

# Effizienz von CO<sub>2</sub> in gewerblichen Kälteanwendungen kleiner Leistung

Horst Kruse, Rainer Jakobs und Hans Rüssmann, Hannover

Das Informationszentrum Kältetechnik und Wärmepumpen e.V. (IZW) hat eine Studie durchgeführt, um die Kältemittel CO<sub>2</sub> und R 134a in kleinen Gewerbe-Kältesystemen zu vergleichen. Das Ergebnis zeigt, dass energieoptimierte CO<sub>2</sub>-Systeme etwa den gleichen Energieverbrauch erreichen können wie herkömmliche R 134a-Systeme. Das Ergebnis dieser Studie beruht auf durchgeführten thermodynamischen Berechnungen zweier ausgeführter CO<sub>2</sub>-Systeme im Vergleich zu R 134a-Systemen und wird bestätigt durch umfangreiche Simulationsberechnungen und experimentelle Untersuchungen an kleinen gewerblichen R 134a- und CO<sub>2</sub>-Systemen, die in der Fachliteratur dokumentiert sind.

Eine darüber hinaus durchgeführte Literaturrecherche über den Energieverbrauch von CO<sub>2</sub>-Anlagen im Vergleich zu HFKW-Anlagen in allen verschiedenen Anwendungsbereichen der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik kam zu dem Ergebnis, dass kein Hinweis auf deutlich besseres energetisches Verhalten der CO<sub>2</sub>-Systeme zu finden ist. Ausnahmen sind Sonderfälle, wie z. B. bei der Brauchwassererwärmung durch Wärmepumpen mit großem Temperaturgleit.

Aus diesem Grund kommt die IZW-Studie zu dem Ergebnis, dass die genannten Vorteile optimierter CO<sub>2</sub>-Systeme bei den gewerblichen Kälteanwendungen im Vergleich zu den dort derzeit eingesetzten (low cost) R 134a-Systemen vor allem auf die normalerweise nicht optimierte Energieeffizienz der Low-Cost-Versionen der R 134a-Systeme basieren.

## Zum Thema

Eine Coca-Cola-Fallstudie [1] kommt zu dem Ergebnis: „Feldtests haben gezeigt, dass CO<sub>2</sub>-Systeme zuverlässig und **energieeffizienter** sind als vergleichbare HFKW-Systeme“.

Dies steht offensichtlich im Zusammenhang mit einer Veröffentlichung von Sanyo Ltd. [2] über einen zweistufigen Drehkolbenverdichter für Warmwasserwärmepumpen und Verkaufsautomaten. Der Energieverbrauch von einem Verkaufsautomaten soll nach Tests unter realen Feldbedingungen 17% niedriger sein als von Verkaufsautomaten mit herkömmlichen R 134a-Aggregaten, siehe Bild 1.

Von Danfoss A/S wurde ein niedrigerer Energieverbrauch von Flaschenkühlern um 18% und von Verkaufsautomaten um 37% mit einstufigem Verdichter mit verbes-

- Energy Consumption of CO<sub>2</sub> VM is 17% less than original R134a VM under actual field test. (Same fan, same insulation, same HX sizes)

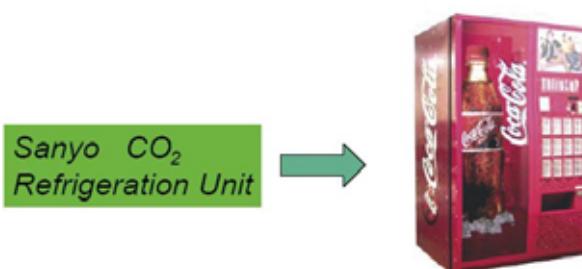


Bild 1 Sanyo CO<sub>2</sub>-Kühlungsaggregat für Coca Cola [2]

## zu den Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Horst Kruse,**  
Forschungszentrum  
für Kältetechnik  
und Wärmepumpen  
GmbH, Hannover



**Dr.-Ing. Rainer Jakobs,**  
Informationszent-  
rum Kältetechnik  
und Wärmepumpen  
e.V., Hannover



**Dipl.-Ing. Hans Rüssmann,**  
Forschungszentrum  
für Kältetechnik  
und Wärmepumpen  
GmbH, Hannover



serter Systemkonfiguration und Wärmeaustauschern im Vergleich zu sogenannten „baseline“ Verkaufsautomaten mit R 134a präsentiert [3], [4].

