

Vergleichsrechnungen mit CO₂, R404A und R134a

Energetische Betrachtung kleiner Supermarkt-Kälteanlagen

Michael Schiefer, Matthias Liehm und Stefan Löbl, Dresden

Die Problematik des vom Menschen verursachten Treibhauseffektes ist in den letzten Jahren in den Medien immer präsenter geworden. Dabei sind auch die Kältemittel in das Blickfeld der Umweltpolitik geraten. Herkömmliche Kältemittel wie R404A und R134a sind Stoffe mit hohem Treibhauspotenzial. Der Druck auf Anlagenbauer und -betreiber, umweltfreundlichere Kälteanlagen zu entwickeln bzw. einzusetzen, wächst. Dabei gewinnt CO₂ als alternatives Kältemittel zunehmend an Bedeutung. Im vorliegenden Artikel wird ein energetischer Vergleich kleiner Supermarkt-Kälteanlagen mit verschiedenen Kältemitteln vorgenommen. Dabei werden der Energieverbrauch und das Treibhauspotential üblicher einstufiger und optimierter Prozesse mit CO₂, R404A und R134a betrachtet.

Grundlage dieses Artikels ist eine Diplomarbeit [1], die in Zusammenarbeit der Dresdner Kühlanlagenbau GmbH und der TU Dresden angefertigt wurde. In dieser Arbeit wurde der Energieverbrauch unterschiedlicher Anlagenschaltungen mit verschiedenen Kältemitteln berechnet.

Für einen aussagekräftigen Vergleich wurde der Energieverbrauch für ein gesamtes Jahr ermittelt. Als Grundlage dienten die Temperaturen der letzten Jahre in Darmstadt (Bild 1). Da in einem Supermarkt der Kältebedarf nicht konstant ist, wurde eine Unterteilung in offenen Markt (Montag bis Samstag 7–20 Uhr) und geschlossenen Markt (Nacht, Wochenende, Feiertage) vorgenommen. Durch Nachtrollen und geringeren Wärmeintrag (Menschen, Beleuchtung usw.) wurde die Kälteleistung für den geschlossenen Markt mit 50% der Kälteleistung des offenen Marktes gerechnet. Die Temperaturkurven in Bild 1 zeigen, dass bei offenem Markt höhere Temperaturen der Außenluft häufiger auftreten als bei geschlossenem Markt.

Neben dem Energieverbrauch wurden Kosten-, Sicherheits- und Umweltaspekte diskutiert.

Anlagenschaltungen

Herkömmliche R404A-Supermarkt-Kälteanlagen werden in der Regel als einstufige Prozesse ausgeführt (Bild 2). CO₂ weist

gegenüber R404A und R134a einige Besonderheiten auf, die beim Bau einer Kälteanlage berücksichtigt werden müssen. So arbeiten CO₂-Anlagen z. B. auf weit höherem Druckniveau als Anlagen mit anderen Kältemitteln. Die kritische Temperatur von CO₂ beträgt 31 °C. Damit muss die Wärmeabfuhr einen Teil des Jahres überkritisch erfolgen. In diesem Bereich ergeben sich nur geringe Leistungszahlen des Prozesses. Im transkritischen Betrieb (d. h. überkritische Wärmeabfuhr) treten Drücke von bis zu 110 bar auf. Damit steigen die Anforderungen an die Sicherheitstechnik für CO₂-Anlagen. Andererseits zeichnet sich CO₂ durch eine hohe volumetrische Kälteleistung aus. Aufgrund des Einsatzes bei wesentlich höheren Drücken als bei anderen Kältemitteln ergeben sich zusätzlich hervorragende Wärmeübertragungseigenschaften.

