

Schlüsselwörter: Ammoniak, Kohlendioxid, Propan, Supermarktkälte, Gewerbekälte, Energieeinsparung

Zu den neuesten Entwicklungen im Bereich der Supermarktkälteerzeugung gehören u.a. die Verbesserung der Energieeffizienz, die Reduzierung der Kältemittelfüllmengen und die Anwendung von natürlichen Kältemitteln. Der vorliegende Beitrag stellt verschiedene alternative Anlagenschaltungen wie indirekte Kälteanlagen, verteilte Systeme, Kaskadenkälteanlagen und zweistufige Kälteanlagen vor.

Trends and Perspectives for Supermarket Refrigeration Systems

Keywords: Ammonia, carbon dioxide, propane, supermarket refrigeration, commercial refrigeration, energy savings

This paper describes the latest trends and perspectives in supermarket refrigeration. Focus is on improving energy efficiency, reducing refrigerant charge and using natural refrigerants. Several alternative systems such as indirect, distributed, cascade and two-stage are described.

Trends und Perspektiven für Supermarkt-Kälteanlagen



Einleitung

Die Kühlung von Lebensmitteln war einmal sehr einfach: Unsere Vorfahren verwendeten natürliches Eis und Schnee zur Kühlkonservierung von Lebensmitteln. Ab Mitte des neunzehnten Jahrhunderts wurden Maschinen eingesetzt, um das Eis für die Lebensmittelkühlung maschinell herzustellen. Es finden sich aus dieser Zeit sehr viele, zum Teil wissenschaftliche Artikel, die sich über die Vor- und Nachteile von „künstlich“ erzeugtem Eis gegenüber natürlichem Eis auslassen – eine Diskussion, die ein wenig an die Diskussion unserer Tage zum Einsatz von natürlichen Kältemitteln erinnert.

Recht bald wurde die Kühlung mit Eis durch die direkte Kühlung mittels verdampfendem Kältemittel ersetzt. Bis zu den 1930er Jahren wurden ausschließlich in der Natur vorkommende Substanzen wie Ammoniak, Kohlendioxid, Propan¹ und Schwefeldioxid als Kältemittel verwendet. Wegen der mit diesen Stoffen verbundenen Sicherheitsbedenken, gab es überwiegend große industrielle Kälteanlagen. Versuche in den USA, Kühlschränke einer breiten Bevölkerung in Form von isolierten Schränken mit Verdampfern, die an eine zentrale Kälteanlage angeschlossen wurden, zugänglich zu machen, scheiterten durch immer wieder auftretende Unfälle mit Toten und Verletzten.

¹ Übrigens wurde Propan in den 1920er Jahren in USA als „Sicherheitskältemittel“ vermarktet, da es im Gegensatz zu Ammoniak und Schwefeldioxid ungiftig ist.

Erst durch die Entwicklung und Vermarktung der so genannten Sicherheitskältemittel seit den 1930er Jahren wurde Kältetechnik „publikumsfähig“. Es entstanden Haushaltskühlschränke, Raumkühlgeräte, Kühltheken etc. Kühlung im Lebensmitteleinzelhandel (LEH) war mit diesen Kältemitteln sehr einfach. Es kamen überwiegend R12 und R502 sowie später R22 zum Einsatz. Wegen ihres Ozonabbaupotenzials sind alle drei Kältemittel inzwischen von einer neuen Reihe synthetischer Kältemittel abgelöst worden. Für den Normalkühlbereich (NK) insbesondere in steckerfertigen Geräten wird R134a eingesetzt und für größere zentrale Kälteanlagen R404A. Obwohl sicher für die lokale Umgebung (unbrennbar und ungiftig), haben sie einen großen Nachteil für die globale Umwelt: Sie haben ein mehrere tausend Mal höheres Treibhauspotential (Global Warming Potential – GWP) als Kohlendioxid – der Referenzstoff für die Berechnung von GWP-Werten. HFKW gehören deshalb zu den im Kyoto-Protokoll aufgelisteten Treibhausgasen.

Der anthropogene Treibhauseffekt ist heutzutage die große Herausforderung für unsere Gesellschaft. Kälteanlagen tragen zweifach zum Treibhauseffekt bei:

- direkte Emissionen von starken Treibhausgasen wie FCKW, H-FCKW und HFKW und
- indirekte Emissionen auf Grund des Energieverbrauchs.

Die insgesamt von den Kälteanlagen des Lebensmitteleinzelhandels (LEH) in Deutschland pro Jahr emittierten Treibhausgase

Autor



Prof. Dr.-Ing. Michael Kauffeld,
Hochschule Karlsruhe –
Technik und Wirtschaft
Institut für Kälte-, Klima-
und Umwelttechnik

aus Energieverbrauch und Kältemittelmis- sionen betragen ungefähr 7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent. Berücksichtigt man darüber hinaus die Emissionen aus dem sonstigen Stromverbrauch im LEH für Beleuchtung, elektrische Geräte etc., ist der Lebensmitteleinzelhandel für ca. 1% der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die Emissionen für Heizung und Warmwassererzeugung sind dabei unberücksichtigt.

Der Beitrag von (Supermarkt-)Kälteanlagen zum Treibhauseffekt kann reduziert werden, indem

- die direkten Emissionen von Treibhausgasen reduziert werden, z. B. durch
 - verbesserte Dichtigkeit von Kälteanlagen
 - reduzierte Kältemittelfüllmengen
 - den Einsatz von Kältemitteln ohne oder mit sehr niedrigem GWP
- der Energieverbrauch reduziert wird
- regenerative Energien eingesetzt werden.

Darüber hinaus kann durch eine sinnvolle Abwärmenutzung der CO₂-Ausstoß für Heizung und Warmwassererzeugung minimiert oder eliminiert werden.

Im Folgenden werden verschiedene Wege beschrieben, um die verschiedenen Alternativen zu realisieren.