In Anbetracht der Tatsache, dass die meisten HFKW-Systeme hinsichtlich der Kosten, aber nicht hinsichtlich der Energieeffizienz optimiert sind, kann angenommen werden, dass neu entwickelte CO<sub>2</sub>-Geräte einen höheren Entwicklungsstandard haben als HFKW-Systeme. Deshalb

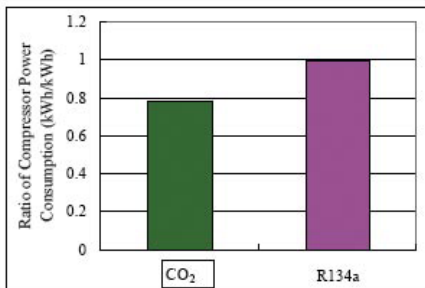


Bild 2 Vergleich des Energieverbrauchs bei Sanyo ohne Beleuchtung und Lüfter



Bild 3 Sanyo-CO<sub>2</sub>-Verdichter

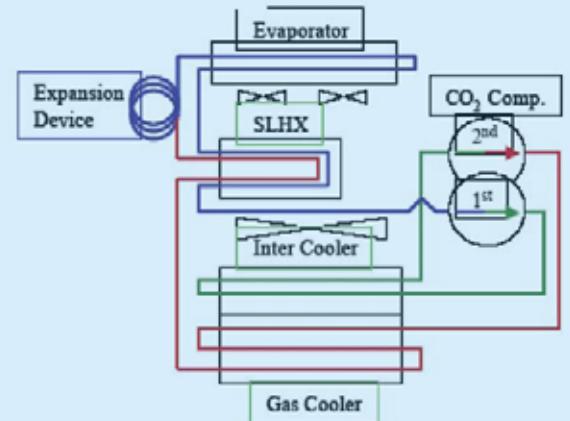


Bild 4 Transkritischer zweistufiger CO<sub>2</sub>-Kreislauf bei Sanyo

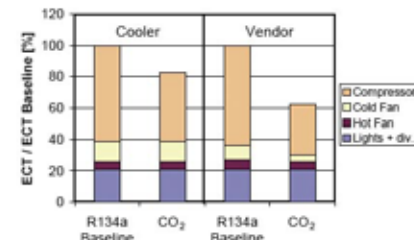


Bild 5 Vergleich des Energieverbrauchs bei Danfoss mit Beleuchtung und Lüfter

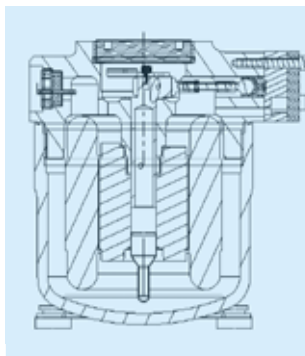


Bild 6 Danfoss-CO<sub>2</sub>-Verdichter

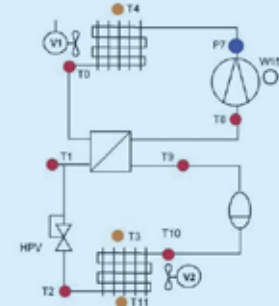


Bild 7 Transkritischer einstufiger CO<sub>2</sub>-Kreislauf bei Danfoss

müssen für einen korrekten Vergleich Informationen für beide Technologien vorliegen.

Informationen über CO<sub>2</sub>-Technologien sind in der Literatur durch Veröffentlichungen von Sanyo und Danfoss ([2], [3], [4]) verfügbar. Informationen über die dem Vergleich zugrunde liegenden HFKW-Standard-Technologien wurden bisher nicht veröffentlicht und wurden auch auf Anfrage hin nicht bekannt gegeben.