CO₂ in Supermarkt-Kälteanlagen

In Supermärkten befinden sich Teile der Kälteanlage im Verkaufsraum, d. h. der Kunde hält sich in der Nähe von Kältemittelleitungen auf. Daraus ergeben sich erhöhte Sicherheitsanforderungen an die Kälteanlage. Die mit CO₂ auftretenden hohen Drücke in der Anlage sind technisch beherrschbar. Dennoch bleiben diesbezüglich Bedenken und eine geringe Akzeptanz bei den Anlagenbetreibern. Abhilfe schafft eine mehrstufige Prozessführung. Bei die-

zu den Autoren

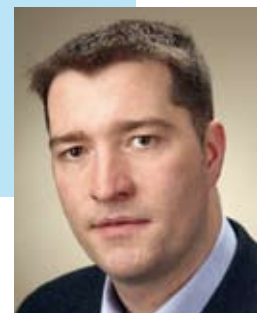
Dipl.-Ing.
Michael Schiefer,
Bereich Technik,
Dresdner Kühlanlagenbau GmbH



Dr.-Ing.
Matthias Liehm,
Fachverantwortlicher Technik,
Dresdner Kühlanlagenbau GmbH



Dr.-Ing.
Stefan Löbl,
wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Lehrstuhl für Kälte- und Kryotechnik
der TU Dresden



ser liegt ein zusätzliches Druckniveau zwischen Hoch- und Niederdruck der Anlage. Damit wird der Hochdruck auf den Maschinenraum begrenzt und im Markt bzw. in den Kühlmöbeln herrschen moderate Drücke von maximal 50 bar.

Economizer Cycle

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden unterschiedliche Möglichkeiten der Prozess-

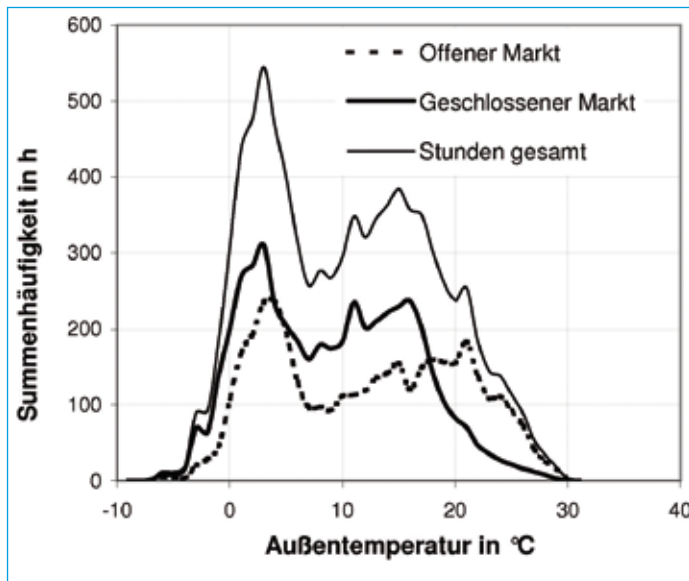


Bild 1 Summenhäufigkeit der Außentemperaturen

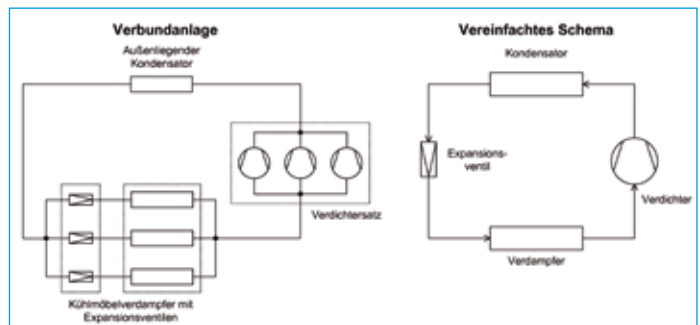


Bild 2 Einstufige Verbundkälteanlage

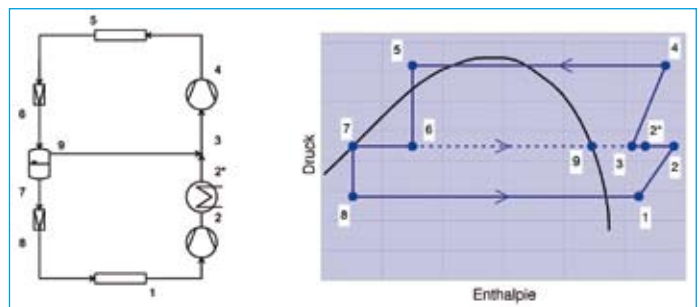


Bild 3 Economizer Cycle mit äußerer Zwischenkühlung

führung aus energetischer Sicht untersucht. Als die anlagentechnisch günstigste und energetisch effizienteste Schaltung hat sich der Economizer Cycle mit äußerer Zwischenkühlung herausgestellt (Bild 3).