Verringerung der direkten Treibhausgasemissionen

Verbesserte Dichtigkeit

Typische deutsche Supermarktkälteanlagen haben jährliche Kältemittelverlusten von ca. 5 bis 10% der gesamten Füllmenge bei einem großen Verbrauchermarkt sind das bis zu 100 kg Kältemittel im Jahr. Über 80% der Leckagen stammen von mechanischen Verbindungen [1]. Eine Maßnahme zur Reduzierung von Kältemittelleckagen ist deshalb der Einsatz von Löt- und Schweißverbindungen anstelle von mechanischen Verbindungsstellen. Ein weiterer nennenswerter Anteil an Kältemittelleckagen stammt von Leitungsbrüchen auf Grund von Vibrationen. Die schwingungstechnische Entkopplung von Verdichtern vom Rohrleitungssystem und die Vermeidung von Schwingungen im Rohrleitungssystem sind deshalb sehr wichtig.

Große Kältemittelleckagen beginnen oft als kleine Lecks, die im Laufe der Zeit größer werden. Regelmäßige Wartung mit adäquater Lecksuche und Überprüfung der einen Kältemittelverlust ankündigenden Betriebsparameter ist ein wichtiger Schritt zu dichten Anlagen. Die EU F-Gase Verordnung Nr. 842/2006 ist ein wichtiger Schritt, um EU-weit ein hohes Serviceniveau und damit

niedrige Kältemittelleckagen zu sichern. Je nach Kältemittelfüllmenge müssen die Kälteanlagen mit HFKW einmal (Anlagen mit bis 3 kg Füllmenge bzw. bis 6 kg für hermetisch dichte Anlagen) bis viermal im Jahr (Anlagen über 300 kg Füllmenge) überprüft werden. Für große Kälteanlagen müssen außerdem entsprechende Leckageerkennungsgeräte installiert werden. Die nächsten Jahre werden zeigen, in wie weit durch diese gesetzliche Maßnahme die Kältemittelleckagen reduziert werden können.

Ein anderer Ansatz wurde von der dänischen und norwegischen Regierung gewählt: Sie erheben Treibhausgassteuern auf alle Kältemittel. Für R404A beträgt der aktuelle Treibhausgassteuersatz in Dänemark 50 EURO/kg und in Norwegen sogar 80 EURO/kg. Jeder Kälteanlagenbetreiber hat also ein finanzielles Interesse an der Dichtheit seiner Kälteanlagen – insbesondere wenn es sich um große Verbundanlagen mit mehreren hundert Kilogramm Kältemittelfüllmenge handelt.

Reduzierte Kältemittelfüllmengen

In vielen Kälteanlagen befindet sich ein Großteil des Kältemittels in den Wärmeaustauschern, insbesondere im Verflüssiger [2]. Für die meisten Verbundkälteanlagen werden Luft-Kältemittel-Wärmeaustauscher mit runden Kupferrohren und Aluminiumlamellen eingesetzt. Die Rohrdurchmesser betragen häufig ca. 15 mm. Die Kältemittelfüllmenge eines Wärmeaustauschers kann durch den Einsatz von Minichannel-Profilen mit hydraulischen Querschnitten von 1 bis 2 mm um bis zu 88% reduziert werden – bei gleichzeitiger Verbesserung des Wirkungsgrades [3]. So ist der innere Wärmeübergang bis zu viermal höher als für ein glattes rundes Rohr mit einem Innendurchmesser von 12 mm [4].

Die Motivation zur Füllmengenreduzierung von Anlagen mit HFKW-Kältemitteln liegt vor allem im wirtschaftlichen Bereich begründet, da die Kosten für Anschaffung bzw. Entsorgung der Kältemittel bei reduzierter Füllmenge gesenkt werden können. Durch die verringerten Füllmengen ergeben sich außerdem geringere Kältemittel-Leckageemissionen und damit geringere Beiträge zum Treibhauseffekt, da sich bei Kälteanlagen mit reduzierter Füllmenge Kältemittelleckagen eher bemerkbar machen als bei solchen mit großer Füllmenge. Außerdem ist im Falle eines Rohrleitungsbruchs und bei der Außerdienststellung die Kältemittelmis- sion kleiner.

Die minimale Füllmenge für eine Labor-R717-Kälteanlage wird mit 18 g/kW angegeben [5]. Einleitende Untersuchungen mit dem Kältemittel R290 in Verbindung

mit Minichannelverflüssigern und -verdampfern ergaben für eine Kälteanlage mit 1 kW Kälteleistung 120 g Kältemittelfüllmenge [6]. Für eine optimierte Kälteanlage werden Kältemittelfüllmengen von 50 g R290 pro kW für Anlagen kleiner Leistung in Aussicht gestellt [6].

Für PKW-Klimaanlagen sind derartige Minichannel-Wärmeaustauscher inzwischen Standard und sie setzen sich ebenfalls für stationäre Klimaanlagen im Einfamilienhausbereich in den USA durch. Aber auch für Wasserkühlsätze werden sie inzwischen eingesetzt [7]. Es ist vermutlich nur noch eine Frage der Zeit bis zum ersten Einsatz in Supermarktkälteanlagen.

Eine andere Möglichkeit der Kältemittelfüllmengenreduzierung stellt der Einsatz von indirekten Kälteanlagen dar. Derartige Supermarktkälteanlagen sind insbesondere in Ländern mit Kältemittelfüllmengenbegrenzungen wie Schweden und Dänemark populär, da mit ihnen die Kältemittelfüllmengen um bis zu 80 bis 90% reduziert werden können. Sie werden jedoch auch in der Schweiz, Luxemburg und in Nordamerika in größerer Stückzahl eingesetzt, da sie im Vergleich zu Direktverdampfungsanlagen u.a. die folgenden Vorteile bieten:

- fabrikgebaute primäre Kälteanlagen mit hohem Qualitätsstandard und niedrigerem Leckagepotenzial,
- geringere Ölmengen in den Kälteanlagen mit deutlich kleinerem kältemittelseitigem Volumen,
- Möglichkeit des Einsatzes von brennbaren (Propan) oder giftigen Kältemitteln (Ammoniak), da das Kältemittel auf den Einsatz in einem Maschinenraum beschränkt bleibt. Je nach Rechtssituation am Aufstellort ist auch der Einsatz eines luftgekühlten Verflüssigers mit brennbarem bzw. giftigem Kältemittel auf dem Dach möglich, oder die gesamte primäre Kälteanlage wird im Außenbereich aufgestellt,
- sofern, wie in Dänemark und Schweden üblich, die Verflüssigerwärme über einen separaten Wasser-Glykol-Kreislauf an die Umgebungsluft abgegeben wird, lässt sich eine Wärmerückgewinnung besonders einfach realisieren,
- konstantere Lufttemperaturen und Luftfeuchte in den Verkaufsmöbeln auf Grund geringerer Temperaturschwankungen des Sekundärfluids und höherer Oberflächentemperatur des Luftkühlers im Möbel. Höhere Luftfeuchte resultiert bei unverpackten Waren in geringerem Gewichtsverlust,
- weniger Abtauzyklen und damit geringeren Energieverbrauch für die Abtaugung,

