

CO₂-Verdichter und -Ausrüstungen, Anwendung und Verfügbarkeit*

Massimo Casini, Compiobbi/Florenz

Das Kohlenstoffdioxid hat in den vergangenen 10 Jahren wegen der Probleme mit den chemisch hergestellten Kältemitteln bezüglich der Ozonzerstörung und des Treibhauseffektes eine Erneuerung als Kältemittel erfahren. Der Vergleich der Energieeffektivität hat in vielen Anwendungen gezeigt, daß diese Frage tatsächlich kritisch ist. Deshalb werden die Vorteile der Nichtbrennbarkeit und der Ungiftigkeit bei der Anwendung von CO₂ als Kältemittel im Verhältnis zu anderen natürlichen Kältemitteln herausgestellt.

Diese Eigenschaften machen CO₂ zu einer sehr interessanten Alternative in bezug auf Sicherheit für Anwendungen, bei denen Personen dem Leckgas ausgesetzt sein können, z. B. bei der Gewerbekühlung und bei der Wohnungs- und Kraftfahrzeugklimatisierung.

Der Arbeitsdruck bei der CO₂-Anwendung ist für solche Fälle, in denen es als primäres Kältemittel angewendet wird, höher als bei den traditionellen Systemen, typisch sind 35 bis 70 bar. Das führt zum überkritischen Prozeßverlauf und erfordert spezielle Veränderungen bei der Entwicklung der Komponenten für CO₂ mit dem Verdichter als dem wichtigsten Element.

Die CO₂-Verdichterentwicklung bei Dorin

Der Beginn der Entwicklung

Das Projekt zur Entwicklung der CO₂-Verdichter startete bei Dorin hauptsächlich wegen der Anforderungen eines bedeutenden Kunden, die Möglichkeit zur Schaffung eines Prototyps für die Supermarktkühlung zu untersuchen.

Die neue Dorin-Verdichterserie

Die neue CO₂-Verdichterserie, die sich in Entwicklung befindet, betrifft Kolbenverdichter für Systeme mit überkritischen oder unterkritischen Anwendungen nahe dem kritischen Punkt. Das bedeutet maximale Arbeitsdrücke bis zu 150 bar auf der Hochdruckseite, was weit über dem von vorhandenen Standardverdichtern liegt. Alle Verdichter der neuen Serie sind zweizylindrig in drei Gehäusegrößen

zum Autor

Masimo Casini,
Vertriebsleitung
der Officine
Mario Dorin
S. p. A.,
Compiobbi/
Florenz



konstruiert. Die Leistungsabstufung wird durch konstanten Zylinderdurchmesser je Gehäusegröße und variablen Hub verwirklicht. Im größten Typ sorgt eine Ölpumpe für die Schmierung.

Die Motoren sind sauggasgekühlt. Die Kühlung kann auch durch Verwendung des Öles als Kühlmedium in Verbindung mit einem externen Ölkühler verbessert werden, so wie es bei den Vorserien-

Dorins CO₂-Verdichter, erstmals auf der IKK 1998 in Nürnberg vorgestellt, in einer anwendungsreifen Vorserie als 1- oder 2stufige Ausführung



* Als Vortrag während der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 23. 11. 2001 gehalten und anschließend für die KK bearbeitet durch Dr.-Ing. Ulrich Adolph, Leipzig