Der Prozess verläuft wie folgt: Das überhitzte Gas (1) wird von der ersten Verdichterstufe angesaugt und auf Mittel- druck komprimiert (2). In einem (optionalen) Zwischenkühler wird das Kältemittel mit Umgebungsluft abgekühlt (2*). Anschließend wird das Gas mit dem gasförmigen Anteil (Flash Gas) aus der Mitteldruckflasche (9) gemischt und von der zweiten Verdichterstufe auf Hochdruck komprimiert (4). Im Kondensator (bzw. Gaskühler im transkritischen Betrieb) wird die Prozesswärme an die Umgebung abgeführt (5) und das Kältemittel über ein Expansionsventil in die Mitteldruckflasche entspannt (6). Dort wird das Flash Gas abgetrennt. Das flüssige Kältemittel (7) wird entspannt (8) und anschließend verdampft und überhitzt (1).

Gegenüber dem einstufigen Prozess bietet diese Schaltung neben sicherheits-

technischen auch energetische Vorteile. Zum einen wird das Druckverhältnis, das die Verdichterstufen aufzubringen haben, geringer. Somit steigt der Wirkungsgrad der Verdichter. Zum anderen muss der gasförmige Anteil, der keinen Beitrag zur Kälteleistung liefert, durch die Abtrennung in der Mitteldruckflasche nicht durch den Verdampfer geleitet und anschließend verdichtet werden. Damit reduziert sich die erforderliche Antriebsleistung der unteren Verdichterstufe. Außerdem dient das Flash Gas der inneren Zwischenkühlung des Kältemittels nach der ersten Verdichterstufe.

Vereinfachungen und Randbedingungen

Supermarkt-Kälteanlagen werden üblicherweise als Verbundanlagen gebaut. Dabei werden mehrere Verdampfer mit jeweils eigenem Expansionsventil mit einem Verdichtersatz betrieben (Bild 2). Für die Bestimmung des Energieverbrauchs wurde vereinfachend mit nur je

einem Verdichter, Verdampfer und Expansionsventil gerechnet. In der realen Anlage werden die Verdichter je nach Kältebedarf und Kühlstellentemperatur ein- und ausgeschaltet. Im Gegensatz dazu wurde bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass die Verdichter ständig in Betrieb sind. Die berechnete Verdichterleistung ist somit ein gemittelter Wert der realen Verdichterleistung.

Für den Vergleich der verschiedenen Prozesse mit unterschiedlichen Kältemitteln wurden einige Annahmen getroffen (Bild 4):

Verdampfer

Die Kälteleistung soll bei einer Kühlstellentemperatur von 3°C bei offenem Markt 50 kW und bei geschlossenem Markt 25 kW betragen. Für R404A und R134a wurden verschiedene Rechnungen mit thermostatischem (TEV) und elektronischem Expansionsventil (EEV) durchgeführt. Die Überhitzung wurde für R404A- und R134a-Anlagen mit EEV um 2K geringer als bei

Anlagen mit TEV angesetzt, da aufgrund der besseren Regelbarkeit die Gefahr von Flüssigkeitströpfchen in der Saugleitung reduziert wird. Außerdem wurde die Temperaturdifferenz im Verdampfer um 2 K geringer angenommen, da die Regelung die Einhaltung der Kühlstellentemperatur aufgrund geringerer Schwankungen der Verdampfungstemperatur auch bei geringerer Temperaturdifferenz gewährleistet. Bei CO₂ wurde die Temperaturdifferenz im Verdampfer aufgrund des besseren Wärmeübergangs um 2 K geringer als bei der Verdampfung von R404A und R134a vorgegeben.