- längere Verdichterlaufzeiten bzw. geringeres Takten der Verdichter, da der Kälte-träger eine gewisse Speicherfunktion übernimmt,
- Einsatzmöglichkeit für Kunststoffrohre und -fittings, welche preiswerter sein können als die üblicherweise bei Direktverdampfungsanlagen eingesetzten Kupferrohre und -fittings.

Üblicherweise wird Propylenglykol als Kälte-träger mit Vorlauftemperaturen von ca. $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Normalkühlung (NK) eingesetzt. Bei tieferen Temperaturen wird Propylenglykol zu zähflüssig und es werden deshalb Kaliumformiat- und Kaliumacetat-Lösungen eingesetzt. Im Bereich der Normalkühlung lassen sich mit Kälte-trägeranlagen durchaus Energieverbräuche in der gleichen Größenordnung oder niedriger als mit R404A-Direktverdampfungsanlagen erzielen, wohingegen Kälte-trägeranlagen für die Tiefkühlung (TK) je nach verwendetem Kälte-träger auch mehr Energie verbrauchen können. In einem kanadischen Supermarkt mit sowohl NK als auch TK über Kälte-trägerkreise mit Propylenglykol bzw. Kaliumformiat wurden über ein Jahr gemessen ca. 8 % weniger Energie verbraucht als in einem vergleichbaren Supermarkt mit einer R404A Direktverdampfungsanlage [8]. Gleichzeitig konnte die Kältemittelfüllmenge um über 60 % gesenkt werden [8].

Bei der Verwendung von kompakten flüssigkeitsbeaufschlagten Plattenwärmeaustauschern lassen sich z. B. bei Ammoniak-Kälteanlagen Kältemittelfüllmengen von weniger als 28 g/kW Kälteleistung erzielen [9]. Insbesondere in den USA gewinnt eine als „Distributed Systems“ (verteilte Systeme) bezeichnete Variante an Bedeutung (Abb. 1). Im Jahr 2006 sollen bereits 15 % al-

ler neuen Supermärkte mit verteilten Systemen ausgerüstet gewesen sein [10]. Eine Anzahl schallgekapselter Verdichterverbünde mit integriertem wassergekühltem Verflüssiger werden im Verkaufsraum in unmittelbarer Nähe zu den Kühl- und Gefriermöbeln aufgestellt. Insbesondere die Saugleitungsverluste lassen sich durch diese Systeme stark minimieren. Messungen an amerikanischen Supermärkten zeigen einen 5 bis 8 % niedrigeren Energieverbrauch [11] sowie eine 30 bis 50 % geringere Kältemittelfüllmenge [12] verglichen mit Standard-R404A-Verbundanlagen. Auch in Österreich und der Schweiz gibt es einzelne ähnliche Anlagen. Hier ist jedoch nur der TK-Teil als verteilte Systeme ausgeführt. Die Wärmeabgabe der TK-Verflüssiger erfolgt an den Kälte-trägerkreislauf der Normalkühlung.

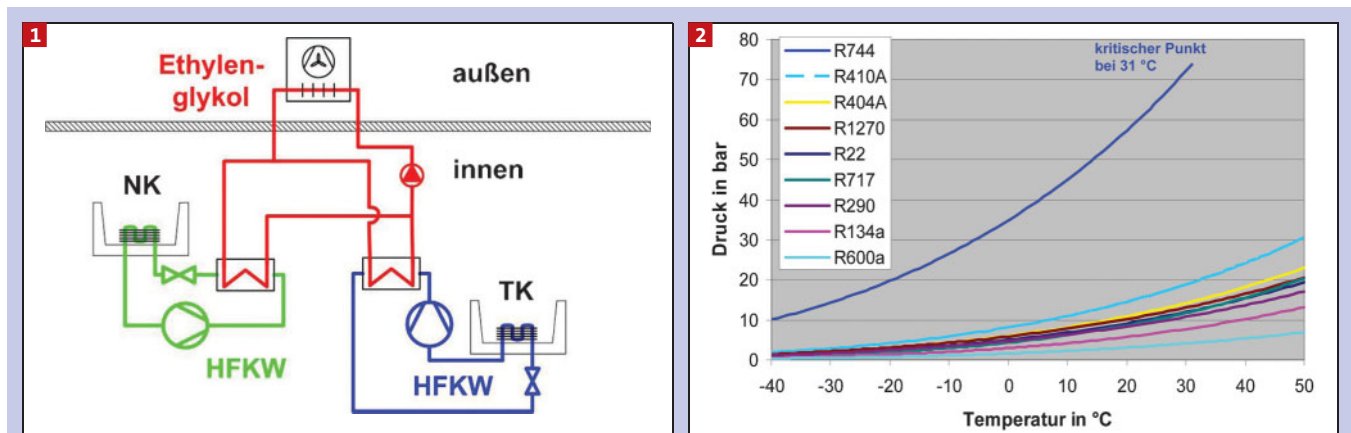
Einige Länder versuchen mit entsprechender Gesetzgebung die Kältemittelfüllmengen pro Anlage zu reduzieren. Seit 1. Januar 2007 sind in Dänemark HFKW nur noch bis zu einer Füllmenge von 10 kg zulässig. Schweden hat sogar eine längere Tradition für Füllmengenbeschränkungen, wenn auch mit höheren Grenzen. Als Folge sind in Schweden sehr viele Supermarktkälteanlagen indirekt ausgeführt. In Dänemark werden viele Anlagen mit CO_2 eingesetzt – siehe unten.