### Grundlage der Aussage von Coca Cola

Die Aussage von Coca Cola „...Feldtests haben gezeigt, dass CO<sub>2</sub>-Systeme zuverlässig und energieeffizienter sind als vergleichbare HFKW-Systeme“ basiert hauptsächlich auf Veröffentlichungen von Testergebnissen mit CO<sub>2</sub>-Systemen von Sanyo [2] und Danfoss [3], [4] im Jahr 2004. Diese Resultate bezogen sich auf die so genannten „Standard HFKW-Systeme“ der konventionellen Coca-Cola-Verkaufsautomaten oder Flaschenkühler. Die Veröffentlichungen zeigen die Energieverbrauchs-werte nur im Vergleich zu den Standard-systemen, siehe Bilder 2 und 5.

Im Folgenden zeigen die Bilder aus den Veröffentlichungen jeweils die relativen

Energieverbräuche, die Verdichterkonstruktionen und die Kältemittelkreisläufe.

Wichtig für eine Bewertung der dargestellten energetischen Verbesserungen ist die Kenntnis über die Basiskonfiguration der HFKW-Systeme, die in den Veröffentlichungen nicht angegeben, aber von denen die von Sanyo und Danfoss entwickelten und getesteten CO<sub>2</sub>-Systeme abgeleitet wurden.

### Thermodynamische Überlegungen

Hier gilt es, zwischen den Verlusten durch Anpassung der Prozesse an die Temperaturverläufe der Sekundärfluide (äußeres Verhalten, z. B. bei der Wärmeübertragung) und den Verlusten im Kältemittelkreislauf (inneres Verhalten, z. B. bei der Verdichtung und Drosselung) zu unterscheiden. Bei der Betrachtung des transcriticalen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs ist eine optimierte Anpassung des Kältemittelkreislaufs an die Anwendung von entscheidender Bedeutung. Dieser Kreislauf kombiniert das Verhalten des Carnot- und des Lorenz-Prozesses und ist bestens geeignet für Wärmeaufnahme bei konstanten Temperaturen und Wärmeabgabe bei gleitenden Temperaturen.

Dies trifft aber nicht zu, wenn Wärme von einem kalten Raum aufgenommen

wird, wie im Innenraum eines Flaschenkühlers, und direkt an die umgebende Luft bei konstanten Temperaturen abgegeben wird (isotherme Wärmeaufnahme und -abgabe). Unter diesen Bedingungen zeigt ein theoretischer Vergleich, dass der transcriticalen CO<sub>2</sub>-Kreislauf für Kühlzwecke höhere Wärmeabgabeverluste aufweist als der subcriticalen R134a-Standard-Kreislauf, siehe Bild 8.

Laut den Veröffentlichungen von Sanyo und Danfoss wurden zur Verlustminimierung zusätzliche Maßnahmen (im Vergleich zu dem Standard HFKW-Kreislauf) zur Verbesserung der Energieeffizienz des CO<sub>2</sub>-Systems durchgeführt, wie z. B. bei Sanyo zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung und innerem Wärmeaustauscher, bei Danfoss Microchannel-Wärmeaustauscher (Gaskühler und innerer Wärmeaustauscher) und überfluteter Verdampfer.

Aus diesem Grund wurden in der IZW-Studie Modifikationen des Kreislaufs durch vergleichende thermodynamische Berechnungen des R134a- und CO<sub>2</sub>-Kreislaufes durchgeführt. Die detaillierten Berechnungen wurden mit Hilfe von KM-Kreis- [6] und EES-Programmen [7] an dem Basiskreislauf begonnen und mit dem modifizierten System im Detail fortgesetzt.



**Einfluß von Modifikationen des Kreislaufes auf die Energieeffizienz (Leistungszahl "COP") – CO<sub>2</sub> gegenüber H-FKW 134a**