Kondensator / Gaskühler

Analog zum Verdampfer wurde auch bei der Wärmeabfuhr für CO₂ mit geringeren Temperaturdifferenzen gerechnet. Da im transkritischen Betrieb die gesamte Wärmeabgabe im Gaskühler mit Temperaturgleit erfolgt, können geringere Temperaturdifferenzen als bei der unterkritischen Kondensation erzielt werden.

Bei niedrigen Außentemperaturen verringert sich die abzuführende Wärme, damit stellt sich bei gleich bleibender Übertragungsfläche eine geringere Temperaturdifferenz ein. Dem wurde bei den Betrachtungen Rechnung getragen, indem Temperaturdifferenzen für die höchste und die niedrigste Außentemperatur festgelegt und alle Zustände dazwischen interpoliert wurden.

Für den optimalen Betrieb der Anlage mit TEV ist eine Mindestdruckdifferenz erforderlich. Aus diesem Grund wurde die niedrigste Kondensationstemperatur bei R404A auf 25 °C und bei R134a auf 30 °C festgelegt. Für Anlagen mit EEV wurde mit einer minimalen Kondensationstemperatur von 10 °C gerechnet, die auch bei den CO₂-Anlagen mit TEV angesetzt wurde. Bei Temperaturen unterhalb von 10 °C liegen bisher kaum Erfahrungen vor, so dass Untersuchungen des Betriebs der Kälteanlage in diesem Bereich erforderlich sind. Jedoch hat eine weitere Absenkung der Kondensationstemperatur auf den Jahresenergieverbrauch aufgrund der geringen Betriebsstundenzahl mit sehr niedrigen Außentemperaturen nur geringe Auswirkungen.

Verdichter

Aufgrund der höheren Drucklage von CO₂ fallen die Druckverluste bezogen auf die entsprechende Sättigungstemperaturdifferenz (in K) geringer aus, so dass bei CO₂ mit geringeren Druckverlusten gerechnet wurde.

Der isentrope Verdichterwirkungsgrad steigt mit abnehmendem Druckverhältnis. Da dieser Anstieg im betrachteten Bereich verhältnismäßig flach ist, wurde bei sämtlichen Prozessen vereinfachend mit konstantem Wirkungsgrad gerechnet.

Energieverbrauch

Für den energetischen Vergleich unterschiedlicher Prozesse wurde ein Programm erstellt, das die Berechnung verschiedener kältetechnischer Prozesse ermöglicht. Die Zustandsgrößen wurden mit dem Stoffdatenprogramm REFLIB des ILK Dresden ermittelt [2]. Mithilfe des im Rahmen der Diplomarbeit erstellten Programms kann der Jahresenergieverbrauch unterschiedlicher Anlagen berechnet werden. Dazu wird der Energieverbrauch für jede Außentemperatur bestimmt. Anschließend wird über die Summenhäufigkeit der jeweiligen Außentemperatur der gewichtete Mittelwert gebildet.

Kältemittel		R404A, R134a		CO ₂
Prozess		einstufig	einstufig optimiert	einstufig; Economizer Cycle mit ZK
Expansionsventil		thermostatisch (TEV)	elektronisch (EEV)	thermostatisch (TEV)
Kälteleistung	offener Markt	50 kW		
	geschlossener Markt	25 kW		
Kühlstellentemperatur		3 °C		
Überhitzung		20 K	18 K	20 K
Temperaturdifferenz Verdampfer		13 K	11 K	11 K
Außentemperatur		s. Bild 1		
Unterkühlung		2 K		
Temperaturdifferenz (in Klammern entsprechende Umgebungstemperatur)	Kondensator	13 K (32 °C) 11 K (14 °C)	10,5 K (32 °C) 8 K (2 °C)	10 K (18 °C) 8 K (2 °C)
	Gaskühler	-	-	8 K (32 °C) 6,5 K (19 °C)
Minimale Kondensationstemperatur		25 °C (R404A) 30 °C (R134a)	10 °C	10 °C
Druckverlust Druckleitung		0,5 K	0,5 K	0,3 K
Druckverlust Saugleitung		1,5 K	1,5 K	1 K
Wirkungsgrad Verdichter		0,75		
Mechanischer Wirkungsgrad		0,9		
Elektrischer Wirkungsgrad		0,9		

