträger. Die Kälte- und Klimatechnik, 11 (1995), S. 931 - 932

[Kauffeld1998] Kauffeld, M.; Indirekte Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik, 9 (1998), S. 702 – 712

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Presotto2001] Presotto, A.; Süffert, C.G.: Ammonia Refrigeration in Supermarkets. ASHRAE Journal, 10 (2001), S. 25 - 30

[Schmutz2007] Schmutz, B.: Information per Email am 31.3.2007

[Sollbach2007] Sollbach, M.: Zusätzliches Datenmaterial der Metro Group per Brief übermittelt am 9. Dezember 2007

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 – 33

[Zoughaib2005] Youghaib, A.; Clodic, D.: Energy performances using ammonia as refrigerant in a large supermarket. IIR Ammonia Refrigerating Systems Conference, Ohrid, Macedonia, 2005

Technologie-Datenblatt zu

## 4.9 **C9:** R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für NK mit flüssigem Kälteträger

Eine zentrale R717-Kälteanlage mit luftgekühltem Verflüssiger auf dem Dach. Kälteverteilung für Normalkühlung mit flüssigem Kälteträger. Tiefkühlung als direktverdampfende R744-Kaskade zur zentralen R717-Anlage (a1+b3+c2+d4+e1, Tabelle 1).

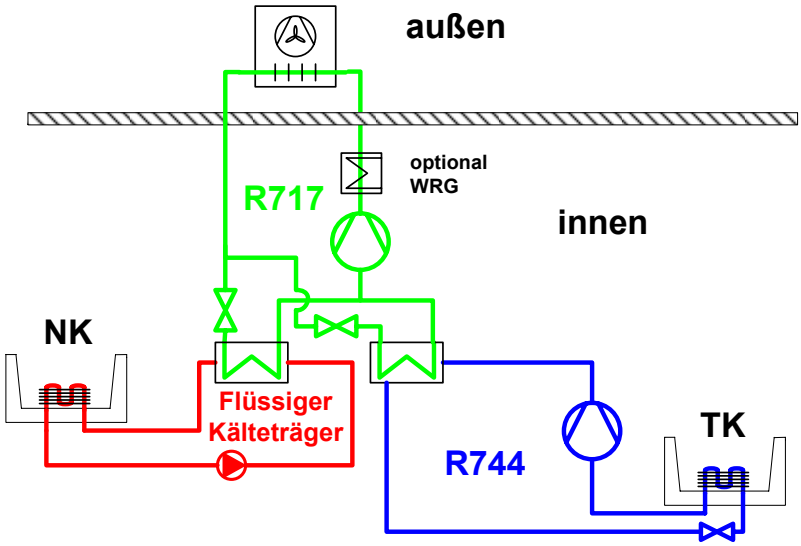



Bild C9.1: R717/R744-Kaskade – NK mit flüssigem Kälteträger.

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

2. Kälteleistungsbereich

Alle Bereiche möglich, nach unten durch verfügbare Verdichter begrenzt.

3. Art der Kälteübertragung

NK indirekt mit flüssigem Kälteträger, TK R744 direkt.

4. Kältemittelart

NK: R717, TK: R744

5. Kältemittelfüllmenge

Ein schwedischer Supermarkt mit 130 kW NK und 20 kW TK enthält 30 kg R717 und 50 kg R744 [Arias2004] entsprechend einer spezifischen Kältemittelfüllmenge von 230 g/kW R717 bzw. 2500 g/kW R744.

Ein norwegischer Supermarkt enthält 32 kg R717 und 120 kg R744 [Bakken2003].

Ein schwedischer Supermarkt mit einer Kälteleistung von 130 kW NK und 20 kW TK enthält 30 kg R717 und 50 kg R744 [Sawalha2008].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Auf Grund des strengen Geruchs von R717 sind die Kältemittelleckagen an R717-Anlagen gering.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Weniger als C1 und bis zu 40 % weniger als C2 [Bakken2003].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Dänemark - Versuchsanlage.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Bei der R744-Tiefkühlkälteanlage (in Kaskade zu R404A) eines 5000 $m^2$ großen EDEKA-Marktes mit einer Kälteleistung von 34,5 kW haben die Einsparungen bei den Rohrleitungen und beim Kältemittel (70 kg R744 gegenüber ca. 140 kg R404A einer vergleichbaren Anlage) die Mehrkosten bei den Verdichtern, Sicherheitsventilen und Gassensorik aufgewogen [Post2007].

### 15. Installationskosten

Unbekannt.

### 16. Betriebskosten

Unbekannt.

### 17. Wartungsintervalle

Einmal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Unbekannt.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Sehr wenige.

20. Regionale Verbreitung

Schweden [Arias2004] und Norwegen [Bakken2003].

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit 1995 als Versuchsanlage beim Dänischen Technologischen Institut in Betrieb [Kauffeld1995].

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

R717 ist giftig, hohe Stillstandsdrücke bei R744 führen zum Abblasen im Stillstand.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

GWP nahe 0, unverpackte Waren trocknen weniger aus, TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Nur sehr bedingt.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der niederdruckseitigen Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Johnson Controls/York/Sabroe (DK), Norild (N) u. a.
R723: Frigopohl

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Zahlreiche.

### 30. Betreiber

Coop Norwegen und einige schwedische.

## Quellen

[Arais2004] Arias, J.; Claesson, J.; Sawalha, S.; Rogstam, J.: Effektivare Kyla – en inventering. Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2004

[Bakken2003] Bakken, K.: Kaskadeanlegg for supermarkeder med $CO_2$ og $NH_3$ som kuldemedier. Kulde Skandinavia 18, 5 (2003), S. 16 - 18

[Kauffeld1995] Kauffeld, M.: Neue $NH_3$-Technologie – $NH_3$ mit $CO_2$ als Kälteträger. Die Kälte- und Klimatechnik, 11 (1995), S. 931 – 932

[Post2007] Post: Gespräch mit Herrn Post, Linde am 7.2.2007 im Gebauer EDEKA aktiv Markt Filderstadt

[Sawalha2008] Sawalha, S.: Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration. Dissertation Royal Inst. Of Technology, Stockholm, Sweden 2008, Trita REFR Report No. 08/60 ISSN 1102-0245

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 - 33

Technologie-Datenblatt zu

## 4.10 C10: R717/R744 Kaskade: R717 in Kaskade mit R744 –Kälteverteilung für NK mit verdampfendem Kohlendioxid

Eine zentrale R717-Kälteanlage mit luftgekühltem Verflüssiger auf dem Dach. Kälteverteilung für Normalkühlung mit Kohlendioxid in Pumpenumlauf, Verdampfung zu ca. 50 %. Tiefkühlung als Direktverdampfende R744-Kaskade zur zentralen R717-Anlage (a1+b3+c3+d4+e1, siehe Tabelle 1).

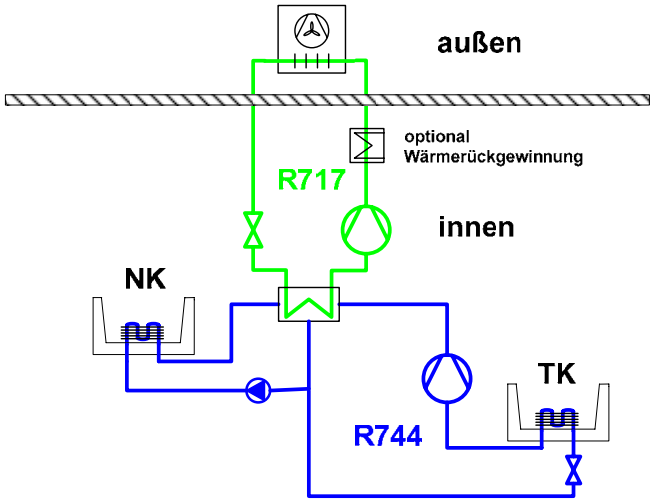



Bild C10.1: R717/R744-Kaskade; die Kälteanlage in Bunschoten, Holland ist mit Wärmerückgewinnung in der R717-Anlage [Riessen2004].

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

2. Kälteleistungsbereich

Nach oben keine Grenzen, nach unten durch verfügbare R744- und R717-Verdichter begrenzt.

Holländische Anlage: R717 mit 76,4 kW Kälteleistung bei -16 / 40 °C Verdampfungs- / Verflüssigungstemperatur, Kälteleistungszahl der R717-Anlage 2,48. R744 als Kälteträger für die Normalkühlung mit einer Kälteleistung von 63,7 kW sowie als Tieftemperaturkaskade mit 10,8 kW Kälteleistung bei -30 / -12 °C und einer Kälteleistungszahl von 6,3 [Riessen2004]. Gesamtkälteleistungszahl der ganzen Anlage 2,2.

Eine schwedische Versuchsanlage hat 16,6 kW Kälteleistung NK und 7,44 kW Kälteleistung TK [Sawalha2007].

3. Art der Kälteübertragung

R744 direkt, R717 indirekt

4. Kältemittelart

R717 im Maschinenraum und R744 im Verkaufsraum und in den Kühlräumen.

5. Kältemittelfüllmenge

Holländische Anlage 65 kg R717 für 76,4 kW Kälteleistung bei -16 °C Verdampfungstemperatur und 40 °C Verflüssigungstemperatur, Kälteleistungszahl der R717-Anlage 2,48. Darüber hinaus unbekannte Mange R744 als Kälteträger für die Normalkühlung und für die Tieftemperaturkaskade mit 10,8 kW Kälteleistung bei -30 / -12 °C und einer Kälteleistungszahl von 6,3 [Riessen2004]. Gesamtkälteleistungszahl der ganzen Anlage 2,2 [Riessen2004].

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Nicht bekannt; jedoch für R717 vermutlich sehr klein, da R717 selbst in kleinsten Konzentrationen sehr streng riecht.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

### 8. Art der Ableitung

Sicherheitsventile blasen ins Freie ab.

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

HFKW Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

13 – 18 % niedriger als für vergleichbare R404A Anlage, je nach Außenlufttemperatur; für höhere Temperaturen höhere Einsparungen, siehe Bild C10.2 [Riessen2004].

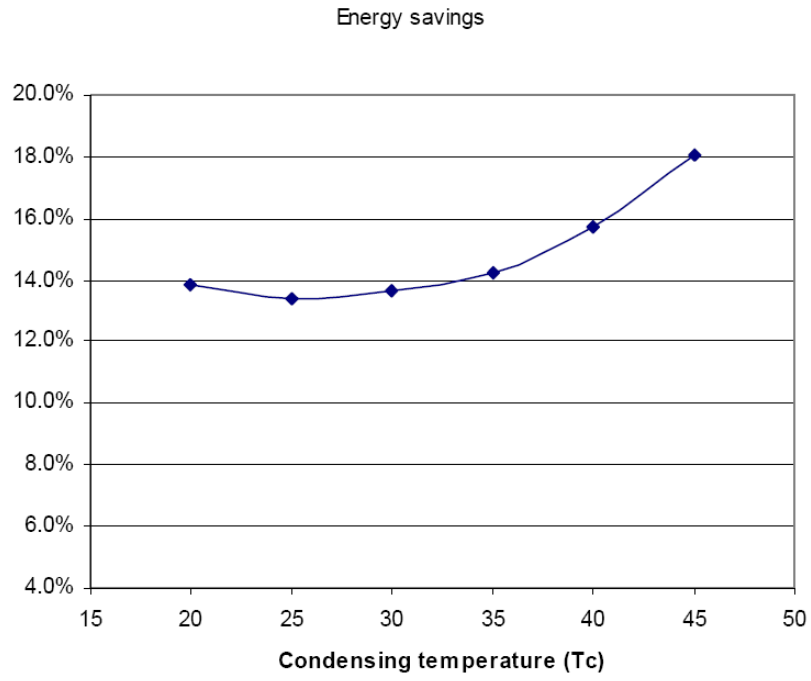



Bild C10.2: Energieeinsparungen der R717/R744-Anlage verglichen mit einer R404-Anlage als Funktion der Verflüssigungstemperatur [Riessen2004].

Die Technologie C10 dürfte einen niedrigeren Energieverbrauch haben als Technologie C9, da $CO_2$ als verdampfender Kälteträger energetisch günstiger ist als

ein flüssiger Kälteträger. Eine schwedische Versuchsanlage hat 60 % niedrigeren Energieverbrauch als eine schwedische Standardlösung mit R404A und Kälteverteilung NK über flüssigen Kälteträger sowie TK als R404A-Kaskade zur R404A-NK-Kälteanlage [Sawalha2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden und in holländischem Supermarkt in Bunschoten eingebaut zwischen R717-Verdichter und luftgekühltem Verflüssiger [Riessen2004].