	R134a gegenüber CO <sub>2</sub>
<p><b>1. Basiskreislauf</b> (Umgebungstemp. 32°C, Innenraum 1°C, isentroper Gütegrad = 1, keine Wärmeaustauscher- und Druckverluste)</p>	<p>Grundlegende thermodynamische Berechnungen zeigen, daß der ideale CO<sub>2</sub>-Prozeß mit und ohne inneren Wärmeaustauscher ein niedrigeres COP von jeweils nur 57% im Vergleich zu R134a aufweist. Dies beruht auf dem thermodynamischen Verhalten des Kältemittels.</p>
<p><b>2. Berücksichtigung der Wärmeaustauscherverluste</b> (Umgebungstemp. 32°C, Temperaturdifferenz zwischen Luft und Kältemittel 15K am Kondensator und Verdampfer, am Gaskühler 8K, am internen Wärmeaustauscher 10K, isentroper Gütegrad = 1)</p>	<p>Die Berechnungen für diese Modifikation des Kreislaufes machen deutlich, daß der CO<sub>2</sub>-Prozeß relativ verbessert wurde, aber immer noch ein geringeres COP (65%) als der R134a-Prozeß aufweist, wobei der interne Wärmeaustauscher nahezu die gleiche Auswirkung auf den Wirkungsgrad des CO<sub>2</sub>- und R134a-Kreislaufes hat.</p>
<p><b>3. Modifikation des CO<sub>2</sub>-Kreislaufes (nicht R134a!) –Danfoss (Microchannel Wärmeaustauscher)</b> für Gaskühler und internen Wärmeaustauscher, überfluteter Verdampfer, Umgebungstemp. 32°C, isentroper Gütegrad = 1)</p>	<p>Geht man davon aus, daß der Gaskühler, der interne Wärmeaustauscher und der Verdampfer des CO<sub>2</sub>-Systems eine höhere Effizienz haben, so machen die Berechnungen deutlich, daß der CO<sub>2</sub>-Prozeß immer noch ein niedrigeres COP (87% von R134a ohne interne Wärmeaustauscher, 83% von R134a mit internen Wärmeaustauschern) aufweist. Diese weiteren relativen Verbesserungen des CO<sub>2</sub>-Kreislaufes gegenüber dem R134a-Kreislauf beruhen dabei auf der Weiterentwicklung der Wärmeaustauscher.</p>
<p><b>3.1 Variation des Verdichtergütegrades - Danfoss</b> (laut Veröffentlichung 0,53 für CO<sub>2</sub>- und R134a-Kreisläufe, alle anderen Parameter ähnlich Modifikation 3.)</p>	<p>Ein Vergleich des CO<sub>2</sub>- und des R134a-Kreislaufes unter Annahme eines gleichen Verdichtergütegrades zeigt in beiden Fällen ein geringeres COP für CO<sub>2</sub> (87% von R134a ohne internen Wärmeaustauscher, 83% mit internem Wärmeaustauscher). Das resultierende COP für den CO<sub>2</sub>-Kreislauf entspricht der Berechnung des optimalen Hochdruckes in der Veröffentlichung von Danfoss und bestätigt damit die Annahmen, die hier hinsichtlich dieser Berechnung gemacht wurden.</p>
<p><b>3.2 Variation des Verdichtergütegrades - Danfoss</b> (0,53 für den CO<sub>2</sub>-Kreislauf, 0,43 für den R134a-Kreislauf, alle anderen Parameter ähnlich Modifikation 3.1)</p>	<p>Unter der Annahme eines niedrigeren Verdichtergütegrades für R134a verkleinert sich der Unterschied zwischen dem COP des R134a-Kreislaufes und dem des CO<sub>2</sub>-Kreislaufes, bei einem gleichzeitig etwa höheren COP für CO<sub>2</sub> (108% von R134a für CO<sub>2</sub> ohne internen Wärmeaustauscher und 102% mit internem Wärmeaustauscher). Zieht man diese Annahmen in Betracht, so können ähnliche COP Werte unter den gegebenen Bedingungen in der Realität erreicht werden. Dr. Süß (Danfoss) führte im März 2005 bei einem Kundenseminar aus, daß mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel, ähnliche Leistungszahlen wie mit herkömmlichen Systemen erreicht werden können [8]. Beim Vergleich zwischen dem optimierten (<math>\lambda = 0,53</math>) CO<sub>2</sub>-Kreislauf mit internem Wärmeaustauscher und dem üblichen R134a-Kreislauf ohne internen Wärmeaustauscher ist der COP für CO<sub>2</sub> bereits 11% größer als der für R134a mit <math>\lambda = 0,43</math>.</p>
<p><b>4. Modifikation des CO<sub>2</sub>-Kreislaufes - Sanyo</b> (zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühler, isentroper Gütegrad 0,63, alle anderen Parameter ähnlich Modifikation 2.)</p>	<p>Diese Kreislaufberechnung resultiert in einem COP von 1,89 für CO<sub>2</sub>. Vergleicht man die Ergebnisse mit dem einstufigen CO<sub>2</sub>-Kreislauf von Danfoss, so zeigt die Berechnung das Potential des zweistufigen CO<sub>2</sub>-Kreislaufes unter Verwendung eines Zwischenkühlers mit seinem angenommenen höheren Wirkungsgrad.</p>