Einstufige Verdichter für transkritische Anwendungen												
Serie	Modell	Zylinder	Bohrung	Hub	Zyl.-Vol.	Vol. 50 Hz	Vol. 60 Hz	Motor	Saugl.		Druckl.	
-	-	-	mm	mm	cm ³	m ³ /h	m ³ /h	kW	BSP		BSP	
100	TCS 103 H	2	18	6	3,1	0,5	0,6	0,75	1/2		1/4	
	TCS 105 H	2	18	8	4,6	0,8	1,0	1,2	1/2		1/4	
	TCS 106 H	2	18	12	6,1	1,1	1,3	1,5	1/2		1/4	
	TCS 108 H	2	18	15	7,6	1,3	1,6	2,3	1/2		1/4	
	TCS 110 H	2	18	19	9,7	1,7	2,0	2,3	1/2		1/4	
	TCS 111H	2	18	23	11,7	2,0	2,4	2,5	1/2		1/4	
200	TCS 214 H	2	22	16	13,7	2,4	2,9	3,4	3/4		1/2	
	TCS 220 H	2	22	26	19,8	3,4	4,1	4,5	3/4		1/2	
	TCS 224 H	2	22	34	25,8	4,5	5,4	6,3	3/4		1/2	
300	TCS 325 H	2	34	16	29,1	5,1	6,1	8,0	1		3/4	
	TCS 340H	2	34	22	39,9	7,0	8,3	10,0	1		3/4	
	TCS 351 H	2	34	28	50,8	8,8	10,5	12,0	1		3/4	
	TCS 362 H	2	34	34	61,7	10,7	12,5	14,8	1		3/4	

Zweistufige Verdichter für transkritische Anwendungen												
Serie	Modell	Zyl. 1. St.	Bohr. 1	Bohr.2	Hub	Zyl.-Vol.	Vol. 50 Hz	Vol. 60 Hz	Motor	Saugl.	Inter.	Druckl.
-	-	-	mm	mm	mm	cm ³	m ³ /h	m ³ /h	kW	BSP	BSP	BSP
100	TCD 104 L	1	25	18	6	3,7	0,5	0,6	0,75	1/2	1/4	1/4
	TCD 106 L	1	25	18	9	5,5	1,0	1,2	1,2	1/2	1/4	1/4
	TCD 107 L	1	28	18	12	7,4	1,3	1,6	1,2	1/2	1/4	1/4
	TCD 107 L	1	28	18	15	9,2	1,6	1,9	1,5	1/2	1/4	1/4
	TCD 107 L	1	28	18	19	11,7	2,0	2,4	2,3	1/2	1/4	1/4
	TCD 108 L	1	28	18	23	14,2	2,5	3,0	2,5	1/2	1/4	1/4
200	TCD 218 L	1	34	22	18	15,3	2,8	3,4	2,8	1/2	1/2	1/2
	TCD 224 L	1	34	22	26	23,6	4,1	4,9	4,1	1/2	1/2	1/2
	TCD 228 L	1	34	22	34	30,9	5,4	6,4	5,6	1/2	1/2	1/2
300	TCD334 L	1	52	34	16	34,0	5,9	7,1	5,0	3/4	1/2	1/2
	TCD 347 L	1	52	34	22	46,7	8,1	9,8	8,0	3/4	1/2	1/2
	TCD 360 L	1	52	34	28	59,5	10,3	12,4	10,0	1	3/4	3/4
	TCD 372 L	1	52	34	34	72,2	12,5	15,1	12,0	1	3/4	3/4

Tabelle 1 Die neue Serienreihe der Dorin-CO₂-Verdichter

verdichtern vorgesehen war. Der Hauptgrund für solch eine Lösung ist die Vermeidung einer zu hohen Verdichtungs- endtemperatur, die infolge der Sauggas- kühlung entstehen kann. Zusätzlich ergibt sich dadurch ein energetischer Vorteil. Weiterhin ist die Möglichkeit geschaffen worden, den Motor und den Zylinderkopf wassergekühlt auszuführen.

Ein Hubvolumenstrombereich von 0,5 bis 10,7 m³/h für die einstufige und von 0,6 bis 12,7 m³/h für die zweistufige Reihe wird abgedeckt. Die jeweilige Leistung ist natürlich abhängig von den Auslegungs- daten des Systems und den Betriebs- bedingungen. Die neuen zweistufigen Ver- dichter haben zwei Zylinder in Reihe mit Bohrungen 28+18, 34+22 und 52+34 mm für die drei Gehäusegrößen.