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Niederlande

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

28 % teurer als eine vergleichbare R404A Direktverdampfungsanlage [Riessen2004].

### 15. Installationskosten

Höher als für eine vergleichbare R404A Direktverdampfungsanlage, da zusätzliche Sicherheitseinrichtungen erforderlich sind und bei der R717-Anlage nur Stahlrohre mit Schweißverbindungen zum Einsatz kommen [Riessen2004].

### 16. Betriebskosten

Niedriger als vergleichbare R404A-Anlage, da Energieverbrauch ca. 13 bis 18 % niedriger ist [Riessen2004].

### 17. Wartungsintervalle

Vergleichbar denen einer R404 Direktverdampfungsanlage.

18. Wartungskosten

Niedriger als bei einer vergleichbaren R404A-Anlage, da Kältemittel preiswerter [Riessen2004].

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Weniger als 10 in der gesamten EU (eigene Schätzung) – in der Literatur findet sich nur eine Anlage in den Niederlanden von 2004.

20. Regionale Verbreitung

Niederlande und evtl. Skandinavien.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

3 – 4 Jahre.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Bei Stillstand der Anlage treten hohe Drücke im R744-Teil der Anlage auf. Da die meisten Komponenten nur bis 25 bzw. 40 bar ausgelegt sind, wird bei Überschreiten dieses Druckes R744 über die Sicherheitsventile abgeblasen. Dies geschieht bei in Betrieb befindlichen Anlagen bei Stromausfall nach ca. 2 bis 3 Stunden. Nach 6 Stunden Stromausfall sind ca. 15 bis 20 % der R744-Füllmenge aus der Anlage entwichen und müssen von einem Monteur nachgefüllt werden [Frogner2005].

In der Normalkühlung mit $CO_2$–Pumpenumlauf, bewegt sich das $CO_2$ nur mit Gefälle in den Rohrleitungen aus dem Möbel zurück [EPTA2004].

R717 ist giftig und verträgt sich nicht mit Kupfer.

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Keines der beiden Kältemittel hat ein nennenswertes Treibhauspotential, beide Kältemittel sind sehr preiswert. Energieverbrauch ist günstiger als für vergleichbare R404A-Anlage.

Flexibilität vergleichbar der einer R404A-Anlage.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Vorhanden; es können jedoch keine bestehenden Komponenten weiterverwendet werden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der Komponenten liegt. Eventuell Kältespeicher oder Notkälte vorsehen für Stillstand, um den Anlagendruck der R744-Anlage niedrig zu halten.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Nicht bekannt

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Verdichter sowohl für R717 als auch für R744 in der niederländischen Anlage von Bitzer [Riessen2004].

### 30. Betreiber

Nicht bekannt

**Quellen**


[EPTA2004] EPTA-Vortrag: Supermarktkühlung mit $CO_2$. am 27.5.2004 auf der EHI Tagung in Zürich.

[Frogner2005] Frogner, V.: $CO_2$ i dagligvarehandelen. FOKU Seminar, 29.11.2005

[Riessen2004] Riessen, G.J. van: $NH_3/CO_2$ Supermarket Refrigeration System with $CO_2$ in the Cooling and Freezing Section. Proc. 6th IIR-Gustav Lorentzen Conf. nat. Working Fluids, Glasgow, 2004

[Sawalha2007] Sawlha, S.; et al.: Experimental investigation of $NH_3/CO_2$ cascade system and comparison to R404A system for supermarket refrigeration. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 - 33

Technologie-Datenblatt zu

## 4.11 **C11: Kohlenwasserstoff indirekt**

Indirekte Kälteanlage mit Kohlenwasserstoff als Kältemittel und flüssigem Kälteträger im Verkaufsbereich (a1+b2+c2+d2+e2, siehe Tabelle 1); Varianten verwenden wassergekühlte Verflüssiger a2 anstatt a1 und/oder verdampfenden Kälteträger e3.

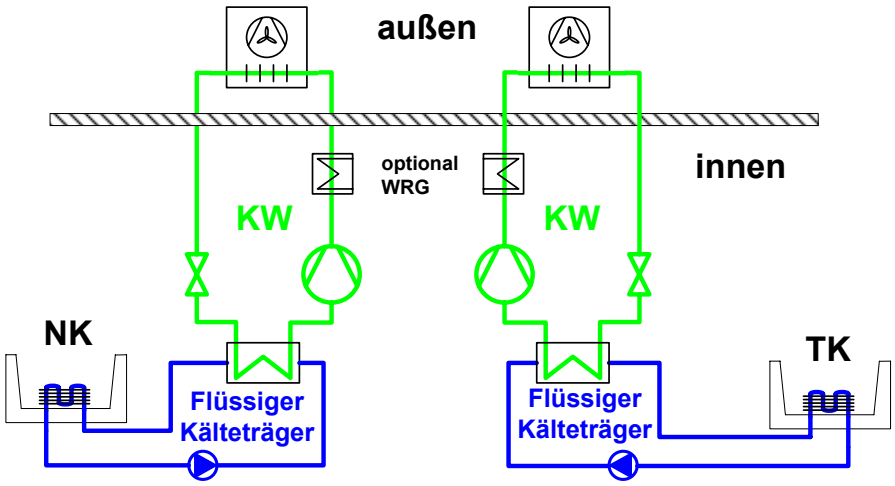



Bild C11.1: Indirekte Kälteanlage mit Kohlenwasserstoff.

### Kältedaten

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage

2. Kälteleistungsbereich

Linde: von 1996 bis 2002 17 Märkte mit R1270 - Propen NK: 20-190 kW; TK: 10-50 kW [Heinbokel2003, Linde2007].

3. Art der Kälteübertragung

Indirekt

4. Kältemittelart

R290 oder R1270

5. Kältemittelfüllmenge

Ab 120 g KW pro kW Kälteleistung.

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Unbekannt, aber vermutlich gering durch Gassensoren.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Ins Freie.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Allgemein für NK + TK: (R1270 - Propen) Energiebedarf ca. 5 – 20 % höher als für R404A Direktverdampfung. Einschätzung: 5 % gelten für NK-Anlage mit luftgekühltem Verflüssiger, 20 % gelten für TK + NK gesamt mit indirekter Wärmeabfuhr im Verflüssiger, wobei jedoch ein luftgekühlter Verflüssiger von Linde aus Sicherheitsgründen nicht ausgeführt würde [Linde2007 und Haaf2003]. In Dänemark gibt es Supermärkte mit luftgekühltem Kohlenwasserstoffverflüssiger [Kauffeld2001].

Indirekte Wärmeabfuhr im Verflüssiger (WRG für Raumheizung) verbessert die Energiebilanz des Marktes. Dies hängt jedoch immer vom Außenklima der Region ab. Je nachdem, welche Verflüssigungstemperatur im Jahresmittel gefahren wird, kann der Energie-Mehrbedarf der Kälteanlage durch WRG ausgeglichen werden [Linde2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Sehr gut, insbesondere wenn, wie in Schweden üblich, für die Kühlung des Verflüssigers ein Solekreislauf eingesetzt wird.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Unbekannt.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Allgemein für NK + TK mit Propen 15 - 25 % mehr Investitionskosten gegen R404A Direktverdampfung [Heinbokel2003, Haaf2003, Linde2007].

### 15. Installationskosten

15 - 20 % höher als C1 [Haaf2003].

### 16. Betriebskosten

Niedriger als C1.

### 17. Wartungsintervalle

Einmal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Niedriger als bei einer vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlage (C1).

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Linde: von 1996 bis 2002 17 Märkte mit Propen NK: 20-190 kW; TK: 10-50 kW [Haaf2003].

20. Regionale Verbreitung

Linde hat Anlagen in Deutschland, Großbritannien, Italien und der Schweiz gebaut [Heinbokel2003]. Daneben gibt es Märkte in Dänemark und Schweden.

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Carrier/Linde hat 1996 den ersten Supermarkt mit einer R1270-Anlage versehen. Insgesamt wurden von Linde ca. 17 Supermärkte mit R1270 ausgestattet [Heinbokel2003].

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Kohlenwasserstoffe sind brennbar; für ausreichende Lüftung muss gesorgt werden. Kältemittelverlustüberwachung notwendig und Auflagen gemäß Ex-Schutz sind je nach Füllmenge zu beachten.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

GWP nahe 0, sehr flexibel, unverpackte Waren trocknen weniger aus, Verwendung von Kunststoffrohren möglich

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Nur bedingt geeignet, da umfangreiche Sicherheitsanforderungen an Maschinenraum gestellt werden und der/die flüssigen Kälteträgerkreisläufe im Markt in der Regel neue Rohrleitungen und Wärmeüberträger erfordern.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Kohlenwasserstoffe sind brennbar. Entsprechende Sicherheitsbestimmungen einhalten wie z. B. ausreichende Lüftung, Gassensoren etc..

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Carrier/Linde (D), Johnson Controls/York/Sabroe (DK)

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Zahlreiche.

### 30. Betreiber

Einige in Schweden.

## Quellen

[Haaf2003] Haaf, S.; Heinbokel, B.: Kälteanlagen für Supermärkte mit alternativen Kältemitteln. ki Luft- und Kältetechnik, 11 (2003), S. 508 - 512

[Heinbokel2003] Heinbokel, B.: Alternative Kältemittel für Supermarkt-Kälteanlagen. 19th Refrigeration and Air Conditioning Conference, 8 – 10 Mai 2003 Balatonszéplak

[Kauffeld2001] Kauffeld, M.; Christensen, K.G.: $CO_2$ und Propan im Supermarkt. Die Kälte und Klimatechnik 1 (2001), S. 30 - 33

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

Technologie-Datenblatt zu

## 4.12 **C12: Kohlenwasserstoff / R744 Kaskade**

Kohlenwasserstoff in Kaskade mit R744 – Kälteverteilung für die Normalkühlung mit verdampfendem (a1+b2+c2+d4+e1), s. Bild C12.1 oder flüssigem Kälteträger (a1+b2+c3+d4+e1, siehe Tabelle 1), s. Bild C12.2.

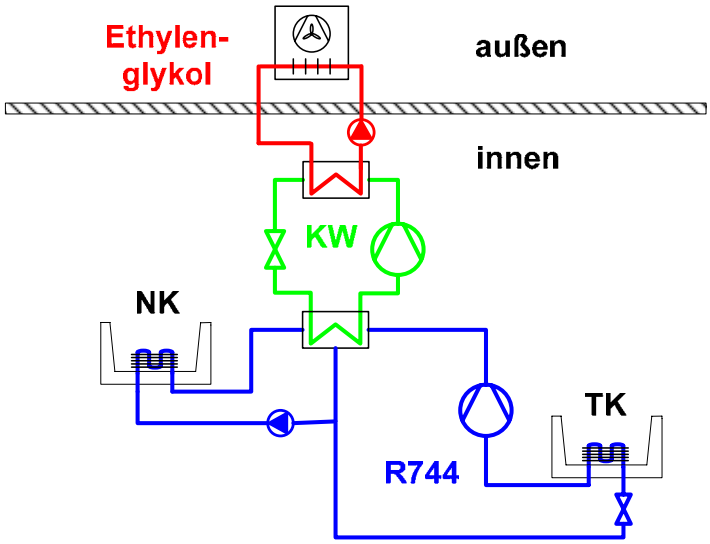



Bild C12.1: Kohlenwasserstoff / R744 Kaskade mit verdampfendem $CO_2$ als Kälteträger für die Normalkälte und wassergekühltem Verflüssiger.

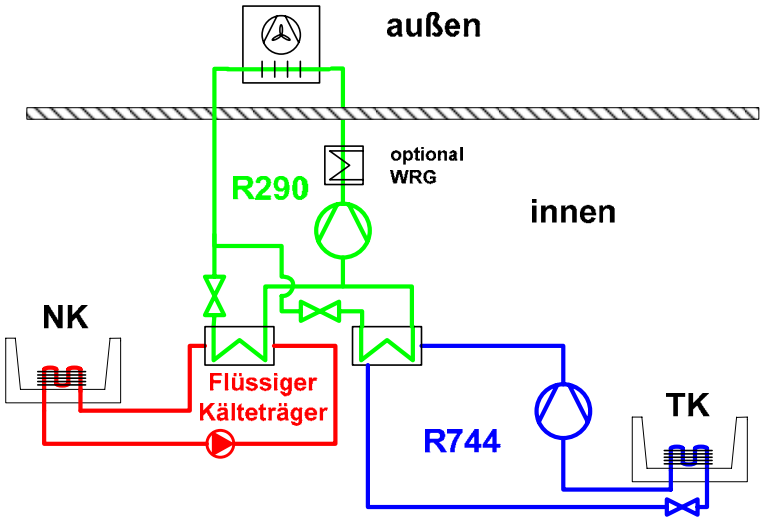



Bild C12.2: Kohlenwasserstoff / R744 Kaskade mit flüssigem Kälteträger für die Normalkälte und luftgekühltem Verflüssiger, installiert in einem FAKTA-Supermarkt in Dänemark [Bertelsen2002, Kauffeld2001].