Kältemittel ohne oder mit sehr niedrigem Treibhauspotenzial

Eine andere Möglichkeit den direkten Beitrag einer Supermarktkälteanlage zum Treibhauseffekt zu senken, ist die Verwendung von Kältemitteln mit vernachlässigbarem Treibhauspotenzial (GWP). Aber ein niedriges GWP ist nicht die einzige Anforderung an ein Kältemittel. Wichtige ökologische

und technische Anforderungen an Kältemittel für Supermarktkälteanlagen sind u. a.:

- kein Ozonabbaupotenzial
- niedriges Treibhauspotenzial
- hohe energetische Effizienz – dazu zählen:
 - guter Wärmeübergang
 - hohe Wärmeleitfähigkeit
 - niedrige Viskosität
 - niedriges Druckverhältnis – Verhältnis aus Verflüssigungs- und Verdampfungsdruck
 - niedrige Druckabfälle in Rohrleitungen
 - hohe Wirkungsgrade bei der Verdichtung
- chemisch stabil, um in der Kälteanlage bei hohen Verdichtungsendrücken 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 Verdichtersaugzustand bezogene Verdampfungswärme
- Verdampfungsdruck oberhalb von 1 bar absolut, um Lufteintritt an Leckstellen zu verhindern
- Gefrierpunkt unterhalb der Verdampfungsstemperatur
- Verflüssigungsdruck unter 25 bar bzw. 32 bar
- gute Löslichkeit/Mischbarkeit mit Schmierstoffen
- einfach zu detektieren für Lecksuche.



1 „Distributed System“ – verteilte Systeme: kompakte Verdichter (-verbünde) sind zusammen mit wassergekühlten Verflüssigern in schallisolierten Gehäusen im Verkaufsraum in unmittelbarer Nähe zu den Kühlmöbeln platziert. Die Verflüssigerwärme wird über einen Ethylenglykol-Wasser-Kreislauf an die Umgebung abgegeben bzw. zur Raumheizung verwendet.

2 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.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Kältemittel für Supermarktkälteanlagen. 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 aufgeführt.

	Normal-siede-punkt in °C	kritische Temp. in °C	Druck in bar bei Siedetemperatur von			brenn-bar	giftig	ODP	GWP ¹⁾		vol. Verdampfungswärme bei 0 °C kJ/m ³
			- 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	n. a.	~ 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	n. a.	~ 20	4.670
R717 Ammoniak	- 33,3	132,3	1,2	4,3	15,5	(ja)	ja	0	n. a.	< 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 CO₂ bei einem Zeithorizont von 100 Jahren

²⁾ Temperaturleit von 6 bis 7 K

³⁾ Tripelpunkt von CO₂ bei 5,18 bar und - 56 °C, d. h. bei 1 bar Supplimation von fest zu flüssig bei - 78,4 °C

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 1 zeigt eine Übersicht der zurzeit in neuen Supermarktkälteanlagen eingesetzten Kältemittel mit einigen ihrer Eigenschaften.

Betrachtet man die Dampfdruckkurven, (Abb. 2) weicht diejenige von CO₂ deutlich von denen der anderen Kältemittel ab. Zum Einen ist der Sättigungsdruck mit CO₂ bei gegebener Temperatur deutlich hö-

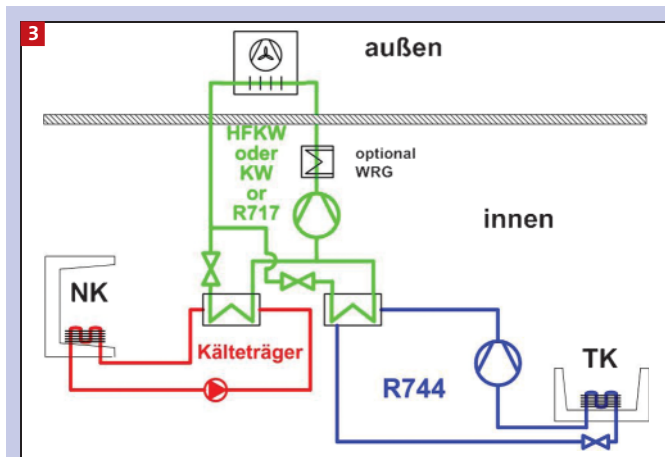
her als bei den anderen dargestellten Kältemitteln, zum Anderen liegt der kritische Punkt, d.h. die Temperatur bzw. der Druck, unterhalb derer sich das Kältemittel verflüssigen lässt, im Fall von CO₂ bei 31 °C, also deutlich unter den zumindest im Sommer üblichen Verflüssigungstemperaturen.

Eine Möglichkeit, mit Kohlendioxid immer deutlich unterhalb von dessen kritischer Temperatur zu arbeiten, ist seine Verwendung in der Tieftemperaturstufe einer Kaskadenkälteanlage, Abb. 3. Üblicherweise wird der maximale Druck des CO₂-Systems auf 40 bar (entsprechend + 5 °C Sättigungstem-

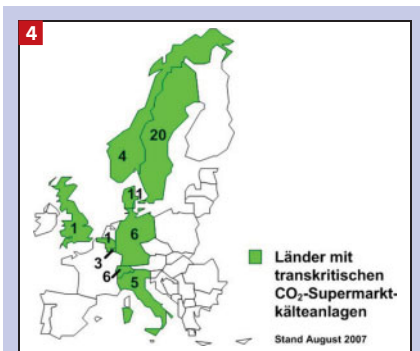
peratur) begrenzt.² Die Verflüssigungstemperatur des CO₂ liegt im Betrieb bei ca. - 5 °C. In den vergangenen Jahren sind alle notwendigen Komponenten – von Expansionsventilen über Magnetventile, Filter/Trockner, Wärmeaustauscher und Verdichter – für diesen Anwendungsfall zur Marktreife entwickelt worden. Derartige CO₂-TK-Anlagen in Kaskade zu einer anderen Kälteanlage sind inzwischen Stand der Technik [13]. Häufig wird die Normkühlung derartiger Anlagen mit R404A oder teilweise auch mit R134a als Direktverdampfungsanlage ausgeführt. In Ländern mit entsprechender Gesetzgebung, z. B. Dänemark, wird die Normkühlung entweder mit einem traditionellen flüssigen Kälte-träger, z. B. Propylen-glykol, ausgeführt, oder es wird CO₂ als verdampfender Kälte-träger eingesetzt.