Konstruktionsgesichtspunkte

Verdichter für derartige Anwendungen unterscheiden sich wesentlich von Standardverdichtern. Die Konstruktions- anforderungen unterscheiden sich des- halb in einigen Punkten stark von denen für Verdichter für traditionelle unter-

kritische Prozesse. Einerseits sind es be- sondere Herausforderungen, andererseits ergeben sich neue Möglichkeiten. Hier werden die Fragen diskutiert, auf die wir uns momentan konzentrieren.

Heutzutage laufen die meisten halbher- metischen Verdichter mit 4poligen Moto- ren, d. h. mit 1450 U/min bei 50 Hz. Für die CO₂-Verdichter wurden 2900/3500 U/min (50/60 Hz) möglich, weil die Schall- und Schwingungscharakteristik sehr gut ist, vor allem wegen des Einflusses des gerin- gen Zylindervolumens in Verbindung mit der großen Verdichtermasse, die sich aus den erforderlichen Wandstärken ergibt. Das bedeutete die Verdoppelung des Hubraumstromes für die gleiche Ver- dichtergröße und ergibt sehr vorteilhafte Kosten in bezug auf die Leistungsgröße.

Die volumetrische Leistung von CO₂ ist 5- bis 10fach höher als bei den üblichen Kältemitteln. Das verringert das erforder- liche Hubvolumen im gleichen Verhältnis. Dagegen liegt eine 5- bis 10fach höhere Druckdifferenz am Kolben an. Daraus folgt die Notwendigkeit eines geringen Kolbendurchmessers zur Begrenzung der Pleuelkräfte, aber damit ist auch ein geringerer Platz zur Aufnahme der Kraft- übertragungselemente vorhanden, und

das bedeutet eine größere spezifische Be- lastung der bewegten Teile. Die meisten Herausforderungen ergaben sich daraus für das Kolbenbolzenlager, um eine Lösung für geringen Verschleiß zu finden.

Die Löslichkeit des CO₂ im Öl ist gene- rellell hoch wegen der hohen Kurbelgehäu- sedrücke. Das ergibt eine stark reduzierte Viskosität und große Neigung zum Auf- schäumen des Öles. In Verbindung mit den hohen mechanischen Belastungen und den Erfordernissen, die sich aus der Ölzirkulation im Kältekreislauf ergeben, sind die Herausforderungen sowohl an den Ölhersteller als auch an den Verdich- terentwickler abgeleitet, um die richtige Lösung zu finden. Das Ölüberströmen bei den sauggasgekühlten Verdichtern hat sich als weiteres Problem gezeigt. Mit einigen ausgewählten Ölen wurden bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen Lebensdauertests durchgeführt.

In den Ventilen können relativ hohe Druckverluste akzeptiert werden, aber sie sind in Wirklichkeit gering. Ermüdungs- probleme treten durch die hohen Auf- prallgeschwindigkeiten der Ventilplatten auf, da eine relative hohe Gasviskosität auf der Druckseite berücksichtigt werden muß.

Trotz des geringen Druckverhältnisses hat man es mit einer großen Druckdiffe- renz zu tun. Die Fragen der inneren Ab- dichtung resultieren daraus als ein weite- res Entwicklungsproblem.

Hochdruckschwankungen im Zylinder- kopf haben besondere konstruktive Lö- sungen erfordert. Eine neue Ventilplatte für die hohen Drehzahlen wurde ent- wickelt und befindet sich in Erprobung.

Theoretisch ist es einfach, für zwei- stufige Verdichter das optimale Druck- verhältnis für die beiden Stufen zu finden. Jeweils unterschiedliche Systemanfor- derungen ergeben unterschiedliche Druck- verhältnisse. Prozeßerfordernisse spielen eine Rolle und die praktische Anwendung kann das Resultat beeinflussen. Prakti- sche Versuche sind also notwendig. Für zweistufige Verdichter im Gewerbekühl- bereich kann es zukünftig zweckmäßig sein, das Druckverhältnis der beiden Stufen in Abhängigkeit von den Betriebs- bedingungen unterschiedlich zu wählen.