**Kältedaten**

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundanlage im Supermarkt.
Mindestens ein derartiger Supermarkt (Bild C12.2) existiert in Dänemark: FAKTA in Beder südlich von Aarhus [Bertelsen2002].

2. Kälteleistungsbereich

Alle Kälteleistungsbereiche möglich.

J&E Hall NK: 70 bis 350 kW und TK: 15 bis 60 kW [J&E Hall2008].

Dänischer Discounter (FAKTA Beder) hat 21 kW NK, davon 14,4 kW für Kühlregale, 4,5 kW für einen Kühlraum und 2,1 kW für Normalkühltruhen, und 10 kW TK, davon 7 kW für zwei Tiefkühlräume und 3 kW für Tiefkühltruhen [Bertelsen2002]. Die Anlage ist für eine Kälteträgervorlauf-/-rücklauftemperatur von -10 / -7 °C ausgelegt. Das R290 verdampft dabei mit -14 °C. Die R744-Anlage ist für -32 °C Verdampfung und – 10 °C Verflüssigung ausgelegt [Bertelsen2002].

3. Art der Kälteübertragung

NK indirekt mit Kälteträger, in dänischem Discounter mit Propylenglykol be J&E Hall mit $CO_2$. TK Direktverdampfung von R744.

4. Kältemittelart

In der Regel R290, bei einigen Linde-Anlagen früher auch R1270 und R744 für TK als Kaskade.

5. Kältemittelfüllmenge

Anlage bei FAKTA in Dänemark enthält 10 kg R290, 6 kg R744 und 140 kg Propylenglykol-Wasser-Gemisch (40 % Dowcal N, Gefrierpunkt -21 °C) – eine vergleichbare R404A-Anlage enthält 90 kg [Bertelsen2002].

J&E Hall Aggregate enthalten bei 70 kW NK zweimal 15 kg R290 und bei 350 kW NK zweimal 40 – 50 kg R290 in einem kompaktem, fabrikgefertigten Wasserkühler, der im Außenbereich aufgestellt wird [J&E Hall2008]

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Unbekannt, aber vermutlich gering durch Gassensoren.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Eigene Abschätzung.

8. Art der Ableitung

Sicherheitsventile blasen ins Freie ab.

9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb. Bei Abblasen in die Atmosphäre bei Kohlenwasserstoffen auf Brennbarkeit achten und Zündquellen fernhalten. Sowohl bei Kohlenwasserstoffen als auch bei R744 auf gute Lüftung achten und nur langsam ablassen, damit kein Öl mitgerissen wird.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Der Energieverbrauch einer Pilotanlage in einem Discountmarkt in Dänemark mit luftgekühltem R290-Verflüssiger und Propylenglykol als Kälteträger im NK-Bereich entspricht dem von vergleichbaren R404A-Anlagen [Bertelsen2002].

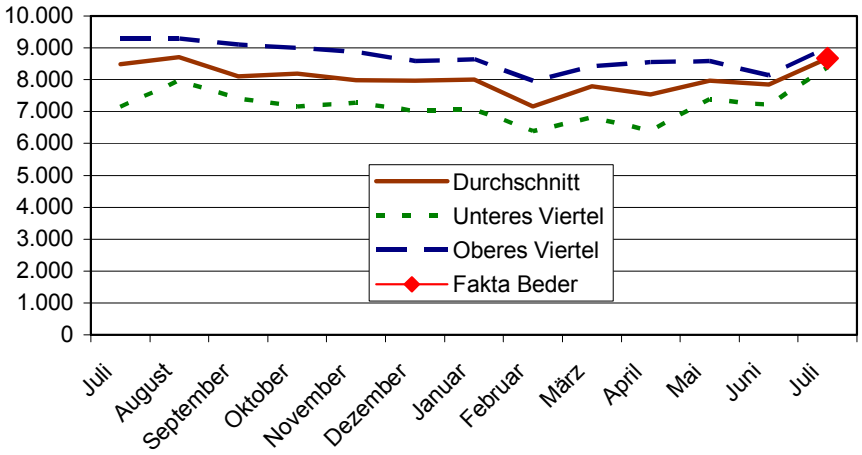



Bild C12.3: Vergleich des Energieverbrauchs von acht konventionellen Discountern mit der R290/R744-Anlage [Kauffeld2002].

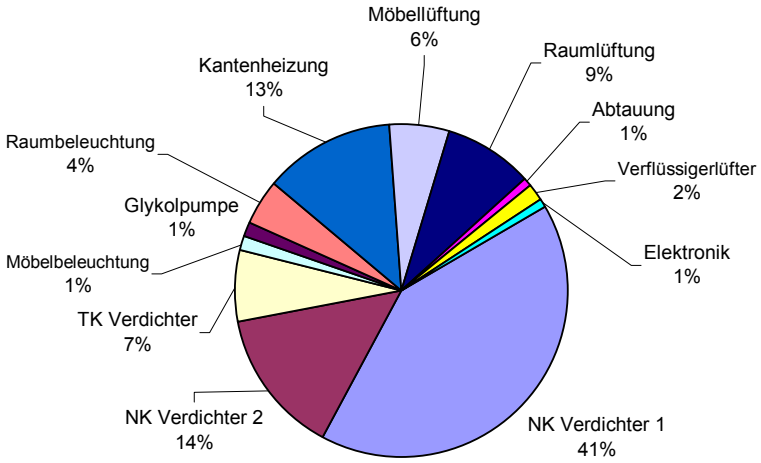



Bild C12.4: Energieverbrauch der einzelnen Komponenten im Discounter mit R290/R744-Kälteanlage in Beder in Dänemark [Kauffeld2002].

J&E Hall rechnet für seine Anlagen mit ca. 25 % niedrigerem Jahresenergiebedarf als eine transkritische R744-Anlage (C13) [J&E Hall2008].

## 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden, jedoch in Beder nicht installiert.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Dänemark

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Für Discounter in Beder, Dänemark, ca. 20 % über einer traditionellen R404A-Anlage [Bertelsen2002]. Dabei waren die Mehrkosten im einzelnen: Verbundanlage 18 %, Kühlmöbel 3 %, Rohrleitungen und Isolierungen 31 % (Kälteträgerrohre haben größere Durchmesser und erfordern mehr Isolierung da die Vorlaufleitungen im Gegensatz zu einer Direktverdampfungsanlage kalt sind), elektrische Anlagen 54 % (alle elektrischen Komponenten in der Nähe der R290-Anlage müssen in IP 54 ausgeführt werden, außerdem sind zusätzlich Gassensoren für R290 und R744 sowie eine Lüftungsanlage erforderlich), Arbeitsstunden 26 % [Bertelsen2002]. Es wird jedoch erwartet, dass die Mehrkosten bei weiteren Anlagen für Discountmärkte nur noch 10 % betragen [Bertelsen2002]. Für größere Supermärkte mit einer ca. dreimal höheren Kälteleistung werden sogar nur Mehrkosten von 5 % erwartet [Bertelsen2002].

### 15. Installationskosten

Ca. 10 bis 20 % teurer. Für die R744-Anlage wurden in Beder, Dänemark, Kupferrohre und Kupferfittings verwendet. Für den Kälteträgerkreis sind größere Rohrdurchmesser und dickere Isolierung notwendig, da die Rohre sowohl im Vorlauf als auch im Rücklauf kalt sind. Bei einer normalen Direktverdampfungsanlage sind die Rohre bis zu den Expansionsventilen auf Raumtemperatur und brauchen nicht isoliert zu werden.

### 16. Betriebskosten

Gleich, da Energieverbrauch gleich [Bertelsen2002].

### 17. Wartungsintervalle

Einmal im Jahr. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

### 18. Wartungskosten

Die Kältemittel sind preiswerter als HFKW-Kältemittel. Sofern der Kälteträgerkreis nicht hermetisch dicht ist, sind Kontrollen bezüglich Korrosionsschutz und Biozid notwendig.

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

1 Anlage in Dänemark bekannt [Bertelsen2002, Kauffeld2002]. J&E Hall hat eine derartige Anlage (Bild C12.1) erstmals auf der EUROSHOP 2008 vorgestellt. Es ist bis Februar 2008 noch keine derartige Anlage gebaut worden.

### 20. Regionale Verbreitung

Dänemark

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit Mai 2000 [Kauffeld2001].

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

### 23. evtl. besondere Probleme

R290 ist brennbar. Die Kälteanlage bei FAKTA in Beder, Dänemark ist in einem Kasten eingebaut, der die entsprechenden Vorschriften in Bezug auf brennbare Stoffe erfüllt. Dieser Kasten steht im Maschinenraum des Marktes und wird ständig belüftet [Kauffeld2001].

Die Anlagen von J&E Hall sind zur Aufstellung im Außenbereich vorgesehen, im Gebäude befindet sich damit kein brennbares Kältemittel [J&E Hall2008].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

GWP nahe 0, sehr flexibel, TK Verdampfungstemperatur höher als bei HFKW; sehr kleine Rohrleitungen mit R744.

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Vorhanden, allerdings können keine alten Komponenten weiterverwendet werden.

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Bei R290 Brennbarkeit beachten und bei R744 Toxizität bei hohen Konzentrationen.

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der niederdruckseitigen Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Dänische Anlage bei FAKTA Beder ist von Super Køl A/S
J&E Hall

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

### 29. Komponentenhersteller

Verdichter Bitzer, PlattenWärmeüberträger SWEP, Verlüssiger ECO, Ventile Danfoss und Siemens, Kälteträgerpumpe (Prppylenglykol) Grundfos [Bertelsen2002].
$CO_2$-Pumpen: Hermetics, Witt

### 30. Betreiber

FAKTA (250 Discount-Märkte in Dänemark, davon 2002 einer mit R290/R744 Kaskade) [Bertelsen2002].

## Quellen


[Bertelsen2002] Bertelsen, P.; Christensen, K.G.; Gøttsch, T.: Anvendelse af naturlige kølemidler i supermarkeder. Miljøprojekt Nr. 658 2002

[J&E Hall2008] J&E Hall: HC/$CO_2$ Supermarkt-Systeme. Information auf dem Messestand der Fa. Daikin/J&E Hall während der EUROSHOP 2008 in Düsseldorf am 26.2.2008

[Kauffeld2001] Kauffeld, M.; Christensen, K.G.: $CO_2$ und Propan im Supermarkt. Die Kälte und Klimatechnik 1 (2001), S. 30 - 33

[Kauffeld2002] Kauffeld, M.; Bertelsen, P.; Hansen, T.M.; Christensen, K.G.; $CO_2$ Anwendungen in Dänemark. Ki Luft- und Kältetechnik, 38, 1 (2002), S. 27 – 32

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 - 33

Technologie-Datenblatt zu

## 4.13 **C13: R744 Direktverdampfung**

R744 in Direktverdampfung im gesamten Supermarkt, d. h. Normal- und Tiefkühlung (a1+b4+c1+d4+e1, siehe Tabelle 1). Bei kühlen Außentemperaturen Verflüssigung an der Außenluft, bei warmen Temperaturen Gaskühlung. Evtl. kombiniert mit Wärmerückgewinnung. Sowohl EPTA als auch Linde führen diese Anlagen mit zweistufiger Expansion und zweistufiger Verdichtung aus (Boosterschaltung). Tiefkühl- und Normalkühlanlage sind ein gemeinsamer Kreislauf. Daneben gibt es andere Konzepte, bei denen die NK- und TK-Anlagen in zwei getrennten Kreisläufen realisiert sind.