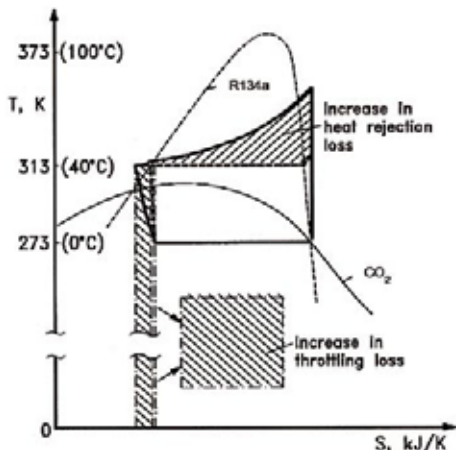


Bild 8 Vergleich zwischen einem unterkritischen R134a-Kreislauf und einem transkritischen CO<sub>2</sub>-Kreislauf im T, s-Diagramm [5]

## Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Die Kreislaufberechnungen mit dem Ziel einer verbesserten Leistungszahl (COP) des CO<sub>2</sub>-Kältemittelkreislaufs zeigen die Bedeutung einer möglichst hohen Verdichtereffizienz neben anderen Maßnahmen wie z. B. einem zweistufigen Kreislauf mit Zwischenkühlung, Microchannel-Wärmeaustauschern mit kleinen Temperaturdifferenzen etc.

Bei Betrachtung des Basiskreislaufs bleibt die Frage offen, welches System tatsächlich in den Standard HFKW-Geräten verwendet wurde. Coca Cola hat speziell hinsichtlich des Verdichtergütegrads und der Betriebsbedingungen keine Informati-

onen veröffentlicht. Da Standardsystemdaten nicht verfügbar sind, gibt es nur die Erklärung, dass der wesentliche Unterschied zwischen der angegebenen CO<sub>2</sub>-Kreislauffizienz und der Effizienz der Standardsysteme auf die Kreislaufhardware der Basissysteme zurückzuführen ist, wobei hinsichtlich des R134a-Verdichtergütegrads die größte Ungewissheit besteht.

Die energetischen Verbesserungen von Sanyo und Danfoss hinsichtlich der Verkaufsautomaten zeigen unterschiedliche Werte von 17% bei Sanyo und 37% bei Danfoss. Dieser große Unterschied kann nicht nur mit dem Standardsystem erklärt werden, es muss vielmehr aus den unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Systemen resultieren. Mit einiger Wahrscheinlichkeit ist dieser große Unterschied auch auf einen stark überdimensionierten Verdichter im Danfoss-System zurückzuführen. Das sehr schnelle Takten trägt zu einer Verbesserung des COP durch Verhinderung des Druckausgleichs bei. Des Weiteren sind bei Danfoss die energetischen Verbesserungen bei den Lüftern und der Beleuchtung im obigen Wert enthalten.

## Schlussfolgerungen bezüglich der Vergleiche in der Literatur

Die Recherche in der weiteren Literatur bestätigt, dass in einzelnen Fällen – nicht aber im Allgemeinen – CO<sub>2</sub>-Systeme die gleiche Energieeffizienz erreichen können wie HFKW-Systeme. In speziellen Anwendungen, z. B. Wärmepumpen für Brauch-

wasserheizungen oder bei unterkritischen Bedingungen können CO<sub>2</sub>-Systeme sogar bessere COP erreichen.

Spezielle Aufmerksamkeit muss darauf verwendet werden, dass gleiche Bedingungen vorhanden sind, wenn unterschiedliche Systeme hinsichtlich ihrer Leistungsdaten verglichen werden, insbesondere wenn der „jährliche Energieverbrauch“ angegeben wird.