Ergebnisse und Diskussion

Das Bild 1 zeigt den gemessenen volume- trischen Liefergrad und den isentropen Gütegrad für den untersuchten einstufigen Verdichter. Der isentrope Gütegrad ist definiert als das Verhältnis der isentropen

Arbeit bei Ansaugbedingungen zur Leistungsaufnahme des Motors. Bei geringen Druckverhältnissen sind die Werte sehr akzeptabel. Ausgehend von der Überlegung, daß die Einsatzfälle für CO₂ bei relativ niedrigen Druckverhältnissen im Vergleich zu unterkritischen Kältemitteln liegen, können die Effizienzwerte als brauchbar bezeichnet werden. Ein typisches Auslegungsdruckverhältnis für Wärmepumpen zur Wassererwärmung ist

Das Bild 2 zeigt den gemessenen volumetrischen Liefergrad und den isentropen Gütegrad für einen einstufigen CO₂-Vorserienverdichter mit einem Hubvolumenstrom von 2,7 m³/h bei 1450 U/min. Es ist möglich, die isentrope Effektivität direkt mit den Werten des zweistufigen Verdichters zu vergleichen, als Bezugsgröße ist die einstufige isentrope Arbeit zu Grunde gelegt. Der volumetrische Liefergrad betrifft die erste Verdichtungsstufe, sie ist aber

Im Vergleich mit dem einstufigen Verdichter konnte der COP-Wert für -35 °C um mehr als 20% gesteigert werden, selbst wenn einstufig gedrosselt wird. Die Druckgastemperatur wurde beim gleichen Zustand von 150 auf 130 °C reduziert.

Bild 3 zeigt die Indikatordiagramme für die beiden Verdichterstufen des Verdichters CD 4.027 D V bei der Verdichtung ab 20 bar (-20 °C) links und ab 12 bar (-35 °C) rechts, beide auf den Enddruck von 80 bar.

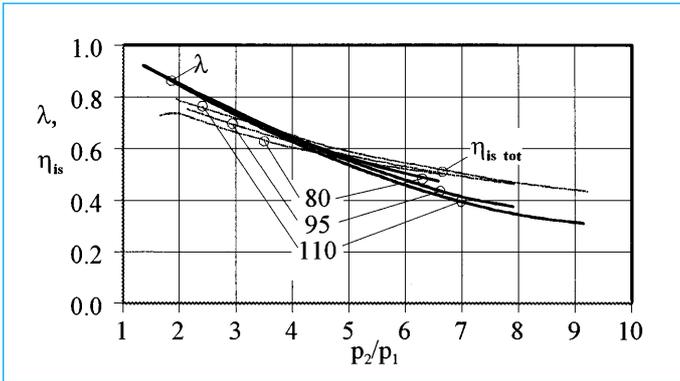


Bild 1 Gemessener volumetrischer Liefergrad und isentropen Gütegrad für einen einstufigen CO₂-Vorserienverdichter mit einem Hubvolumenstrom von 2,7 m³/h, als Funktion vom Druckverhältnis, für Verdichtungsdrücke von 80, 95 und 110 bar. Die Sauggasüberhitzung betrug konstant 10 °C

z. B. 2,6 im Vergleich zu einem HFC-System, bei dem es 4 beträgt. Die Effizienz fällt jedoch einigermaßen stark ab, wenn das Druckverhältnis steigt, vor allem wegen der zunehmenden inneren Leckage. Bei den großen Druckverhältnissen kann deshalb eine wesentliche Verbesserung durch zweistufige Verdichtung erreicht werden. Die Leckagen können durch zukünftige Entwicklungen hoffentlich reduziert werden.