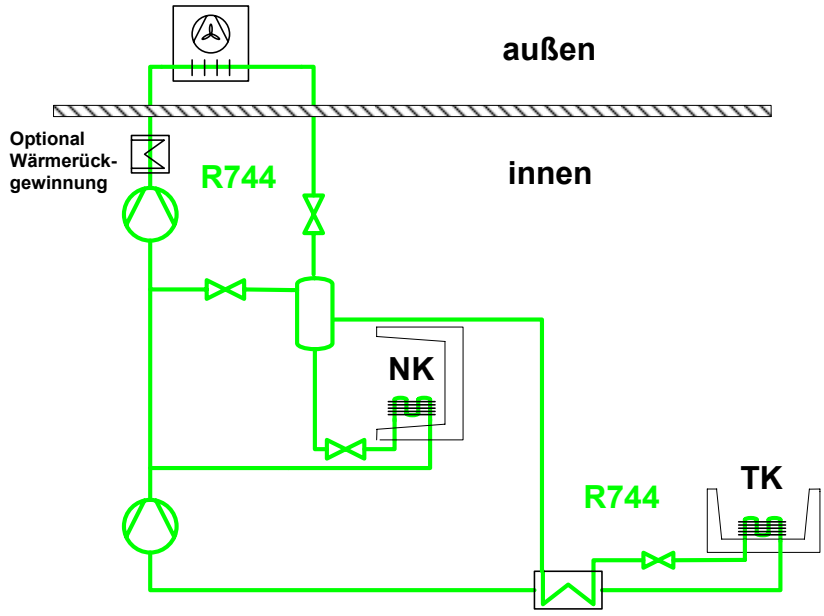



Bild C13.1: Zweistufige R744-Kälteanlage Direktverdampfung in NK und TK; zweistufige Expansion.

### **Kältedaten**

1. Einsatzzweck

Verbundkälteanlage

2. Kälteleistungsbereich

Aldi Süd Jüchen: Kälteleistung NK und TK zusammen 50 kW, Kälteleistung beinhaltet Möbel und Räume für Normalkühlung sowie Tiefkühlraum; Tiefkühltruhen sind steckerfertig mit R290, siehe A5 [Görner2007]. Verdampfungstemperatur NK = -8 °C; TK = -32 °C [Görner2007]. Kälteleistung NK 40 kW und TK 2,5 kW [Bucher2007].

Carrier/Linde bietet transkritische R744-Anlagen mit NK-Kälteleistungen von 70 bis 140 kW standardmäßig an [Sienel2007]. Ausgeführte Anlagen der letzten 8 Jahre hatten auch schon Kälteleistungen bis 320 kW. Ausgeführte Anlagen der letzten 8 Jahre hatten auch schon Kälteleistungen bis 320 kW mit mehreren parallel arbeitenden Verbünden mit insgesamt 12 Verdichtern

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R744

5. Kältemittelfüllmenge

Aldi Süd, Jüchen: 45 kg bei 50 kW Kälteleistung (Discounter mit steckerfertigen Tiefkühltruhen; Verbundanlage nur für Normalkühlung und Tiefkühlraum) [Görner2007]; Aldi Süd, Krefeld: 45 kg.

Coop Wettingen, Schweiz bei 322 kW Kälteleistung in zwei NK-Verbundanlagen und 58 kW in einer TK-Verbundanlage enthält die Anlage im NK-Bereich 800 kg und im TK-Bereich 70 kg [Heinbokel2005].

Je nach Konzept ergeben sich spezifische Kältemittelfüllmengen von 2 – 4 kg/kW Kälteleistung für den NK-Bereich und 1 – 3 kg/kW für den TK-Bereich [Gerber2008].

Ein schwedischer Supermarkt mit einer Kälteleistung von 110 kW NK und 50 kW TK enthält 50 kg R744 [Sawalha2008].

## Kältemittelverluste

### 6. Typische Kältemittelverlustraten

In Deutschland noch nicht bekannt [Görner2007]. In Dänemark weisen die ersten Anlagen Kältemittelverlustraten von 25 % auf [Madsen2007]. Man geht jedoch davon aus, dass diese sich auf 10 % reduzieren werden, sobald mehr Erfahrungen mit den Anlagen vorliegen. Ein Großteil der derzeitigen Kältemittelverluste tritt bei der Wartung der Anlagen auf. Während der Wartung steht die Anlage und die Temperatur und damit der Druck im Niederdruckteil der Anlage steigen. Oberhalb von 40 bar wird R744 abgeblasen [Madsen2007].

### 7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Gespräch mit Udo Görner, EPTA Deutschland [Görner2007] und Kenneth Madsen, DTI Dänemark [Madsen2007],

### 8. Art der Ableitung

Sicherheitsventile blasen ins Freie ab [Görner2007]. Es befinden sich R744-Detektoren im Kühlraum, im Maschinenraum, im Verkaufsraum sowie in der Lüftungsanlage des Supermarkts [Görner2007].

### 9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Ein Hersteller gibt für den Energieverbrauch für die Normalkühlung im Jahresdurchschnitt einen ca. 0,6 % niedrigeren Wert an als für eine vergleichbare R404A-Anlage, für Tiefkühlung ca. 6 % niedriger als für vergleichbare R404A-Anlage [EPTA2004]. Unter deutschen Klimabedingungen ist jeweils von Mai bis September der

Energieverbrauch der R404A-Anlage niedriger; von Oktober bis April ist der Energieverbrauch der R744-Anlage niedriger [EPTA2004].

Ein anderer Hersteller gibt an, dass für Nordeuropäische Supermärkte ca. 15 % und für Zentraleuropäische ca. 10 % weniger Energieverbrauch erwartet werden als für Standard R404A-Anlagen [Sienel2007]. Für schweizerische Supermärkte sind die 10 % Energieeinsparung durch Messungen des Energieverbrauchs an zahlreichen Märkten über ein Jahr lang belegt [Sienel2007]. Für Südeuropa sollen im Jahresmittel beide Anlagentypen gleiche Energieverbräuche erzielen [Sienel2007]. Messungen an zwei R744-Märkten und Simulationsrechnungen der Technischen Hochschule in Stockholm, Schweden ergaben einen geringfügig höheren Energieverbrauch als eine simulierte R404A Anlage mit Kälteträger [Arias2007]. Die Supermärkte hatten Kälteleistungen von 248,7 kW NK und 62,3 kW TK bzw. 166 kW NK mit 45,5 kW TK. Gebaut wurden Die Anlagen in Jahren 2006 bzw. 2004 [Arias2007]. Die vier Jahre alte Anlage mit 166/45,5 kW NK/TK hat einen gemessenen Energieverbrauch von 832 MWh/Jahr [Arias2007].

In Deutschland mit entsprechend vielen verhältnismäßig kalten Betriebsstunden haben bei Discountern installierte transkritische R744-Anlagen in ihrem ersten Betriebsjahr einen geringfügig niedrigeren Energieverbrauch als vergleichbare R404A-Anlagen gezeigt. Wobei die ersten derartigen R744-Anlagen den höchsten Energieverbrauch aufweisen; Anlagen der "zweiten Generation" verbrauchen weniger Energie [Bader2007].

Anhaltswert von Linde: 3200 kWh/a/m als Mittelwert pro Laufmeter Kühlmöbel für TK + NK in schweizerischen Supermärkten [Linde2007].

Bild C13.2 zeigt das Verhältnis der elektrischen Leistungsaufnahme zur Kälteleistung für die Kältemittel R404A und R744. Weiterhin ist die Summenhäufigkeit der Außenlufttemperaturen in Stunden für mitteleuropäische Verhältnisse angegeben. Die Berechnungen basieren auf realen Verdichterdaten [Heinbokel2005]. Bild C13.3 zeigt entsprechende Berechnungen für andere europäische Klimate.

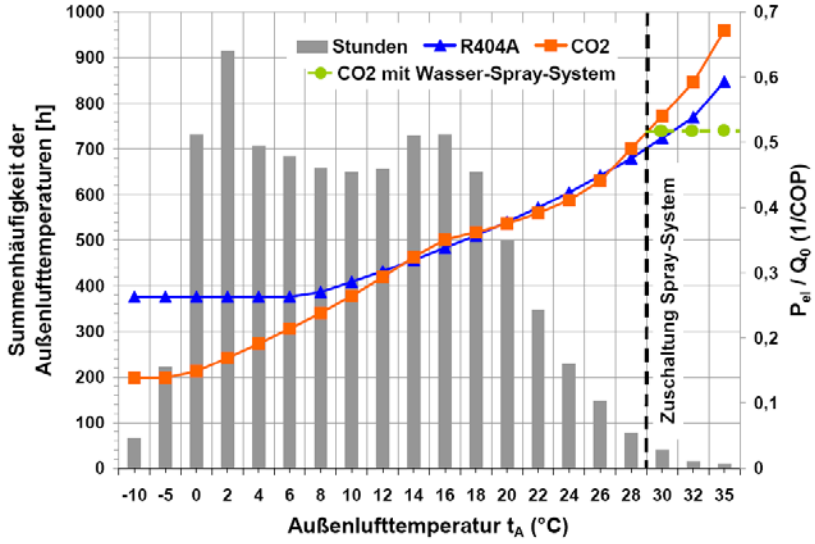
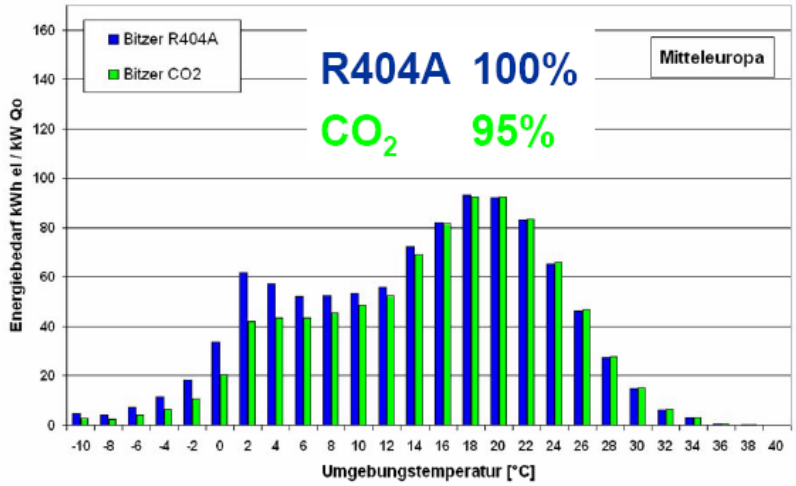



Bild C13.2: Vergleich des energetischen Verhaltens zwischen R404A und R744 (Normalkühlung, jeweils einstufige Verdichtung, Direktverdampfung ohne Wärmerückgewinnung [Heinbokel2005].



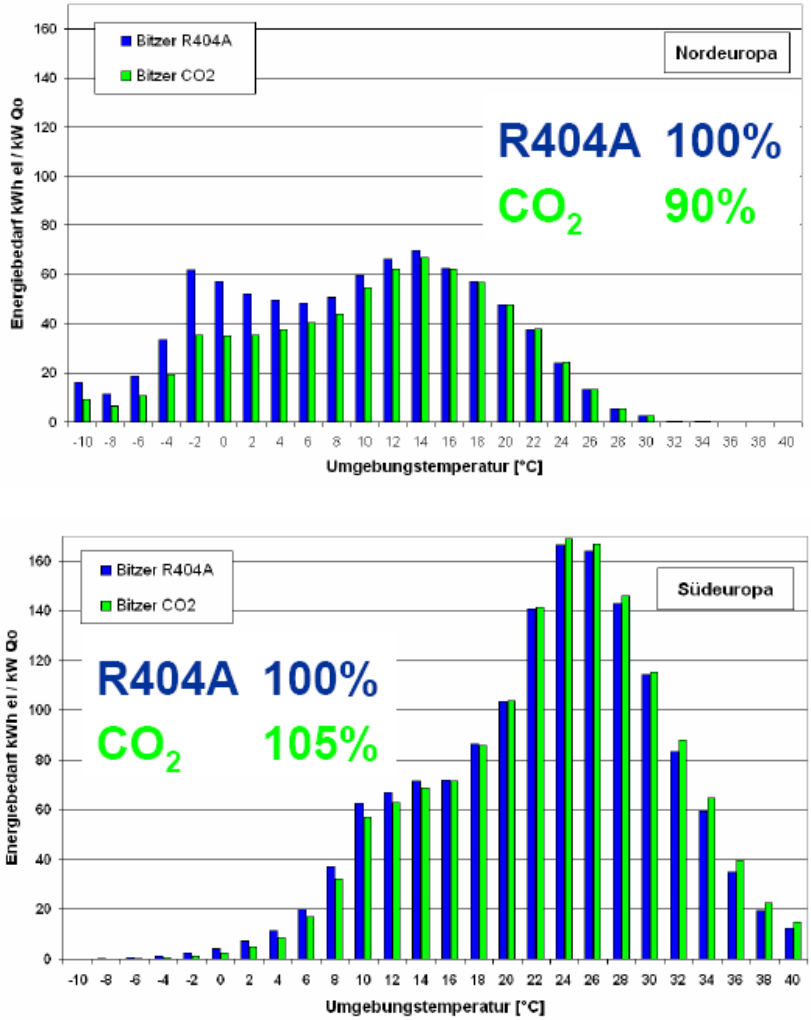



Bild C13.3: Vergleich des Jahresenergiebedarfes von R404A-Direktverdampfungsanlagen und R744-Direktverdampfungsanlagen in verschiedenen Europäischen Klimaregionen [Heinbokel2006]. Die R744-Anlagen sind in allen drei Klimaregionen ohne Sprühbefeuchtung angenommen [Heinbokel2007].