Daher muss die weitere Literatur aus Konferenzen und anderen Quellen sehr sorgfältig ausgewertet werden, um objektive Ergebnisse aus den einzelnen Quellen entnehmen zu können. ■

## Literatur

- [1] The Coca-Cola Company: Global Commitment to Reducing Greenhouse Gases, Case Study, EU Food and Drink Industry Environment Review 2004, S. 14
- [2] Yamasaki, H. et al.: Introduction of Transcritical Refrigeration Cycle Utilizing CO<sub>2</sub> as Working Fluid. 17th International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2004
- [3] Veje, C., Stüss, J.: The Transcritical CO<sub>2</sub> Cycle in Light Commercial Refrigeration Applications. 6th Gustav Lorentzen Conference, Glasgow. 2004
- [4] Stüss, J., Veje, C.: Development and Performance Measurements of a Small Compressor for Transcritical CO<sub>2</sub> Applications. 17th International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2004
- [5] Kim, M.-H. et al.: Fundamental Process and System Design Issues in CO<sub>2</sub> Vapour Compression Systems. Elsevier. Progress in Energy and Combustion Science. September 2003
- [6] KM-Kreis 6.2: Cycle Calculation Program (Kältemittel-Kreislauf-Programm) of FKW-Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Version 6.2, June 2004
- [7] Klein, S.; Alvarado, F.: Engineering Equation Solver (EES), Demo-Version, F-Chart Software
- [8] Stüss, J.: Reduzierung der Treibhausgase, Kälte Klima Aktuell, März 2005, Vol. 3, S. 18

## Leserbrief

### Mit eben mal „übergeben“ war es nicht getan

In Ihrem Artikel „Theo-Mack-Förderpreis an HKK“ in KK 7/2005 schreiben Sie auf S. 47, dass ich die komplette „Bibliothek“ des ehemaligen Bergedorfer Eisenwerkes für den HKK gerettet hätte. Das ist nicht ganz richtig. Archiv und Bibliothek der Bergedorfer Eisenwerk AG Astra-Werke sind schon lange in gesicherten und guten Händen. Um eine kleine Rettungsaktion ging es aber dennoch. Ich erfuhr durch Herrn Böttcher von der Fa. Alfa-Laval MID Europe GmbH in Glinde, dass dort noch Restbestände des Archivs des Bergedorfer Eisenwerkes, später Alfa-Laval Industrietechnik, aufgetaucht seien und man diese aus Platzgründen weggeben müsse. Nach Besichtigung der Bestände und Rücksprache mit der Geschäftsleitung erhielt ich die Erlaubnis alles zu veranlassen, um die Bestände als Geschenk der Alfa-Laval Mid Europe GmbH an das Museum des Vereins Historische

Kälte- und Klimatechnik (HKK e.V.) in Maintal zu übergeben. Mit eben mal übergeben war es jedoch nicht getan. Es handelte sich um eine immense Menge an gebundenen Fachzeitschriften und einigen Einzelpublikationen aus den Gebieten Molkerei, Milchwirtschaft, Milchwirtschaftliche Forschung, Käserei, Brauerei, Kältetechnik, DLG-Ausstellungen usw., welche, bedingt durch verschiedene Umzüge, größtenteils ungeordnet in großen Kartons lagerten. Ich habe die Bestände in mehrtägiger Arbeit sortiert, katalogisiert, in neue Umzugskartons verpackt und die Inhalte der einzelnen Kartons nach Karton-Nr. aufgelistet. Das Ergebnis waren 21 Umzugskartons auf vier EURO-Paletten mit einem Gesamtgewicht von 1237 kg.

Es handelte sich um insgesamt 437 Zeitschriftenbände und einige Einzelpublikationen. Allein 49 Bände stammen aus der Zeit vor Beginn des ersten Weltkrieges. Der älteste Band ist aus dem Jahre 1890. Um das Zeitschriftenkonvolut unterzubringen, würde das Museum ca. 25 Regalmeter benötigen. Der Versand nach Maintal erfolgte kostenlos durch die YORK Deutschland GmbH, Hamburg. **Wer stiftet dem Museum des HKK e.V. die erforderlichen Regalmeter?**

Bernhard Fischer