über dem Gesamtdruckverhältnis des zweistufigen Verdichters dargestellt, weil das für die Auslegung des Systems wichtig ist.

Wie das Bild zeigt, ist die Effektivität des Verdichters bei hohen Druckverhältnissen relativ gut. Es wurde ein isentropen Gütegrad von 0,52 bei 80 bar unter Einschluß der Motorverluste erreicht, was einer Verdampfungstemperatur von -45 °C entspricht, er steigt auf 0,6 bei der Verdampfungstemperatur von -30 °C.

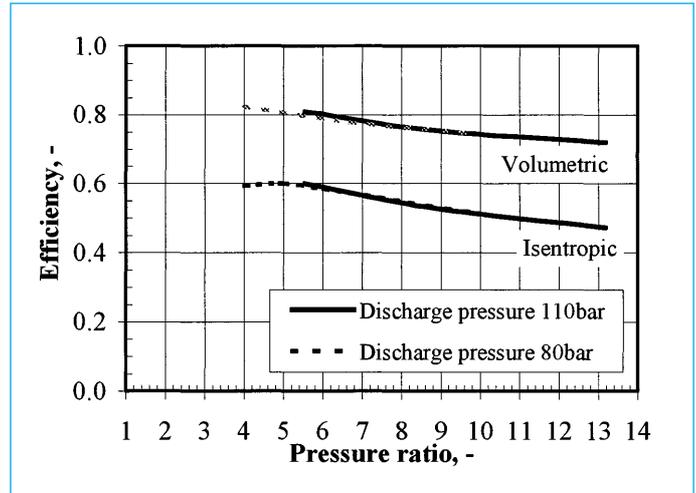


Bild 2 Gemessener volumetrischer Liefergrad und isentropen Gütegrad für einen zweistufigen CO₂-Vorserienverdichter CD 4.027 D (2,7 m³/h, 1450 U/min) bei verschiedenen Gesamtdruckverhältnissen. Sauggasüberhitzung 10 °C, Verdichtungsdruck 110 und 80 bar und Rückkühlung des Druckgases der 1. Stufe auf 20 °C. Als Bezugsgröße ist die isentrope Arbeit eines einstufigen Prozesses benutzt. Der volumetrische Liefergrad ist auf die Verdichtung in der ersten Stufe bezogen.

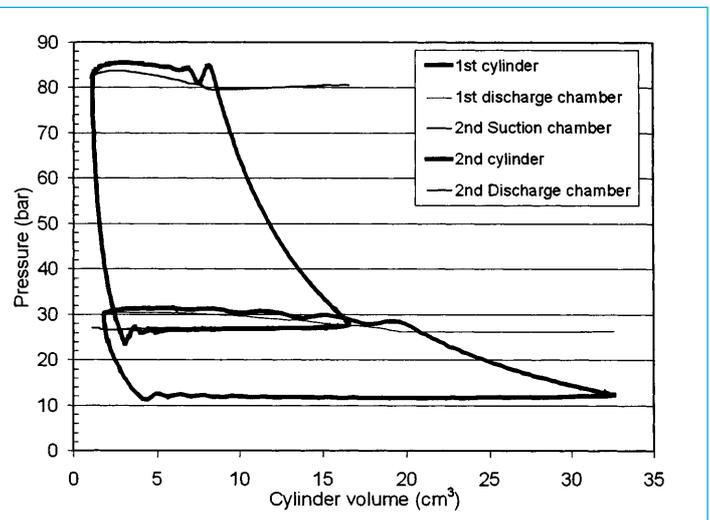
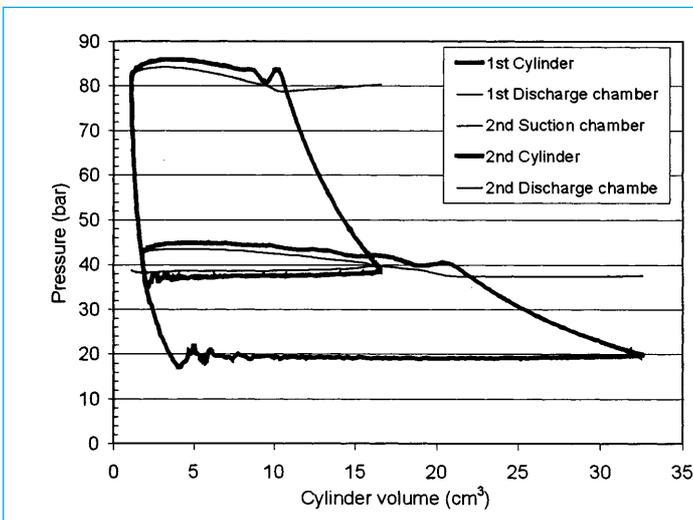