Die Vorteile der R744-Kaskade sind deutlich reduzierte Rohrleitungsdurchmesser, geringere Einflüsse von Saugleitungsdruckverlusten sowie kleinere Verdichterturbolumina.

² Sollte bei einem Stillstand der Anlage die Temperatur an der kältesten Stelle des CO₂-Kreislaufs über + 5 °C ansteigen, wird in der Regel CO₂ abgelassen, wobei das abgelassene CO₂ den in der Anlage verbleibenden Rest „kühlt“. Es gibt auch einzelne Anlagen mit einer kleinen Kältemaschine, die bei Stillstand der Verbundanlage einen CO₂-Behälter unterhalb + 5 °C gekühlt hält.



3 TK-R744-Kälteanlage als Kaskade zu einer Kälte-träger NK-Anlage. Es werden auch Anlagen mit Direktverdampfung von R404A oder R134a im NK-Bereich mit einer R744-Kaskade kombiniert.



4 In den einzelnen europäischen Ländern installierte transkritische CO₂-Supermarkt-Verbundkälteanlagen – Stand August 2007.

Für größere Supermärkte sind derartige Kaskadenanlagen wegen der kleineren Rohrleitungsquerschnitte bereits heute kostengünstiger in der Installation als traditionelle HFKW-Anlagen.

Aber auch Verbundanlagen mit einer Verflüssigung des CO₂ an Außenluft erfreuen sich in Europa steigender Beliebtheit. Abb. 4 zeigt die Anzahl derartiger Supermärkte für die einzelnen europäischen Länder Ende August 2007 (insgesamt 57 Anlagen). Bei warmen Außenlufttemperaturen, normalerweise über 26 °C, kann das CO₂ nicht mehr verflüssigt werden, da sich die Kältemitteltemperatur auf der Hochdruckseite oberhalb der kritischen Temperatur befindet. Man spricht deshalb auch von einer transkritischen CO₂-Anlage.

Die typische Verbundanlage mit CO₂-Direktverdampfung sowohl im NK- als auch im TK-Bereich wird heutzutage zweistufig, wie in Abb. 5 dargestellt, ausgeführt. Der Druck in den im Markt befindlichen Anlagenteilen wird normalerweise wie oben beschrieben auf maximal 40 bar begrenzt. Der Hochdruck von bis zu 120 bar im Sommer

beschränkt sich auf die Verdichter und Rohrleitungen im Maschinenraum sowie den CO₂-Kühler/Verflüssiger im Außenbereich. Für niedrige Außenlufttemperaturen unterhalb ca. + 12 °C ist der Energieverbrauch niedriger als für eine vergleichbare R404A-Anlage. Zwischen 12 und 26 °C ist der Energieverbrauch mit dem einer R404A-Anlage vergleichbar und bei höheren Außenlufttemperaturen, d. h. im transkritischen Betrieb ohne CO₂-Verflüssigung, ist der Energieverbrauch der CO₂-Anlage etwas höher [13].

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. Brennbares (Kohlenwasserstoffe) und giftige (Ammoniak) Kältemittel können als primäres Kältemittel in indirekten Kälteanlagen mit CO₂-Kaskade (Abb. 3) ausgeführt und so vom Kundenbereich ferngehalten werden. Aber Kohlenwasserstoffe können auch im Verkaufsraum bei Beachtung der nötigen Sicherheitsanforderungen Verwendung finden. Üblicherweise müssen die elektrischen Geräte die IEC 0335-2-89 Richtlinie erfüllen, wonach maximal 150 g brennbares Kältemittel zulässig sind. Berücksichtigt man das interne Anlagenvolumen und das Druck-Liter-Produkt des Verdichters, können steckerfertige Geräte mit Propan (R290) mit Kälteleistungen von bis zu 1 kW gefertigt werden, die diesen Anforderungen entsprechen. Derartige Geräte haben einen ca. 10 bis 15 % niedrigeren Energieverbrauch als vergleichbare R404A-Geräte [14]. Neuere Entwicklungen arbeiten

mit drehzahlregelbaren Verdichtern, die nochmals 10 bis 15 % Energie sparen. Die Wärme von steckerfertigen Geräten wird ganzjährig an den Verkaufsraum abgegeben. Während der Heizperiode ist dies von Vorteil, es erfolgt quasi eine Wärmerückgewinnung. Im Sommer könnten zusätzlich in steckerfertigen Geräten eingebaute wassergekühlte Verflüssiger und ein entsprechendes Kühlwassernetz im Markt oder ein eventuell vorhandener Kälte-trägerkreislauf der Normalkühlung die Wärme relativ einfach, ohne den „Umweg“ über eine Klimaanlage, an die Umgebung abgeben. Erste derartige steckerfertige Geräte waren auf der EUROSHOP 2008 Ende Februar in Düsseldorf zu sehen.

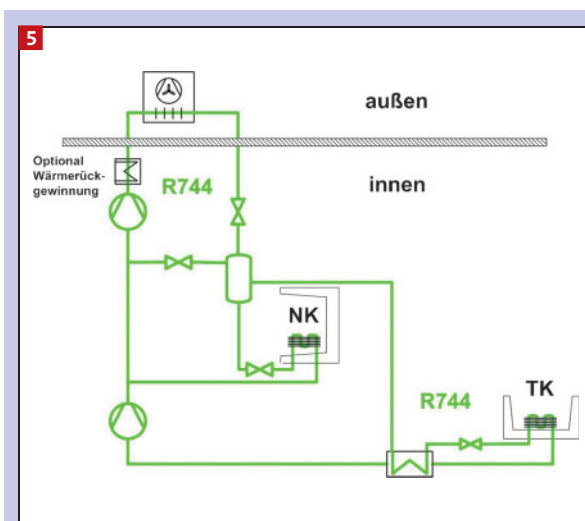
Reduzierung der indirekten Treibhausgasemissionen

Senkung des Energieverbrauchs

Zwischen 40 und 60 % der elektrischen Energie eines Supermarktes ist für Kälteanlagen erforderlich. Durch die CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung trägt eine deutsche Supermarktverbundkälteanlage zwischen zwei- und viermal so viel zum anthropogenen Treibhauseffekt bei, wie durch ihre direkten Kältemittelmmissionen [15].³ Die Energieeffizienz einer Supermarktkälteanlage ist also in vielen Fällen wichtiger als die Wahl des Kältemittels.