Für den unteren Außenlufttemperaturbereich sind deutliche energetische Vorteile für den Betrieb mit $CO_2$ 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, kann am R744-Gaskühler ein Wasser-Spray-System installiert werden. Durch die Verdüsung des Wassers kann die Gaskühleraustrittstemperatur des R744-Prozesses deutlich unterhalb der 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 C13.2). Eine solche Maßnahme hat bei anderen Kältemitteln, die einen Kondensationsprozess durchlaufen, weniger Einfluss [Heinbokel2005].

Es laufen jedoch auch Entwicklungen, mit R744 in Direktverdampfungssystemen auch ohne Wasser-Sprüh-System bei wärmeren Außenlufttemperaturen höhere Kälteleistungszahlen zu erreichen [Brouwers2007]. Dies wäre zum Beispiel mit einer Expansionsmaschine anstelle eines Expansionsventils möglich.

Um nun eine genauere Aussage über den Energieverbrauch machen zu können, wurden an der Anlage in Wettingen energetische Messungen über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführt [Heinbokel2005]. Bild C13.4 zeigt den Jahresenergieverbrauch pro Laufmeter Kühlmöbel für unterschiedliche Anlagensysteme in der Schweiz (Quelle: LKS Schweiz AG, COOP Basel) [Heinbokel2005].

Bei diesem Vergleich wird der ermittelte Jahresenergiebedarf auf die Anzahl der vorhandenen Kühlmöbel und -räume bezogen, um die unterschiedlichen Marktinstallationen hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz miteinander vergleichen zu können. Die verschiedenen Kühlmöbel und -räume werden mit entsprechenden Korrekturfaktoren belegt, um deren unterschiedlichen Kältebedarf bezogen auf die „Lauflänge“ (Möbellänge) entsprechend zu bewerten. Dargestellt sind direkte und indirekte Systeme mit dem Kältemittel R404A sowie die Daten des Pilotmarktes in Wettingen [Heinbokel2005].

Zu erkennen ist, dass die Kälteanlagen, die in der Normalkühlung mit einem Wärme- und Kälteträger ausgerüstet sind, durchschnittlich einen um ca. 12 % erhöhten Energieverbrauch gegenüber den Direktverdampfungssystemen mit R404A aufweisen. Die $CO_2$-Pilotanlage in Wettingen liegt mit einem Verbrauch von 3200 kWh/(a $m_{korr.}$) um

ca. 6 % unter dem Durchschnittswert der R404A-Direktverdampfungsanlagen und ca. 19 % unter dem Wert der indirekten Anlagensysteme. Da jedoch der Energieverbrauch der angeführten Märkte aufgrund der schon zitierten Einflüsse zwischen 2900 kWh/(a $m_{korr.}$) und 4300 kWh/(a $m_{korr.}$) stark schwankt, ist davon auszugehen, das der durchschnittliche Energieverbrauch der $CO_2$-Direktverdampfungsanlagen auf dem Niveau der R404A-Direktverdampfungsanlagen liegen wird [Heinbokel2005].

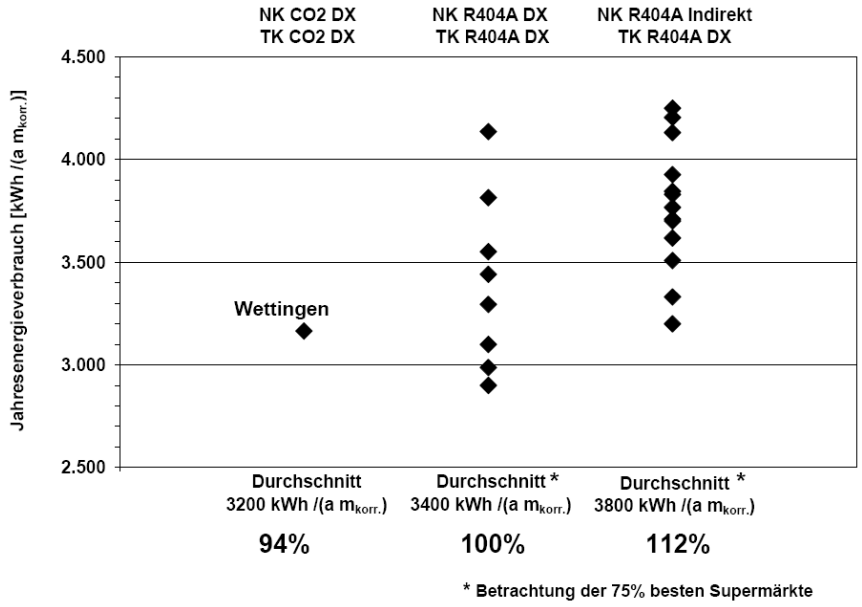



Bild C13.4: Energiebedarf pro Laufmeter Kühlmöbel in schweizerischen Supermärkten. Messwerte: COOP Basel, LKS Schweiz AG [Heinbokel2006].

Das Wassersprühsystem war weniger als 100 Stunden in Betrieb. Die energetische Effizienz der $CO_2$-Kälteanlage resultiert also hauptsächlich aus den guten Leistungszahlen während des gesamten Jahres [Heinbokel2005].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Sehr gutes Potential, da R744 überkritisch einen dem zu erwärmendem Wasser ähnlichen Temperatur- und Wärmeinhaltverlauf zeigt. Auch steht im überkritischen Betrieb deutlich mehr Wärme bei hohem Temperaturniveau zur Verfügung als dies bei

der Enthitzung von z. B. R404A der Fall ist. Es lassen sich somit mit R744 größere Wassermengen auf Brauchwasserniveau (ca. 60 °C) erwärmen.

Bei der Anlage in Mönchengladbach ist keine Wärmerückgewinnung installiert. Bei der nächsten Anlage plant EPTA eine Wärmerückgewinnung ein. Dazu soll ein zusätzlicher Wasserkreislauf verwendet werden, der ein Wasserheizregister beheizt; bei R404A wird ein zusätzlicher Wärmerückgewinnungsverflüssiger in der Lüftungszentrale der Supermarkt Be- und Entlüftung montiert [Görner2007].

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen Möglichkeiten, insbesondere Expansionsmaschine und Dampfstrahlverdichter als Expansionsorgan.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Dänemark, Deutschland, Norwegen, Schweden, Schweiz.

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Erste Pilotanlagen im Jahr 2006 bei Aldi waren ca. 50 % teurer (120.000 € statt 80.000 €) [Schneider2007]. Kurzfristiges Ziel von EPTA: 20 % teurer als vergleichbare R404A-Anlage [Tillner-Roth2008]. Zurzeit noch höherer Mehrpreis [Görner2007]. Hauptmehrkosten durch teuere Komponenten, insbesondere Hochdruck (120 bar) Wärmeüberträger [Sienel2007]; Rohrleitungen jedoch zum Teil preiswerter, da kleiner.

### 15. Installationskosten

Etwas über denen von einer vergleichbaren R404A-Anlage, da die Befüllung, Inbetriebnahme und Einregulierung der Anlage noch zeitintensiver ist [Görner2007]. Bei großen Supermärkten mit großer zu installierender Kälteleistung müsste R744 langfristig preiswerter werden als HFKW, da die Rohre bei R744 kleiner und damit preiswerter sind und weniger Kältemittel benötigt wird sowie dieses deutlich preiswerter ist [Görner2007].

Bei der R744-Tiefkühlkälteanlage (in Kaskade zu R404A) eines 5000 $m^2$ großen EDEKA-Marktes mit einer Kälteleistung von 34,5 kW haben die Einsparungen bei den Rohrleitungen und beim Kältemittel (70 kg R744 gegenüber ca. 140 kg R404A einer vergleichbaren Anlage) die Mehrkosten bei den Verdichtern, Sicherheitsventilen und Gassensorik aufgewogen [Post2007].

16. Betriebskosten

Energiekosten unter denen von einer vergleichbaren R404A-Anlage, siehe Punkt 10. Service-/Wartungskosten höher, da noch neue Technologie und bisher nur wenige geschulte Monteure [Görner2007].

17. Wartungsintervalle

Kürzere Wartungsintervalle als bei einer vergleichbaren R404A-Anlage empfehlenswert, da der R744-Gaskühler auf Grund der höheren Drucklage im überkritischen Betrieb empfindlicher auf Verschmutzung reagiert. Er muss deshalb häufiger gereinigt werden [Görner2007].

18. Wartungskosten

Ca. 20 – 50 % höher als bei R404A.

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

EPTA bis September 2007: ca. 25 Anlagen EU-weit [EPTA2004 und Görner2007]. Insgesamt in Europa von verschiedenen Herstellern inzwischen über 60 derartige Supermärkte gebaut.

20. Regionale Verbreitung

Inzwischen (September 2007) über 60 Supermärkte in Europa mit derartigen Kälteanlagen, davon 1 in Belgien, 11 in Dänemark, 6 in Deutschland, 1 in Großbritannien, 5 in Italien, 3 in Luxemburg, 4 in Norwegen, 20 in Schweden und 6 in der Schweiz. Darüber hinaus mindestens ein Markt in Australien [IIR Newsletter No. 33, Januar 2008].

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Bei EPTA: Seit 1998 in Tiefkühlung als Kaskade und seit 2001 in Direktverdampfung [EPTA2004]. Bei Carrier/Linde seit November 2004 über 70.000 Betriebsstunden aller Anlagen zusammen [Sienel2007].

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Bisher laufen die Anlagen relativ zuverlässig [Görner2007]. Im Rahmen der Komponentenoptimierung wird die Zuverlässigkeit noch weiter steigen [Görner2007].

23. evtl. besondere Probleme

Bei Stillstand der Kälteanlage kann es zu hohen Drücken kommen. Der Sättigungsdruck von R744 beträgt zum Beispiel bei 20 °C 57,3 bar. Die meisten Komponenten der Niederdruckseite sind jedoch nur für 32 bzw. 40 bar ausgelegt. Zur Vermeidung von unzulässig hohem Druck im Stillstand bieten sich verschiedene Verfahren an. Der Systemdruck richtet sich nach der kältesten Stelle in der Kälteanlage. Das heißt, dass bei einem Stillstand die in der Tiefkühlung gespeicherte Kälte den R744-Druck zunächst begrenzt. Bei einem Stromausfall wird deshalb erst nach ca. 2 bis 3 Stunden Kältemittel abgeblasen. Durch das Abblasen eines Teils der Füllmenge wird die verbleibende R744-Menge gekühlt. Nach 6 Stunden Stromausfall sind ca. 15 bis 20 % der R744-Füllmenge aus der Anlage entwichen und müssen von einem Monteur nachgefüllt werden [Frogner2005]. Alternativ kann man auch einen Kältespeicher in der Anlage vorsehen oder einen Behälter durch eine separate Kälteanlage kühlen lassen [Rolfsman2000]. Eine kleine separate Kälteanlage kann z. B. den Sammler kühlen [Sienel2007]. Expansionsbehälter, die die gesamte Füllmenge in Gasform aufnehmen können wären für die weitverzweigten Supermarktkälteanlagen zu groß [Rolfsman2000].

Bei zweistufigen Anlagen ist dem Ölhaushalt besondere Beachtung zu schenken, um eine Ölverlagerung vom Hochdruck- in den Niederdruckverdichter vorzubeugen [Gebhardt2003].

## 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Umweltfreundlich durch ungiftiges, nicht-brennbares Kältemittel ohne Ozonabbaupotential und mit sehr niedrigem Treibhauspotential. Der Energieverbrauch der Kälteanlage ist ebenfalls sehr niedrig mit Ausnahme von hohen Außenlufttemperaturen.

Flexibilität ist noch nicht im gleichen Maße gegeben wie bei R404A-Anlagen, da noch nicht genügend Erfahrungen mit Modifikationen vorliegen.

Am Kühlregal ist die Temperatur auf Grund der größeren Verdampfungswärme mit R744 stabiler als mit R404A [Görner2007]. Gleichzeitig ist die Verdampfungstemperatur auf Grund des besseren Wärmeübergangs theoretisch bis zu 3,5 K höher; in der Praxis wurden an ausgeführten R744-Anlagen ca. 2 K höhere Verdampfungstemperaturen gemessen als an R404A-Anlagen [Madsen2007, Heibokel2005].

## 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Geht problemlos [Görner2007], jedoch müssen alle Komponenten den höheren Drücken und kleineren Strömungsquerschnitten angepasst werden.