Bild 4 Randbedingungen für den Vergleich

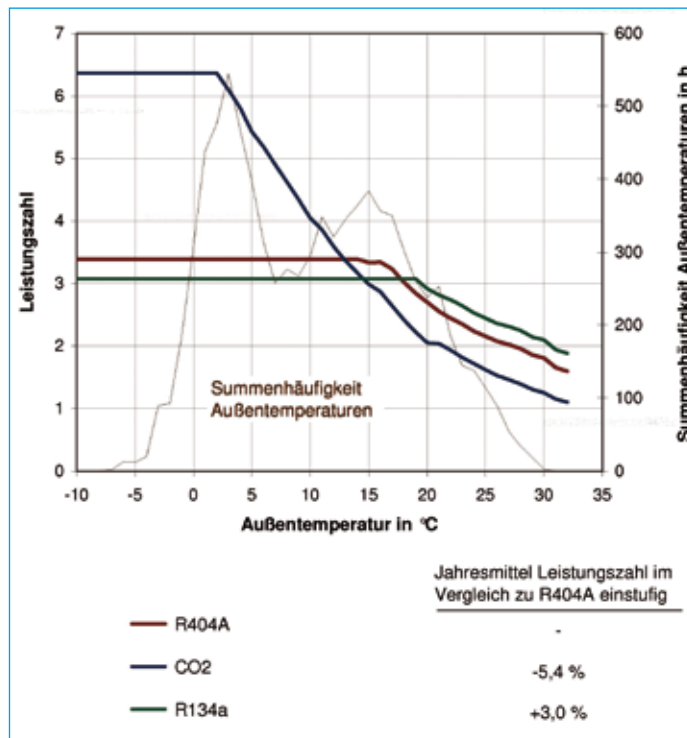


Bild 5 Leistungszahl einstufiger Anlagen abhängig von der Außentemperatur

In Bild 5 sind die Leistungszahlen für den einstufigen Prozess mit R404A, R134a und CO₂ dargestellt. Der Sprung bei CO₂ zwischen 18°C und 19°C ergibt sich aus dem Übergang in den transkritischen Betrieb und der damit verbundenen geringeren Temperaturdifferenz im Gaskühler.

Die Berechnungen zeigen, dass eine einstufige CO₂-Anlage einen ca. 5% geringeren und eine R134a-Anlage einen um ca. 3% höheren Energieverbrauch gegenüber einer herkömmlichen R404A-Anlage aufweist. Der Vorteil des CO₂ liegt neben dem besseren Wärmeübergang und den geringeren Druckverlusten, vor allem in der

niedrigeren minimalen Kondensationstemperatur. Bild 5 zeigt, dass mit zunehmender Außentemperatur R134a- und R404A-Prozesse gegenüber CO₂-Prozessen energetisch effizienter werden. Dies wird auch im Bild 6 verdeutlicht, welches das Produkt von Leistungsaufnahme und Anzahl der Stunden für einzelne Temperaturbereiche zeigt. Bei Temperaturen unterhalb von 15°C ist der Energieverbrauch herkömmlicher einstufiger Anlagen mit CO₂ geringer als bei Anlagen mit R404A und R134a. Bekanntermaßen ist bei CO₂-Anlagen die Leistungszahl bei Außentemperaturen oberhalb von 25°C sehr gering. Aufgrund

der geringen Betriebsstundenzahl in diesem Temperaturbereich hat dies jedoch kaum Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch. Einen wesentlich größeren Anteil am Jahresenergieverbrauch einer CO₂-Anlage hat der Betrieb im Temperaturbereich von 15 bis 24°C, d.h. auch schon im unterkritischen Bereich bei Annäherung an den kritischen Punkt.