Bild 3 p-V-Diagramm für zweistufige Verdichtung von CO₂ zwischen 20 und 80 bar (links) und 12 und 80 bar (rechts) im Prototypverdichter CD 4.027 D

Die Druckverluste in den Ventilen sind auf einem akzeptablen Niveau, sichtbar am geringen Unterschied zwischen dem Zylinderdruck und dem Druck im Zylinderkopf. Die Druckschwankungen, man erkennt das besonders beim Druckverlauf in der Hochdruckkammer, führen zu inakzeptablen Verlusten.

Bei der Konstruktion des neuen Verdichters wurde das Volumen der Zylinderkopf- und Gehäusekammer vergrößert, was zu akzeptablen Druckschwankungen in den Kammern führte.

Eine neue Ventilplatte mit neuen Ventilen ist in Entwicklung, da die bisherige Lösung bei der Drehzahlsteigerung von 1450 U/min auf 2900 U/min eine Grenze darstellte. Es konnte erreicht werden, daß die Spaltgeschwindigkeit der Sauglamelle um 50 bis 70 %, beziehungsweise der Drucklamelle um 30 bis 60 % für die 1. und 2. Stufe im Vergleich zur alten Ausführung reduziert wurden. Die Spaltgeschwindigkeit ist als die Geschwindigkeit im engsten Spaltquerschnitt definiert. Dadurch wurde es mit dem Verdichter möglich, einen großen Anwendungsbereich, sowie unterschiedliche Betriebsbedingungen und Systemkonfigurationen zu beherrschen.

Das Effektivitätsniveau der Vorserienverdichter ist nun akzeptabel, aber es bleibt immer noch Raum für Verbesserungen. Eine detaillierte Analyse zeigt die Möglichkeit, sehr effektive CO₂-Verdichter im erforderlichen Druckbereich zu schaffen. Es sollte gelingen, viel von diesem Potential zur Verlustreduzierung durch planmäßige Arbeit zu nutzen.

Verdichter für Kaskadensysteme

Wir bereiten die Einführung von CO₂-Verdichtern für die Druckbereiche von Kaskadensystemen vor. Das könnte zukünftig eine Anwendung für große Systeme sein, bei denen gegenwärtig Ammoniak verwendet wird. Die bekannten Einsatzfälle weisen im Vergleich mit Ammoniak eine bis zu zehnfach höhere spezifische Leistung auf.

Weitere Möglichkeiten für CO₂

Auf der Basis des traditionellen „theoretisch idealen Zyklus“ ergibt sich für den CO₂-Prozeß im Vergleich zu den anderen Kältemitteln eine sehr schlechte Energieeffektivität. Trotzdem bestehen für praktisch realisierte Systeme im Unterschied dazu doch konkurrenzfähige Anwendungen.

Der Streit um das beste Kältemittel ist falsch in sich selbst. Theoretisch kann man mit einigen Kältemitteln die maximale Energieeffektivität erreichen, wenn man das System an das Kältemittel und dessen Anwendung anpaßt. In der Praxis begrenzen jedoch ökonomische Zwänge diese Möglichkeiten.