## 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der niederdruckseitigen Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden.

**Bezugsquellen**

## 27. Hersteller

EPTA: Belgien (1 Anlage), Dänemark (4 Anlagen), Deutschland (2), Großbritannien (1), Italien (5), Luxemburg (2), Norwegen (1) und Schweden (6) [EPTA2004, Görner2007 und KKA2006].

Dresdner Kühlanlagenbau eine eigene Versuchsanlage

Goetz: Schweiz (2 Anlagen)

Green and Cool: Norwegen (1 Anlage)), Schweden (14 Anlagen) [homepage von Green and Cool und Abgleich mit EPTA-Anlagen]

Hauser eine eigene Versuchsanlage

Knudsen Køling: Dänemark (4 Anlagen) [Madsen2007]

Linde: Dänemark (3 Anlagen), Deutschland (4), Luxemburg (1), Norwegen (1) und Schweiz (4) [Bucher2007].

Trondheim Kulde: Norwegen (1 Anlage)

Die Angaben in Klammern beziehen sich auf die jeweils bis August 2007 ausgeführten Anlagen.

## 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

## 29. Komponentenhersteller

Expansionsventil: Danfoss (bisher nur elektronisch – diese sind deutlich teurer als thermostatische!)
Möbel Costan, Linde
Verdichter: Bitzer, Bock, Dorin
Wärmeübertrager: Güntner, Luve

## 30. Betreiber

Bis Ende 2007 insgesamt in Europa über 60 Märkte, einzelne Ketten bisher erst eine „Demonstrationsanlage"; andere bereits mit mehreren Märkten – siehe Zahlenangaben hinter den Firmennamen:

Belgien: Delhaize (Epta I)
Dänemark: Lidl (Carrier/Linde 3), Rema 1000 (Knudsen Køling 1), Spar (Epta zusammen mit Odense Køleservice 1), Super Best (Epta zusammen mit Odense Køleservice 2, Knudsen Køling 2)
Deutschland: Aldi Süd (Carrier/Linde 3, Epta 2), Aldi Nord (in Planung), Lidl (Carrier/Linde 1), Anfragen von: Metro, Norma und Rewe
Großbritannien: Tesco (Epta 1)
Italien: Avesani (Epta 1), Bingo (Epta 1), Coop (Epta 1), De Bastiani (Epta 1), Preadium Trade (Epta 1)
Luxemburg: Delhaize (Carrier/Linde 1 und Epta 1), GB (Epta 1)
Norwegen: Hakon Rimi Tempe (Epta 1), ICA (Carrier/Linde 1, Green and Cool 1 und Trondheim Kulde 1)
Schweden: Coop (Epta 2 und Green and Cool 3), Ica (Epta 4 und Green and Cool 8), Konsum (Green and Cool 3)
Schweiz: Aligro[1] (Carrier/Linde 1), Coop (Carrier/Linde 1), CC Growa[2] (Goetz 1), Migros (Carrier/Linde 1), Top CC² (Carrier/Linde 1)

Die Werte in Klammern stellen den Anlagenbestand bis August 2007 dar.

[1] Großmarkt
[2] Cash and Carry Markt

**Quellen**


[Arias2007] Arias, J.; Vahlén, P.; Westman, O.: Utvärdering av två butiker med transkritiska kylsystem med $CO_2$ som köldmedium. KTH Stockholm März 2007

[Bader2007] Bader, T.: Email vom 08.12.2007 zum Energieverbrauch von R744-Kälteanlagen in Märkten von Aldi Süd.

[Brouwers2007] Brouwers, C.: Christoph Brouwers auf dem ersten Expertentreffen am 28. Februar 2007 in Berlin

[Bucher2007] Bucher, E.W.: Gespräch mit Erik Wolfgang Bucher, Linde am 18.1.2007

[EPTA2004] EPTA-Vortrag: Supermarktkühlung mit $CO_2$. am 27.5.2004 auf der EHI Tagung in Zürich.

[Frogner2005] Frogner, V.: $CO_2$ i dagligvarehandelen. FOKU Seminar, 29.11.2005

[Gebhardt2003] Gebhardt, D.; Kruse, H.; Schiesaro, P.: Entwicklung einer transkritischen zweistufigen Supermarktkälteanlage für Tief- und Normalkühlung (2). Die Kälte und Klimatechnik 56, 10 (2003), S. 54 – 65

[Gerber2008] Gerber, R.: Email von Raphael Gerber, Frigo-Consulting vom 26. Mai 2008

[Görner2007] Görner, U.: Gespräch mit Udo Görner, EPTA Deutschland am 12.1.2007 sowie Korrekturen durch U. Görner mit Email vom 22.1.2007

[Heinbokel2005] Heinbokel, B.; Gernemann, A.: Eine neuentwickelte $CO_2$-Kälteanlage für den Normal- und Tiefkühlbereich in einem Schweizer Hypermarkt. DKV Jahrestagung 2005, Würzburg.

[Heinbokel2006] Heinbokel, B.: Transkritische $CO_2$-Anlagen im Supermarkt. ÖKKV-Jahrestagung, Bregenz 27. – 28. April 2006

[Heinbokel2007] Heinbokel, B.: Persönliches Gespräch am 18. Januar 2007

[KKA2006] KKA: Kohlendioxid im Supermarkt. Heft 5 2006

[Linde2007] Information der Firma Linde, übermittelt von Christoph Brouwers, „Fragebogen Linde-bearbeitet-Kallwitz 2007.xls“

[Madsen2007] Madsen, K.: Gespräch mit Kenneth Madsen vom Dänischen Technologischen Institut am 11.4.2007.

[Post2007] Post: Gespräch mit Herrn Post, Linde am 7.2.2007 im Gebauer EDEKA aktiv Markt Filderstadt.

[Rolfsman2000] Rolfsman, L.: Driftserfaringer med $CO_2$ anlæg, praktiske eksempler. Danske Køledage 2000, Odense, Dänemark.

[Sawalha2008] Sawalha, S.: Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration. Dissertation Royal Inst. Of Technology, Stockholm, Sweden 2008, Trita REFR Report No. 08/60 ISSN 1102-0245

[Schneider2007] Schneider, H.: Gespräch mit Holger Schneider, Geschäftsführer Aldi Süd Mönchengladbach am 18.1.2007 während der Besichtigung zweier Aldi-Supermärkte mit R744.

[Sienel2007] Sienel, T.; Finckh, O.: $CO_2$-DX Systems for Medium- and Low-Temperature Refrigeration in Supermarket Applications. IIR 22. Int. Congr. of Refr., Peking, China, 21. – 26. August 2007

[Tillner-Roth2008] Tillner-Roth, R.: Zukunftsweisende Kältemittel – Lösungen für den LEH. Kälte Klima Aktuell 27, 1 (2008), S. 26 - 28

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 - 33

Technologie-Datenblatt zu

## 4.14 C14: R744 Direktverdampfung in Kaskade zu (H-F-)KW

R744 in Direktverdampfung im gesamten Supermarkt, d. h. Normal- und Tiefkühlung. Auf Grund der in Kapitel C13 genannten energetischen Nachteile bei höherer Außenlufttemperaturen sowie der höheren Verfügbarkeit von R744-Komponenten für „normale“ Drücke (maximale Anlagendrücke im $CO_2$-Bereich 40 bar), wird hier sowohl die NK- als auch die TK-R744-Anlage in Kaskade zu einer kompakten HFKW- bzw. KW-Kälteanlage ausgeführt, siehe Bild C14.1. Dadurch wird das R744 unabhängig von der Außenlufttemperatur immer verflüssigt. In Dänemark werden die Anlagen der oberen Stufe seit 1.1.2007 immer mit einem Glykolkreislauf gekühlt, um bei Einsatz von HFKW als Kältemittel unterhalb von 10 kg Füllmenge zu bleiben. Die Druckdifferenz über den NK-Verdichter beträgt nur 4 bar, welches der minimalen Auslegungsdruckdifferenz für die verwendeten elektronischen Expansionsventile entspricht [Madsen2007].

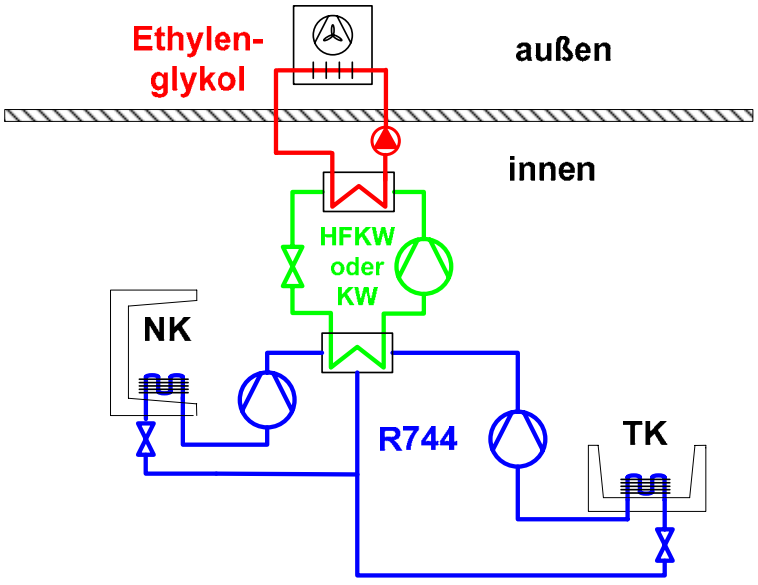



Bild C14.1: R744-Kälteanlage Direktverdampfung in NK und TK, beide als Kaskade zu einer HFKW- bzw. KW-Anlage.

**Kältedaten**

1. Einsatzzweck

Zentrale Verbundkälteanlage

2. Kälteleistungsbereich

Alles möglich; in Dänemark typisch in Discounter installiert: NK 24 kW und TK 10 kW [Madsen2007].

3. Art der Kälteübertragung

Direkt

4. Kältemittelart

R744 und R410A, früher auch R134a [Madsen2007].

5. Kältemittelfüllmenge

In Dänemark seit 1.1.2007 nur noch maximal 10 kg HFKW.

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

HFKW unter 5 %, R744 ca. 10 %.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

[Madsen 2007].

8. Art der Ableitung

Sicherheitsventile blasen ins Freie ab. In dänischem Discounter befinden sich keine R744-Detektoren im Markt, weder im Kühlraum noch im Maschinenraum oder im Verkaufsraum [Madsen2007].

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

HFKW Entsorgung über Fachbetrieb, R744 könnte auch langsam in die Umwelt abgelassen werden – langsam, damit kein Öl mitgerissen wird.

**Energie**

10. Energieverbrauch

Noch nicht bekannt vermutlich aber ähnlich dem einer vergleichbaren HFKW-Verbundanlage oder etwas darunter, da R744 deutlich bessere Eigenschaften hat.

11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Vorhanden.

12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Dänemark

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Zwischen gleich und bis zu 20 % über denen einer dem einer HFKW-Anlage [Madsen2007].

15. Installationskosten

Etwas höher als C1.

16. Betriebskosten

Energiekosten unter denen von einer vergleichbaren R404A-Anlage, siehe Punkt 10. Service-/Wartungskosten vermutlich höher, da noch neue Technologie und bisher nur wenige geschulte Monteure.

17. Wartungsintervalle

Einmal im Jahr.

18. Wartungskosten

Ca. 20 – 50 % höher als bei R404A [Madsen2007].

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Über 100 in Dänemark, bis 31.12.2006 mit Direktverflüssigung des HFKW-Kältemittels an der Umgebungsluft; seit 1.1.2007 nur noch mit Glykolkreislauf und wassergekühltem Verflüssiger [Madsen2007].

### 20. Regionale Verbreitung

Dänemark

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Ca. 5 Jahre.

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Bisher laufen die Anlagen relativ zuverlässig [Madsen2007].

### 23. evtl. besondere Probleme

Bei Stillstand der Kälteanlage kann es zu hohen Drücken kommen. Der Sättigungsdruck von R744 beträgt zum Beispiel bei 20 °C 57,3 bar. Die meisten Komponenten der Niederdruckseite sind jedoch nur für 32 bzw. 40 bar ausgelegt. Zur Vermeidung von unzulässig hohem Druck im Stillstand bieten sich verschiedene Verfahren an. Der Systemdruck richtet sich nach der kältesten Stelle in der Kälteanlage. Das heißt, dass bei einem Stillstand die in der Tiefkühlung gespeicherte Kälte den R744-Druck zunächst begrenzt. Bei einem Stromausfall wird deshalb erst nach ca. 2 bis 3 Stunden Kältemittel abgeblasen. Durch das Abblasen eines Teils der Füllmenge wird die verbleibende R744-Menge gekühlt. Nach 6 Stunden Stromausfall sind ca. 15 bis 20 % der R744-Füllmenge aus der Anlage entwichen und müssen von einem Monteur nachgefüllt werden [Frogner2005]. Alternativ kann man auch einen Kältespeicher in der Anlage vorsehen oder einen Behälter durch eine separate Kälteanlage kühlen lassen [Rolfsman2000]. Expansionsbehälter, die die gesamte

Füllmenge in Gasform aufnehmen können, wären für die weitverzweigten Supermarktkälteanlagen zu groß [Rolfsman2000].