Unabhängig von der Wahl des Kältemittels oder der Anlagenschaltung, die auch einen Einfluss auf den Energieverbrauch einer Kälteanlage haben kann (siehe oben) können unter anderem die folgenden Maßnahmen helfen, den Energieverbrauch einer Supermarktkälteanlage zu reduzieren. Sie sind in der Regel bereits bei der Planung bzw. dem Bau der Anlage zu berücksichtigen:

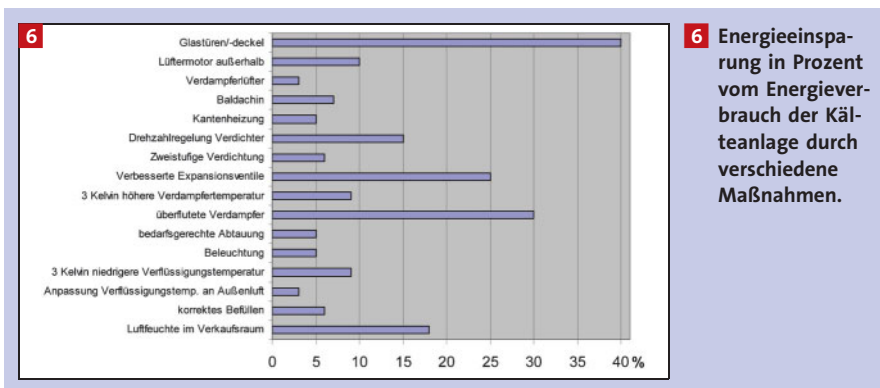
- Glasdeckel/Glastüren anstelle offener Kühltruhen bzw. -regale; die Glasdeckel reduzieren wirksam den Luftaustausch mit dem Verkaufsraum und minimieren so die Wärmelast und Bereifung des Verdampfers. Glasdeckel/-türen können auch Infrarotstrahlung z. B. von der Raumbeleuchtung wirksam abschirmen.
- Verbesserte Isolierung durch größere Wandstärke oder höheren Wärmedämmwert der Isolierung.
- Anbringung des Lüftermotors außerhalb des Gerätes um die Motorwärme nicht als Kühllast abführen zu müssen.



5 Zentrale Verbundkälteanlage mit Kohlendioxid als Kältemittel. Der TK-Teil ist als untere Stufe einer zweistufigen Kälteanlage realisiert. Diese Anlagenschaltung scheint sich gegenüber der Kaskadenlösung einer reinen R744-TK-Anlage zu einer ebenfalls mit R744 arbeitenden reinen NK-Anlage durchzusetzen, da sie auf Grund eines fehlenden inneren Kaskaden-Wärmeaustauschers bessere Kälteleistungszahlen verspricht.

³ Dabei wird von den in Deutschland üblichen niedrigen Leckageraten von ca. 10 % ausgegangen. In anderen Ländern mit höheren Leckageraten kann der direkte Anteil über Kältemittelmmissionen auch genauso hoch sein wie der Anteil aus dem Energieverbrauch.