Optimierungsmöglichkeiten

CO₂-Anlagen erfordern aufgrund der hohen Drucklage einen Mehraufwand an Material und Sicherheitstechnik. Die da-

durch anfallenden Zusatzkosten könnten auch in die Optimierung herkömmlicher Anlagen investiert werden. Die vorangegangenen Ausführungen legen den Gedanken nahe, die Prozesse mit R404A und R134a durch Absenken der minimalen Kondensationstemperatur energetisch zu optimieren. Dies kann durch den Einsatz eines EEV anstelle des TEV erreicht werden, wodurch die Mindestdruckdifferenz entfällt. Weiterhin wurden die Anlagen mit R404A und R134a mit 20% vergrößerter Kondensatorfläche berechnet. Daraus resultiert eine geringere Temperaturdifferenz im Kondensator. In Bild 7 wird die Leistungszahl einer herkömmlichen R404A-Anlage (TEV) denen optimierter Anlagen (EEV, größere Kondensatorfläche) gegenübergestellt. Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Effizienz durch die Optimierung.

Eine Möglichkeit für die Optimierung des CO₂-Prozesses ist der o.g. Economizer Cycle. Neben einer energetischen Verbesserung löst die zweistufige Prozessführung auch das Problem des Hochdrucks im Verkaufsraum. Die CO₂-Anlage mit Economizer ohne Zwischenkühlung verbraucht im Jahr ca. 11% weniger Energie als die einstufige.

Beim Prozess mit äußerer Zwischenkühlung wird Wärme abgeführt, so dass sich die von der oberen Verdichterstufe aufzubringende Arbeit reduziert. Im Supermarkt bietet sich aus Kostengründen Luft als Kühlmedium an. Die Zwischenkühlung hat sich für CO₂ als effektive Optimierungsmöglichkeit herausgestellt, da die Verdichtungsendtemperaturen höher sind als bei R404A. Da die Außentemperatur bei der Zwischenkühlung die für die Wärmeabgabe begrenzende Größe ist, kann bei einer CO₂-Anlage mehr Wärme abgeführt werden. Gegenüber dem einstufigen Prozess ergibt sich mit dem Economizer mit Zwischenkühlung eine Energieeinsparung von fast 20%. Die gleichen Berechnungen ergeben für R404A eine Einsparung von nur knapp 10%.

Neben diesen Möglichkeiten wurden weitere Varianten für eine mögliche Prozessoptimierung untersucht:

Innere Wärmeübertrager

Je nach Kältemittel und Außentemperatur kann der Einsatz eines inneren Wärmeübertragers die Effizienz der Anlage erhöhen. Die Berechnungen haben gezeigt, dass sich ein CO₂-Prozess bei hohen Au-