Dänische Supermärkte blasen bei Stromausfall $CO_2$ kontrolliert ab [Madsen2007].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Umweltfreundlich durch ungiftiges, nicht-brennbares Kältemittel ohne Ozonabbaupotential und mit sehr niedrigem Treibhauspotential. Der Energieverbrauch der Kälteanlage ist ebenfalls sehr niedrig.

Am Kühlregal ist die Temperatur auf Grund der größeren Verdampfungswärme mit R744 stabiler als mit R404A [Görner2007].

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Geht Problemlos [Görner2007].

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Sicherheitsventile an allen Anlagenteilen der R744-Seite erforderlich, die einzeln abgesperrt werden können, da Stillstandsdruck der Anlage deutlich über dem Auslegungsdruck der niederdruckseitigen Komponenten liegt.

Trockeneisbildung bei Entspannung von R744 unter 5,2 bar beachten; z. B. Kälteanlage bei Inbetriebnahme mit Gas vorfüllen, keine Rohre am Ausgang von Sicherheitsventilen anbringen etc. [Vestergaard2006].

Da R744 in höheren Konzentrationen (über 10 % in Luft) toxisch wirkt, müssen in allen Räumen in denen bei einer größeren R744-Kältemittelverluste hohe Konzentrationen auftreten können in Bodennähe $CO_2$-Sensoren installiert werden.

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Tempcold, DK

### 28. evtl. Importeur

Nicht relevant.

## 29. Komponentenhersteller

Expansionsventil: Danfoss (bisher nur elektronisch – diese sind deutlich teurer als thermostatische!)
Möbel Costan, Linde
Verdichter: Bitzer, Bock, Dorin
Wärmeübertrager: Güntner, Luve

## 30. Betreiber

Dänemark: z. B. REMA 1000 (Tempcold),

## Quellen

[Frogner2005] Frogner, V.: $CO_2$ i dagligvarehandelen. FOKU Seminar, 29.11.2005

[Görner2007] Görner, U.: Gespräch mit Udo Görner, EPTA Deutschland am 12.1.2007 sowie Korrekturen durch U. Görner mit Email vom 22.1.2007

[Madsen2007] Madsen, K.: Gespräch mit Kenneth Madsen vom Dänischen Technologischen Institut am 11.4.2007.

[Rolfsman2000] Rolfsman, L.: Driftserfaringer med $CO_2$ anlæg, praktiske eksempler. Danske Køledage 2000, Odense, Dänemark.

[Vestergaard2006] Vestergaard, N.P.; Bock, R.: Zu beachtende Charakteristika bei $CO_2$-Kälteanlagen. Die Kälte- und Klimatechnik 59, 1 (2006), S. 26 - 33

Technologie-Datenblatt zu

## 4.15 **C15: Distributed Systems**

Distributed Systems, auch als „Hussmann Protocol“ bekannt, wurden 1993 von der Fa. Hussmann, USA vorgestellt. Es sind kompakte Verdichterverbünde mit wassergekühlten Verflüssigern. Die Verdichterverbünde befinden sich in schallgedämmten Gehäusen, die im Supermarkt platziert werden. Als Kältemittel wird von der Fa. Hussmann immer R404A eingesetzt. Derartige Anlagen gibt es zwei in der Schweiz (Migros Schweiz) [Schmutz2007] sowie zwei in Österreich und eine in der Schweiz bei denen jedoch nur der TK-Teil als distributed System ausgeführt ist [Kaltenbrunner2007]. In USA, wo diese Anlagen vor einigen Jahren recht populär waren, sind sie nach Aussage von Herrn Haaf, Fa. Linde, wieder auf dem Rückzug. Dem steht jedoch die Aussage von Garry gegenüber, demzufolge einige amerikanische Firmen bis 2011 einen Marktanteilsanstieg auf 50 % erwarten [Garry2007]. Laut Garry betrug der Marktanteil bei neu gebauten Supermärkten im Jahr 2006 in den USA ca. 15 %.

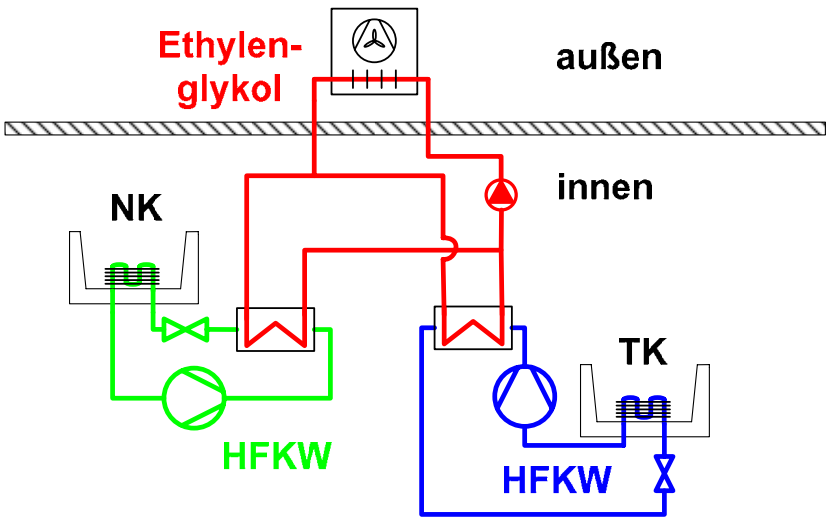



Bild C15.1: Distributed System.

## Kältedaten

### 1. Einsatzzweck

Im Verkaufsbereich verteilte Kältesysteme bestehend aus Verdichter und wassergekühltem Verflüssiger. Alle Verflüssiger führen ihre Wärme über eine Ringleitung mit Wasser/Glykol an die Außenluft ab. In Österreich und der Schweiz existieren drei Märkte bei denen nur der TK als distributed System ausgeführt ist. Die Verflüssigungswärme der TK-Anlagen wird an den Kälteträger der NK-Anlage abgegeben. Der Kälteträger der Normalkühlung wird in den beiden österreichischen Märkten mit R717 und in dem schweizerischen Markt mit R134a gekühlt [Kaltenbrunner2007].

### 2. Kälteleistungsbereich

Die einzelnen Verdichter-Inseln haben zwischen 15 und 40 kW Kälteleistung.

### 3. Art der Kälteübertragung

Direkt, allerdings Verflüssigung über einen Wasserkreislauf.

### 4. Kältemittelart

In den verteilten Systemen R404A.

### 5. Kältemittelfüllmenge

Ca. 25 bis 33 % weniger als vergleichbare R404A Verbundanlagen mit Direktverdampfung [Garry2007]. Baxter gibt sogar bis zu 50 % geringere Kältemittelfüllmengen an [Baxter2006].

## Kältemittelverluste

### 6. Typische Kältemittelverlustraten

Niedriger als die von Verbundanlagen mit Direktverdampfung, da ein Distributed System weniger Verbindungen und kürze Rohrstrecken enthält [Garry2007].

### 7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

[Garry2007]

### 8. Art der Ableitung

Ins Freie.

### 9. Verbleib des KM bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb

## Energie

### 10. Energieverbrauch

Simulationsrechnungen für einen 3.700 $m^2$ großen amerikanischen Supermarkt ergaben 17 bis 22 % weniger Energieverbrauch als vergleichbare R404A-Direktverdampfungskälteanlage [Walker1999]. Allerdings wurde für die Anlage mit Distributed Systems ein sprühbefeuchteter Wärmeüberträger zur Wärmeabgabe an die Umgebung verwendet, der pro Jahr 4.700 $m^3$ Wasser benötigen würde. Ohne Sprühbefeuchtung würde die Energieeinsparung ca. 5,5 bis 8,5 % betragen. Ein großer Teil des niedrigeren Energieverbrauchs der distributed Systems entfällt auf die geringeren Saugleitungsdruckverluste und niedrigerenTemperaturanstieg des Kältemittels in der Saugleitung durch Wärmeeinfall aus der Umgebung. Distributed Systems sind deutlich kompakter und haben keine langen Saugleitungen [Walker1999]. Dadurch sind die Druckverluste gegenüber Direktverdampfungssystemen um die Hälfte reduziert und der Temperaturanstieg durch Wärmeeinfall aus der Umgebung wird um 80 bis 90 % reduziert [Walker1999]. Berechnungen eines Herstellers prognostizieren 5 bis 10 % Energieeinsparungen gegenüber traditionellen Verbundkälteanlagen mit R404A Direktverdampfung [Garry2007].

Zwei Supermärkte in Österreich und einer in der Schweiz verwenden die distributed Systems nur für den TK-Bereich. Die Verflüssigungswärme der im Markt befindlichen

R404A Anlagen wird bei diesen Märkten an den Kälteträger der NK-Kälteanlage abgegeben. Die beiden österreichischen Märkte verwenden R717 und der schweizerische Markt R134a zur Kühlung des NK-Kälteträgers. Durch die sehr niedrige Verflüssigungstemperatur der TK-Anlage von ca. 5 °C verbrauchen diese Systeme vergleichsweise wenig Energie [Kaltenbrunner2007]. Der Energieverbrauch der NK-Anlage steigt jedoch an, so dass der Energieverbrauch der gesamten Kälteanlage dem einer R404A-Direktverdampfungsanlage vergleichbar ist [Kaltenbrunner2007].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Sehr gut möglich, da die gesamte Verflüssigerwärme aller Kälteanlagen über einen Wasserkreislauf an die Umgebung abgeführt wird [Walker1999].

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen.

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

USA: Simulationsrechnungen für Worcester, MA, Washington, DC, Memphis, TN, Los Angelas, CA [Walker1999]. Neusiedel und Klagenfurt, Österreich sowie Baden, Schweiz [Kaltenbrunner2007].

## Lebenszykluskosten

### 14. Investition / Komponentenkosten

Für neue, große Supermärkte, die für distributed System ausgelegt werden, preiswerter als R404 Direktverdampfungsverbundanlagen [Garry2007]. Für kleine Supermärkte kann ein distributed System jedoch auch teurer als eine Verbundanlage werden; für einen 700 $m^2$ Supermarkt in Kanada z. B. 20 bis 30 % teurer [Garry2007].

### 15. Installationskosten

Vermutlich niedriger als diejenigen einer vergleichbaren HFKW-Direktverdampfungsanlage (C1).

### 16. Betriebskosten

Ca. 10 % unter denen von C1.

17. Wartungsintervalle

Je nach HFKW-Füllmenge bis zu viermal im Jahr, aber seltener als C1, da Füllmenge kleiner.

18. Wartungskosten

Ähnlich denen einer HFKW-Verbundanlage (C1).

**Marktanteil**

19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Bei neuen Supermarktkälteanlagen in den USA ist der Anteil der distributed Systems von 4 % im Jahr 2001 auf 15 % im Jahr 2006 gestiegen. Bis 2011 erwarten einige amerikanische Firmen einen Anstieg auf 50 % [Garry2007]. Eine treibende Kraft dürfte der von der US EPA ausgeschriebene CreenChill Wettbewerb sein.

20. Regionale Verbreitung

USA und einige wenige in Österreich (2 in Neusiedel und Klagenfurt) und der Schweiz (3 u. a. in Baden).

**Betriebserfahrungen**

21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

Seit Mitte der 1990er Jahre in den USA, Österreich und der Schweiz.

22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Sehr zuverlässig.

23. evtl. besondere Probleme

Keine.

24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Sehr flexibel, da im Verkaufsraum „nur“ Wasserleitungen verlegt sind.

25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Ja, es können sogar Verkaufsmöbel weiterverwendet werden. Gegebenenfalls Reinigung von Mineralöl beachten und Dichtungsaustausch an Ventilen beachten.

26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Keine.

## Bezugsquellen

27. Hersteller

Hussman (USA) u. a.

28. evtl. Importeur

-

29. Komponentenhersteller

Viele.

30. Betreiber

Zahlreiche in USA, wenige in Österreich und Schweiz.