- Verbesserter Verdampfer-Lüfter und/oder -Lüftermotor durch strömungsgünstigere Ventilatorflügel oder Elektromotor mit höherem Wirkungsgrad (analog für den Verflüssiger).
 - Verbesserte Luftströmung in offenen Kühlregalen, um Luftaustausch mit dem Verkaufsraum zu minimieren.
 - Infrarot reflektierende Schirme oder Baldachine, um Infrarotstrahlung der Beleuchtung und/oder der Sonne abzuschirmen; insbesondere bei in Klarsichtfolie verpackten Lebensmitteln kommt es zu einem „Treibhauseffekt“ innerhalb der Folie – Infrarotstrahlung der Beleuchtung dringt ein, die langwelligere Strahlung des Kühlguts kommt aber nicht wieder aus der Verpackung heraus.
 - Bedarfsgeregelte Kanten- sowie evtl. Scheibenheizung durch Taupunktregelung, um immer die niedrigste mögliche Temperatur einstellen zu können. Kantenheizung braucht doppelt Energie: zum Einen die für das Erwärmen nötige Energie; zum Anderen tritt ein Teil der Wärme als Kühllast am Verdampfer auf.
 - Heißgasabtauung anstelle von elektrischen Heizstäben.
 - Drehzahlregelung von Verdichter, Pumpe, Ventilator anstelle von einfacher Ein-/Ausregelung.
 - Verbesserte Expansionsventile, z. B. elektronische Expansionsventile, die die Überhitzung adaptiv regeln.
 - Expansionsmaschinen, die bei der Entspannung Arbeit gewinnen und diese an den Verdichter abgeben. Durch die im adiabaten und reibungsfreien Grenzfall isentrope Zustandsänderung würde zudem die spezifische Kälteleistung steigen.
 - Verbesserte Verdampfer: z. B. verbesserter Wärmeübergang auf der Luft- und/oder Kältemittelseite durch Einsatz neuartiger Wärmeaustauscher, siehe oben. Jedes Kelvin höhere Verdampferemperatur reduziert den Energieverbrauch um ca. 3 %.
 - Überflutete Verdampfer; 20 bis 30 % der Verdampferoberfläche in einem typischen Verkaufskühlmöbel dienen nur der Überhitzung – mit entsprechend schlechtem Wirkungsgrad.
 - Bedarfsgesteuerte Abtauung der Verdampfer anstelle einer zeitgesteuerten Abtauung; Indikatoren können z. B. die Stromaufnahme der Lüftermotoren sein.
 - Verbesserte Beleuchtung, z. B. LED anstelle von Leuchtstoffröhren; neben dem Energieverbrauch sinkt gleichzeitig die Umweltbelastung, da LEDs im Gegensatz zu Leuchtstoffröhren quecksilberfrei sind; denkbar ist auch eine bedarfsgeregelte Abschaltung einzelner Kühlmöbelbeleuchtungen oder der Einsatz von natürlichem Licht z. B. durch nach Norden ausgerichteten Fensterflächen.
 - Absenkung der Verflüssigertemperatur – jedes K niedrigere Verflüssigungstemperatur reduziert den Energieverbrauch um 3 %; die Verflüssigungstemperatur lässt sich z. B. durch folgende Maßnahmen senken:
 - Anpassung der Verflüssigungs- an die Außenlufttemperatur anstelle von ganzjährig künstlich hoch gehaltener Verflüssigungstemperatur – diese Maßnahme kann elektronische Expansionsventile erforderlich machen, da thermostatische Expansionsventile in der Regel einen engen Differenzdruckbereich haben, in dem sie die geforderten Kälteleistung erbringen.
 - Einsatz verbesserter Wärmeaustauscher, z.B. Minichannel (s. o.).
 - Verdunstungskühlung des Verflüssigers um die niedrige Kühlgrenztemperatur auszunutzen. Hierbei sind Fragen der Wasserqualität und des Wasserverbrauchs zu berücksichtigen.
 - Wärmeabgabe an das Erdreich, welches ganzjährig ca. + 10 °C kalt ist.
 - Freie Kühlung – insbesondere in Mittel- und Nordeuropäischen Ländern liegen die Außenlufttemperaturen an vielen Stunden im Winter unterhalb der Kältemittel bzw. Kälte-trägertemperatur für die Normalkühlung. Wärme könnte also direkt, d. h. ohne die Kälteanlage, an die Umgebung abgegeben werden. Derartige Systeme sind in Norwegen im Einsatz. Für Lagerräume und evtl. für entsprechend modifizierte Kühlmöbel im Wandbereich eines Marktes wäre auch die direkte Nutzung der Außenluft zur Kühlung denkbar. Entsprechende Versuche an einem NK-Regal in China führten zu 80 % Energieeinsparung während der kalten Jahreszeit [16].
 - Wärmerückgewinnung der Heißgaswärme sowie der Verflüssigungswärme. Um nicht künstlich in Heizperioden den Verflüssigungsdruck anheben zu müssen, obwohl bei Außenluftkühlung des Verflüssigers eine deutlich niedrigere Verflüssigungstemperatur möglich wäre, ist evtl. der Einbau einer Wärmepumpe sinnvoll, wie in einigen kanadischen Supermärkten realisiert [8]. Wichtig ist bei der Wärmenutzung eine ganzheitliche Betrachtung aller Gewerke eines Marktes und evtl. auch die Einbeziehung von Nebengebäuden, da gut isolierte und hinsichtlich des Luftaustausches optimierte Supermärkte z. T. ganzjährig einen Wärmeüberschuss haben.
 - Kältespeicher in dem nachts, wenn die Außenlufttemperatur niedrig ist und damit die Verflüssigungstemperatur niedrig sein kann (s. o.), Kälte gespeichert wird. Der Kältespeicher kann ein separater Kaltwassertank oder Eisspeicher sein; möglich ist jedoch auch die Unterkühlung von Gefriergut. Ein entsprechendes Forschungsvorhaben läuft zur Zeit in den Niederlanden.
- Darüber hinaus gibt es natürlich auch Maßnahmen des Betreibers, die den Energieverbrauch senken können:
- Korrektes Befüllen der Kühl-/Gefriermöbel, um den Luftstrom nicht zu behindern oder im schlimmsten Fall in den Verkaufsraum abzuleiten.
 - Luftfeuchtigkeit im Verkaufsraum regeln und im Bereich von 40 % relativer Luftfeuchte halten; eine hohe Raumluftfeuchte führt zu verstärkter Bereifung von Verdampfern und damit zu erhöhtem Energiebedarf bei der Kühlung sowie der Abtauung.
 - Regelmäßige Reinigung von Verdampfer und Verflüssiger, um die durch Verschmutzung verursachte Verschlechterung des Wärmeübergangs zu beseitigen.
- Abb. 6 zeigt das Potenzial einiger ausgewählter Energiesparmaßnahmen. Viele Maßnahmen können kombiniert werden und die zu erreichende Energieeinsparung kann dadurch bis zu 50 % und mehr gegenüber heutigen Standardverbundanlagen betragen.
- Die Reduzierung des Energieverbrauchs ist doppelt interessant:
- Zum Einen wird der **energieverbrauchsbedingte Beitrag eines Supermarktes zum Treibhauseffekt reduziert**. Die indirekten Emissionen betragen je nach verwendetem Kältemittel, den auftretenden Kältemittelleckagen und der Art der Kälteanlage zwischen 50 % vom gesamten Treibhauseffekt des Supermarktes bei einer R404A-Verbundanlage mit ca. 300 kg Füllmenge und einer jährlichen Kältemittelleckagerate von 10 % und fast 100 % bei steckerfertigen R290 TK-Truhen oder R744-Verbundanlagen.
 - Zum Anderen resultieren die niedrigeren Betriebskosten unmittelbar in **einem gesteigerten Gewinn**. Die Energiekosten liegen häufig in der gleichen Größenordnung wie der mit einem Markt erzielte Gewinn (1 bis 2 % des Umsatzes), die Kälteanlage steht für 40 bis 60 % des elektrischen Energieverbrauchs – eine Halbierung des Energieverbrauchs der Kälteanlage käme also einer Reduzierung des Verbrauchs an elektrischer Energie um ca. 25 % gleich.



Regenerative Energien

Supermärkte haben relativ große horizontale Dachflächen. Es ist deshalb recht einfach, dort große Photovoltaikanlagen zu installieren. Die großen Dachflächen eignen sich jedoch auch zur Beleuchtung des Marktes durch nach Norden ausgerichtete Fensterflächen oder das Einfangen und Bündeln von Sonnenlicht über Parabolspiegel sowie Einleitung in den Markt durch Glasfaserlichtleiter [17]. Die nach Süden orientierten Gebäudewände eignen sich darüber hinaus hervorragend zur solaren Luftvorwärmung der Zuluft des Marktes [18]. In einzelnen Fällen werden auch in unmittelbarer Nähe des Marktes Windkraftanlagen aufgestellt oder die Heizung des Marktes erfolgt über Geothermie. Diese lässt sich dann gleichzeitig für die Abfuhr der Wärme der Kälteanlage im Sommer nutzen. So wird der Geothermiespeicher im Sommer geladen und im Winter entladen. Es gibt inzwischen eine ganze Reihe derartiger Märkte in Deutschland [19]. Eine weitere Möglichkeit der Nutzung regenerativer Energien besteht natürlich im Bezug von elektrischer Energie, die ausschließlich aus erneuerbaren Energien gewonnen wird [20].