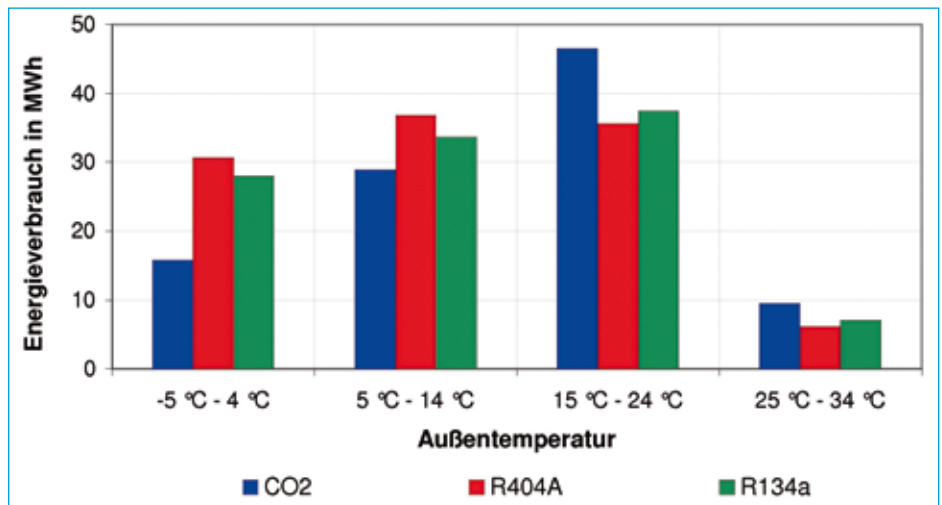


Bild 6 Energieverbrauch einstufiger Anlagen für einzelne Temperaturbereiche

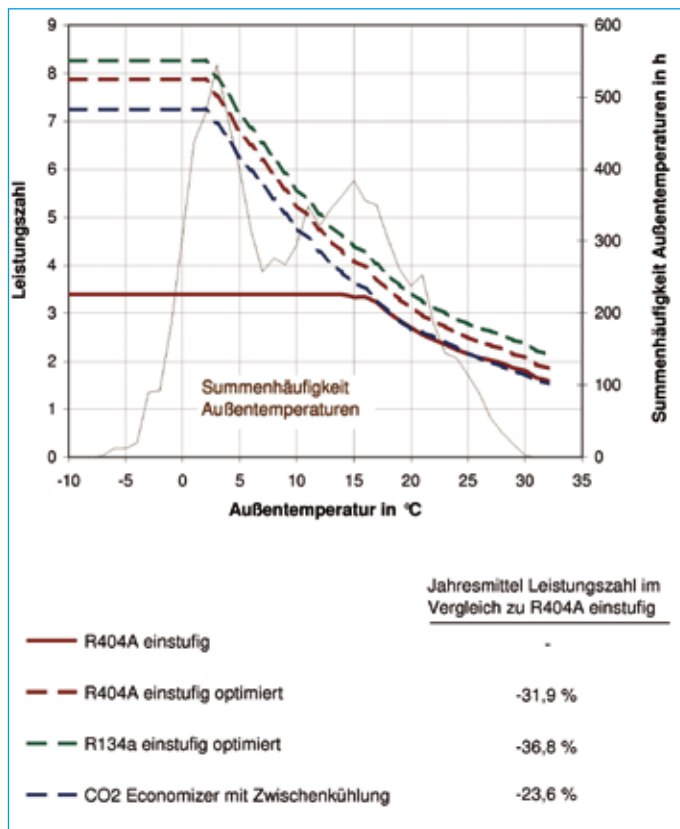


Bild 7 Leistungszahl optimierter Anlagen abhängig von der Außentemperatur

ßentemperaturen mithilfe eines inneren Wärmeübertragers deutlich verbessern lässt. Bei niedrigen Außentemperaturen hingegen verschlechtert sich die Effizienz. Über ein ganzes Jahr gesehen bringt der Einsatz eines inneren Wärmeübertragers für CO₂ keine Energieeinsparung. Für die betrachteten R404A-Anlagen ergibt sich ein ähnliches Bild.

Nutzung der Expansionsarbeit

Die bei der Drosselung auftretenden Verluste können durch den Einsatz einer Expansionsmaschine reduziert werden. Neben der Verringerung der Drosselverluste besteht die Möglichkeit, die Expansionsarbeit für die Verdichtung zu nutzen. Aufgrund der hohen Drosselverluste bei CO₂ ist der Nutzen einer Expansionsmaschine bei einer CO₂-Anlage wesentlich größer als bei einer R404A- oder R134a-Anlage.