## Quellen

[Baxter2006] Baxter, V.D.: Advances in Supermarket Refrigeration Systems. IEA Annex 26 Summary. ORNL 2006

[Garry2007] Garry, M.: Split Refrigeration. Supermarket News, Juli 2007, S. 43 - 48

[Kaltenbrunner2007] Kaltenbrunner, B.: Email vom 14.9.2007

[Schmutz2007] Schmutz, B.: Persönliche Kommunikation mit Beat Schmutz von Schmutz, Starkl und Partner 2007

[Walker1999] Walker, D.: Development and demonstration of an advanced supermarket refrigeration/HVAC system. Oak Ridge National Laboratory, ORL-SX363C-FM-97163-1231, März 1999

## 4.16 **C16:** Conveni-Pack – Kombinierte Kälteversorgung, Klimatisierung und Beheizung von kleinen bis mittelgroßen Ladenformaten

### Kältedaten

#### 1. Einsatzzweck

Gleichzeitige Versorgung von NK-Kühlmöbel (TK optional), Heizung und Marktklimatisierung durch einen gemeinsamen Kältesatz mit integrierter Wärmerückgewinnung, d. h. autarke, monovalente Beheizung mittels vorhandener Verflüssigungswärme inkl. Wärmepumpen-Unterstützung (falls erforderlich) gewährleistet.

#### 2. Kälteleistungsbereich

Derzeit NK 15,8 kW bei einer Verdampfungstemperatur von -8 °C, Umgebungstemperatur von 35 °C und einer Rohrleitungslänge von 20 m sowie gleichzeitiger Klimatisierung mit 14,5 kW Kälteleistung. TK mit Boosterverdichter bis 2,0 kW Kälteleistung möglich. Die maximale Heizleistung des Systems beträgt 30 kW. Sie wird im Wärmepumpen Modus erzeugt, bei dem die Verflüssigungswärme der Gewerbekälte mittels Wärmerückgewinnung genutzt wird [Zeller2006]. Durch den Einsatz mehrerer Systeme sind o. g. Leistungen skalierbar [Vogelbacher2007].

#### 3. Art der Kälteübertragung

Direkt

#### 4. Kältemittelart

R407C [Zeller2006]; Ausschlaggebend für die Wahl des Kältemittels war die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems, d. h. ein Universalkältemittel für Normal- u. Tiefkühlung, Klimatisierung und Wärmepumpenbetrieb.
In Zukunft evtl. auch R410A [Vogelbacher2007]. Es wird erwartet, dass die Conveni-Packs mit R410A weniger Energie verbrauchen [Vogelbacher2007].

5. Kältemittelfüllmenge

10 bis 25 kg pro Pack, abhängig vom erforderlichen Rohrleitungsnetz im Markt.

**Kältemittelverluste**

6. Typische Kältemittelverlustraten

Messwerte noch nicht vorhanden. Es werden jedoch gegenüber herkömmlichen Verbundanlagen niedrigere Kältemittelverlustraten erwartet. Gründe hierfür sind [Vogelbacher2007]:

- bördelfreie Anlage, d. h. keine lösbaren Verbindungen vorhanden,
- Einsatz von Scrollverdichtern (Vermeidung von Druckspitzen durch Pulsation),
- drehzahlgeregelte Inverter-Verdichter (weniger Anlaufbelastung, weniger Starts/Stopps),
- Fernüberwachung über Daikin-eigenes Online-Diagnosesystem zur Früherkennung von Störungen und somit Eindämmung von Kältemittelverlusten,
- da das Gesamtrohrnetz bei diesem Mehrmodulsystem in Einzelrohrnetze aufgeteilt ist, kann im Havariefall nie die komplette Kältemittelmenge austreten.

7. Quelle der Kältemittelverlust-Information

Daikin Deutschland beruhend auf langjährigen Erfahrungen mit VRF-Systemen [Vogelbacher2007].

8. Art der Ableitung

Die Conveni-Packs verfügen über keinerlei Sicherheitsventile [Vogelbacher2007]. Durch ein Sicherheitsmanagement und Frequenzregelung verhindert die Anlage selbständig ein „blindes“ Fahren in schädliche Betriebszustände bzw. Druckniveaus.
Als Doppel-Backup ist zusätzlich eine Berstplatte vorhanden.

9. Verbleib des Kältemittels bei Außerdienststellung

Entsorgung über Fachbetrieb.

**Energie**

### 10. Energieverbrauch

Ähnlich dem einer Verbundanlage mit HFKW es sind jedoch verschiedene Energiesparmaßnahmen direkt ab Werk eingebaut. Bisherige Erfahrungswerte aus Japan:
Wärmerückgewinnung bringt gegenüber einer separat betriebenen Heizung ca. 23 %;
Drehzahlregelung des Hauptverdichters und der Verflüssigerlüftermotoren mittels DC-Inverter Motortechnik bringt 12 %;
zweistufige Verdichtung für TK spart 6 %;
eine Saugdruckregelung, die immer den höchsten Saugdruck einregelt bringt 4 %;
energieoptimierte Verflüssigungsdruckregelung bringt 3 %
Alle Angaben aus [Zeller2006].

### 11. Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung

Ab Werk fest installiert. Beheizung über Direktkondensation, d. h. die Verflüssigungswärme ist bei Bedarf vollständig nutzbar.

### 12. Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung

Die meisten in Modelltechnologien, Kapitel 6, beschriebenen Technologien ließen sich auch hier einsetzen. So wird z. B. zurzeit noch je nach Möbelhersteller eine elektrische Abtauung verwendet [Vogelbacher2007].

Durch die integrierte Klimafunktion erfolgt eine effizientere Marktluftentfeuchtung als durch eine Gewerbekälteanlage [Vogelbacher2007].

Verbesserungspotential: weniger Abtauzyklen oder Latentwärmenutzung + Umluftabtauung [Vogelbacher2007].

### 13. Klima- und Einsatzbedingungen unter denen die jeweiligen Angaben gewonnen wurden

Japan (seit 2002), Belgien (seit 2004), UK (seit 2005) und Deutschland (seit 2007).

**Lebenszykluskosten**

14. Investition / Komponentenkosten

Ähnlich denen einer Verbundanlage; je nach Vergleich (ob mit oder ohne Klimaanlage bei Verbundanlage) 10 % preiswerter oder 10 % teurer. Für einen deutschen Discounter liegt die Amortisationsdauer je nach Bestandskonzept zwischen 1,5 und 2,8 Jahren. Der Anteil der Komponentenkosten an den Gesamtkosten ist höher als bei konventionellen Systemen. Grund hierfür ist die Kompaktbauweise des Systems, d. h. die Verlagerung von Montageanteilen von der Baustelle ins Werk [Vogelbacher2007].

15. Installationskosten

Der Anteil der Montagekosten an den Gesamtkosten ist geringer als bei konventionellen Systemen (siehe Punkt 14) [Vogelbacher2007].

16. Betriebskosten

Betriebskosten des Conveni-Pack im Vergleich zu einem System mit Kälteverbund, Gas-Heizung und Lüftung ca. 30 % wirtschaftlicher. Es fallen keine Wartungskosten für die Gasheizung und den Schornstein an [Vogelbacher2007]. Dies gilt für alle Anlagen, die durch Wärmerückgewinnung auf eine separate Heizungsanlage verzichten können. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass der Gas/Öl/Fernwärmeverbrauch komplett eingespart wird. D. h. mit der elektrischen Energie, mit der zuvor nur die Kälteanlage betrieben wurde kann jetzt auch der Markt beheizt werden [Vogelbacher2007].

17. Wartungsintervalle

Nach Bedarf durch das Vorhersage- bzw. Früherkennungssystem kann eine Präventivwartung erfolgen [Vogelbacher2007].

18. Wartungskosten

Siehe Punkt 17. Vermutlich langfristig niedriger, da Wartung des Heizkessels inkl. Schornstein entfällt [Vogelbacher2007].

## Marktanteil

### 19. Anzahl installierter Geräte und Anlagen (Schätzung)

Bis Anfang 2008 ca. 4.000 Anlagen in Japan, 20 in Belgien und 100 in Großbritannien [Vogelbacher2008]. In Deutschland sind Anlagen bei einem Discounter mit drei Conveni-Packs (40 kW NK + 70 kW Klima mit max. 90 kW Heizung – Verflüssiger der Kälteanlage plus Wärmepumpenbetrieb der Klimaanlage) gebaut worden [Vogelbacher2008]. Mitte 2008 werden in Deutschland ca.10 Märkte in Betrieb sein und weitere in Planung [Vogelbacher2008].

### 20. Regionale Verbreitung

Japan, Großbritannien, Belgien, Deutschland, restliches Europa in Vorbereitung

## Betriebserfahrungen

### 21. Schätzung der Jahre Betriebserfahrung

6 Jahre mit Conveni-Pack in Japan – Klimaanlagen mit WRG/Wärmeverschiebung sind seit über 20 Jahren im Einsatz [Vogelbacher2008].

### 22. Angaben zur Zuverlässigkeit

Durch Mehrmodulsystem sehr zuverlässig, basierend auf VRF-Technologie [Vogelbacher2007]. Die ersten Ergebnisse zeigen einen sehr sicheren Betrieb. Besonders bei den Kühlmöbeltemperaturen kommt es durch die Drehzahl-Inverterregelung der Verdichter zu extrem stabilen, gleichmäßigen Temperaturen [Vogelbacher2008].

### 23. evtl. besondere Probleme

Bestandskühlmöbel, die vorher mit R22 betrieben wurden, können nach der Umrüstung Probleme bereiten, wenn nicht alle kältemittelführenden Teile gründlich gereinigt werden (Kompatibilitätsprobleme beim Öl) [Vogelbacher2007]. Dies gilt generell auch für alle Verbundkälteanlagen in denen bestehende R22-Möbel mit anderen Kältemitteln weiterverwendet werden. Daikin bietet einen Reinigungsservice an [Vogelbacher2007].

### 24. Beschreibung besonderer Eigenschaften wie Flexibilität

Sehr geräuscharm [Vogelbacher2007]
System ist hoch technologisch und trotzdem einfachst in der Planung, Montage und Handhabung [Vogelbacher2008]
Für großvolumigen Einsatz im Lebensmitteleinzelhandel besonders einfach einsetzbar [Vogelbacher2008]
Nutzung von Außenluft als Wärmequelle in der Wärmepumpenschaltung kommt ohne Erdbohrungen aus [Vogelbacher2007]
Integrierung der WRG [Vogelbacher2007]
Platzsparend (Verzicht auf Maschinen- u. Heizungsraum)
Auszeichnung Japan: „Energy Conservation Award ´03“
Auszeichnung UK: “Cooling Industry Award, Environmental Product of the Year ‘06”

### 25. Einsatzmöglichkeit bei Erneuerung eines Supermarktes

Ist vorhanden. Bei Weiterverwendung der Möbel auf gründliche Reinigung achten. Effektivster Einsatz bei vollständiger Erneuerung der Haustechnik [Vogelbacher2007]. Für Betreiber besteht die Möglichkeit der einfachen Energieeffizienzverbesserung einer Filiale, ohne die Notwendigkeit eines Eingriffs in die bauliche Substanz [Vogelbacher2008].

### 26. Relevante Angaben zur Sicherheit der Anlage / des Gerätes

Getrennte Kältemittelkreisläufe für die einzelnen Conveni-Packs. Im Discounter z. B. drei kältemittelseitig getrennte Kreisläufe für NK. Regelung jedoch über eine übergreifende Steuerung. Redundanz, Erhöhung der Verdichteranzahl. Siehe auch Punkt 6. [Vogelbacher2007].

## Bezugsquellen

### 27. Hersteller

Daikin

### 28. evtl. Importeur

Daikin

### 29. Komponentenhersteller

Daikin entwickelt und produziert die Verdichter, Kältemittel, Wärmeüberträger sowie die Elektronik für die Regelung und Überwachung selbst [Vogelbacher2007].

### 30. Betreiber

| | |
|---|---|
| Belgien: | Total, Esso, SPAR, Budget Slager (Shop in Shop im ALDI-Markt) |
| Deutschland: | Penny-Markt (REWE-Gruppe), Super-Bio |
| Japan: | Lawson, Family Mart, 7 Eleven u. a. |
| UK: | United-COOP, ALDI, One-Stop (Tesco-Group) |

## Quellen

[Vogelbacher2007] Vogelbacher, S.: Gespräch mit Steffen Vogelbacher von Daikin am 20. März 2007

[Vogelbacher2008] Vogelbacher, S.: Email von Steffen Vogelbacher von Daikin vom 22. Februar und 25. März 2008

[Zeller2006] Zeller, A.: Energiesparendes Kälte-Klima-Kombisystem für den Convenience-Store. Die Kälte- & Klimatechnik 59, 5 (2006), S. 22 – 30