Diskussion

Es ist möglich, Supermarktkälteanlagen mit stark reduziertem Beitrag zum Treibhauseffekt zu bauen und zu betreiben. Dafür stehen unterschiedliche Optionen zur Auswahl. Welche Optionen gewählt werden, hängt von der Einstellung des einzelnen Betreibers, der Verfügbarkeit bestimmter Komponenten und/oder dem Können des jeweiligen Anlagenbauers und/oder Planers sowie der Bereitschaft ab, eventuell höhere Investitionskosten zu tragen. Häufig werden die höheren Investitionskosten durch niedrigere Betriebskosten in einer überschaubaren Zeit ausgeglichen. Durch geschickte Kombination verschiedener Optionen und eine Einbeziehung des gesamten Energiehaushaltes eines Supermarktes ist es möglich, den Treibhausbeitrag eines gesamt-

samten Marktes wesentlich zu reduzieren. Dazu sollten alle Heizaufgaben mit den Kühlaufgaben sinnvoll kombiniert werden.

Schlussfolgerung

- Zur Vermeidung direkter Emissionen können HFKW zu akzeptablen Kosten ersetzt bzw. ihre Füllmenge deutlich reduziert werden.
- Die Energieeffizienz derartiger Systeme ist dem derzeitigen R404A-Verbundanlagenstandard mindestens gleichwertig, sodass die indirekten Emissionen durch ihren Einsatz unverändert bleiben oder sogar gesenkt werden.
- Indirekte Emissionen von Supermarktkälteanlagen können zu moderaten Kosten um über 50 % gesenkt werden (Ausschöpfung des Energiesparpotenzials).
- In Ländern mit entsprechender Gesetzgebung, z. B. Dänemark, Norwegen oder Schweden, werden viele HFKW-freie bzw. HFKW-füllmengenreduzierte Supermarktkälteanlagen mit guter Energieeffizienz gebaut.
- Einige Supermarktketten haben die Vorteile von Umweltschutz und Ressourcenschonung als Strategie zur Gewinnmaximierung erkannt und bauen entsprechende Supermärkte mit niedrigen Kohlendioxidemissionen. Dies kann und wird z. T. auch für Werbezwecke eingesetzt.

Danksagung

Die hier dargestellten Trends und Perspektiven sind Ergebnisse eines vom Umweltbundesamt unter dem Aktenzeichen FKZ 206 44 300 geförderten Projekts. Der Autor ist für die gewährte Unterstützung dankbar. Der ausführliche Abschlussbericht ist ab Mitte 2008 unter www.umweltbundesamt.de abrufbar.

Literatur

- [1] Forschungsrat Kältetechnik e.V.: Verbesserung der Dichtheit kältetechnischer Erzeugnisse. Studie des FKT, Januar 2003
- [2] Stalter, M.; Schweitzer, M.: Experimentelle Bestimmung des Kältemittelfüllungsgrades in

luftbeaufschlagten Verflüssigern und Verdampfern. DKV-Tagung, 16. – 18. November 2005, Würzburg

- [3] Hvorfor skifte fra kobber til aluminiumsvarmeveksler. Kulde Skandinavia, 6/2005
- [4] Marvillet, C.: Recent Developments in Heat Exchangers for Automotive Applications. in: Recent Development in Finned Tube Heat Exchangers. Edited by Marvillet, C. et al., 1990, Danish Technological Institute, Denmark, S. 8 – 51
- [5] Litch, A., Hrnjak, P. (1999): Condensation of Ammonia in Microchannel Heat Exchangers University of Illinois, Air Conditioning and Refrigeration Center, ACRC CR-22
- [6] Hoehne, M.; Hrnjak, P.: Charge minimization in hydrocarbon systems. IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids 2004, Glasgow, UK
- [7] Carrier: Microchanneltechnologie. Loude & luchtbehandlung 100, 1 (2007), S. 82 – 86
- [8] Minea, V.: Supermarket refrigeration system with completely secondary loops. ASHRAE Journal 49, 9 (2007), S. 40 – 56
- [9] Behnert, T., König, H.: Entwicklung eines NH₃-Standard-Flüssigkeitskühlsatzes mit minimaler Füllmenge, KK Die Kälte & Klimatechnik, 56. (2003) 6, S. 32 – 37
- [10] Garry, M.: Split Refrigeration. Supermarket News, July 2007, S. 43 – 48
- [11] Walker, D.: Development and demonstration of an advanced supermarket refrigeration/HVAC system. Oak Ridge National Laboratory, ORL-SX363C-FM-97163-1231, March (1999)
- [12] Baxter, V.D.: Advances in Supermarket Refrigeration Systems. IEA Annex 26 Summary. ORNL 2006
- [13] Siemel, T.; Finckh, O.: CO₂-DX Systems for medium- and low-temperature refrigeration in supermarket applications. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Deru, M.; MacDonald, M.: The Wal-Mart Experience, Part 2. ASHRAE Journal 49, 10 (2007), S. 22 – 27
- [18] MacDonald, M.; Deru, M.: The Wal-Mart Experience, Part 1. ASHRAE Journal 49, 9 (2007), S. 14 – 25
- [19] Nüssle, F.: Energie im Doppelpack – Ganzheitliches Energiekonzept zum Heizen und Kühlen im LEH. Vortrag auf der Vortragsveranstaltung Energieeffizienz im Lebensmittel-Einzelhandel. 19.02.2008, Haus der Wirtschaft Baden Württemberg, Stuttgart
- [20] Koch, K.: Aus Kosten werden Gewinne – Von Vermeidungskonzepten zu Erfolgsstrategien vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung, Nachhaltigem Wirtschaften und CSR im LEH. Vortrag auf der Vortragsveranstaltung Energieeffizienz im Lebensmittel-Einzelhandel. 19.02.2008, Haus der Wirtschaft Baden Württemberg, Stuttgart