Kältemittel		R404A		R134a		CO ₂	
Prozess		einstufig	einstufig optimiert	einstufig	einstufig optimiert	einstufig	Economizer Cycle mit ZK
GWP in kg CO ₂ kg ⁻¹		3260	3260	1300	1300	1	1
Leckagerate in % a ⁻¹		5	5	5	5	30	30
Füllmenge in kg		125	125	125	125	125	125
Leckagerate in kg a ⁻¹		6,25	6,25	6,25	6,25	37,5	37,5
Betriebszeit in a		15	15	15	15	15	15
Rückgewinnungsfaktor		0,9	0,9	0,9	0,9	0	0
Energieverbrauch in MWh a ⁻¹		103,9	70,8	107,0	65,6	96,5	79,4
CO ₂ -Emission in kg CO ₂ MWh ⁻¹		683	683	683	683	683	683
Anteile am TEWI-Wert in t CO ₂ a ⁻¹	Leckage	20,4	20,4	8,1	8,1	0,04	0,04
	Entsorgung	2,7	2,7	1,1	1,1	0,01	0,01
	Energieverbrauch	71,0	48,3	73,1	44,8	65,9	54,2
TEWI-Wert in t CO₂ a⁻¹		94,1	71,4	82,3	54,0	66,0	54,3

Bild 8 TEWI-Betrachtung von Anlagen mit verschiedenen Kältemitteln

Umweltverträglichkeit

Das wichtigste Argument für den Einsatz von CO₂ anstelle der FKW ist das geringere Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, kurz GWP) von CO₂ (GWP = 1) gegenüber R404A (3260) und R134a (1300). Für einen aussagekräftigen Vergleich wird der TEWI-Wert herangezogen. Dieser berücksichtigt neben dem direkten Anteil einer Anlage (Leckage und Entsorgung) auch den indirekten Anteil (CO₂-Ausstoß der Kraftwerke). Für die in den Bildern 5 und 6 dargestellten Prozesse ist die TEWI-Berechnung in Bild 8 aufgeführt. Das mit Abstand höchste Treibhauspotenzial weist die herkömmliche R404A-Anlage auf. Grund dafür sind der hohe GWP-Wert sowie der hohe Energieverbrauch. Die geringsten TEWI-Werte weisen die optimierten CO₂- und R134a-Anlagen auf. Die optimierte R134a-Anlage gleicht den Nachteil des höheren direkten Anteils durch einen geringeren Energieverbrauch gegenüber der optimierten CO₂-Anlage aus. Die optimierte R404A-Anlage stellt zwar aus ökologischer Sicht ebenfalls eine Verbesserung gegenüber der herkömmlichen R404A-Anlage dar. Die Verringerung des Treibhauspotenzials ist jedoch weniger deutlich als bei den günstigsten CO₂- und R134a-Anlagen.

Zusammenfassung und Ausblick

Als Ergebnis der Betrachtungen ist festzustellen, dass der Energieverbrauch der

Anlagen mit CO₂ sowie mit R404A und R134a in der gleichen Größenordnung liegt. Weiterhin hat sich gezeigt, dass für alle drei Kältemittel Möglichkeiten zur Prozessoptimierung bestehen. Optimierte R404A- und R134a-Anlagen weisen dabei einen geringeren Energieverbrauch als die effizienteste CO₂-Anlage auf. Neben dem Energieverbrauch sollte auch der erhöhte Sicherheitsaufwand, der sich aus der höheren Drucklage bei CO₂ ergibt, und die damit verbundenen Mehrkosten berücksichtigt werden.

Aus ökologischer Sicht ist der Einsatz von CO₂ als Kältemittel sinnvoll. Jedoch hat sich bei den Berechnungen gezeigt, dass auch andere Wege zu einer Reduzierung des Treibhauspotenzials einer Kälteanlage führen können. Zum einen kann das indirekte Treibhauspotenzial durch eine energetische Optimierung gesenkt werden. Zum anderen ließe sich der direkte Anteil am TEWI-Wert – insbesondere bei R404A – durch reduzierte Füllmengen und Leckagen verringern. ■

Literatur

- [1] M. Schiefer: Energetische Betrachtung von Anlagenschaltungen für kleine Supermarkt-Kälteanlagen mit den Kältemitteln CO₂ und R404A. Technische Universität Dresden; 2007
- [2] REFLIB. Institut für Luft- und Kältetechnik GmbH; 1997