Für CO₂ mit seinen deutlichen Unterschieden zu den konventionellen Kältemitteln gilt das besonders. Es ist wichtig, das System an dieses besondere Kältemittel anzupassen und auch die Unterschiede in die theoretischen Vergleichsbetrachtungen einzubeziehen.

Gewöhnlich macht man bei solchen Vergleichen ganz einfache Fehler:

Man vergleicht die Gaskühlerendtemperatur des CO₂-Systems mit der Verflüssigungstemperatur normaler Kältemittel:

- Die Wärmeübertragung wird berechnet nach $Q = \int k \cdot \Delta t \cdot dA$.
- Beim Vergleich der Wärmeübertragung bei gleichen Wärmeübertragerflächen und k-Werten ergibt sich für CO₂ eine viel kleinere Temperaturdifferenz, was für den COP-Wert große Bedeutung hat. Das wurde auch experimentell nachgewiesen.
- Unterbewertung des isentropen Gütegrades des Verdichters: Wegen der Verdichtung in der Nähe des kritischen Punktes, was niedriges Druckverhältnis und geringere Druckverluste in den Ventilen einschließt – das kann theoretisch gezeigt werden – kann man einen höheren isentropen Gütegrad erreichen. Ein Vergleich ist hier nicht erfolgt, aber bei unseren Klimakompressoren z. B. ist dieser Wert 10- bis 15%-Punkte höher.
- Nichtberücksichtigung der speziellen Charakteristik des Kältemittels beim Entwurf des Systems. Hier nur zwei Beispiele, um die einzigartigen Möglichkeiten des CO₂ zu illustrieren: Die Gleittemperatur im Gaskühler kann bei günstiger Gegenstromgestaltung des Kühlers hervorragend für die Abwärmekopplung bei hoher Temperatur genutzt werden.
- CO₂ ist in manchen Anwendungen mit direkter Kühlung eine Alternative zu indirekten Systemen, wenn diese wegen der Brennbarkeit, Giftigkeit oder Kontamination durch das Kältemittel gewählt werden müssen.

- Voraussetzung gleich effektiver Wärmeübertrager: Die Wärmeübertrager sind meist viel effektiver bei CO₂, sowohl im überkritischen Bereiche als auch im Zweiphasenbereich. Die Anwendungsmöglichkeit geringerer Rohrdurchmesser führt zu einer größeren luftseitigen Wärmeübertragerfläche bei Luftkühlern, bei denen diese Seite oft eine Begrenzung in bezug auf den Widerstand darstellt. Damit kommt man zu geringeren luftseitigen Druckverlusten und im Verdampfer führt das auch zu geringeren Temperaturdifferenzen.
- Der Vergleich wird oft nur für die Auslegungstemperaturbedingungen geführt: Für Kälte- und Klimaanlageanwendungen hat man dabei oft sehr hohe Umgebungstemperaturen, wobei das CO₂ im Vergleich sehr schlecht abschneidet.

Bei der Betrachtung des Jahrestemperaturganges in bezug auf die jahreszeitliche Effektivität verliert dieser Punkt oft seine Bedeutung, solange die erforderliche Leistung erbracht wird.

Ein großer Vorteil von CO₂ ist die weltweite Verfügbarkeit als ein Nebenprodukt verschiedener industrieller Prozesse. Das ist z. B. die Verwendung zur Karbonisierung von Getränken, und in dieser Weise kann es auch als Kältemittel verwendet werden. Das Global Warming Potential von eventuellen Emissionen ist gleich null. In Anwendungen mit hohen Leckraten, wie z. B. mobilen Klimaanlage, Gewerbekühlanlagen und Schiffsanwendungen kann dies bei der Abschätzung des TEWI-Wertes eine bedeutende Rolle spielen. In mobilen Klimaanlage ist der Anteil des Kältemittels bei 30 % und mehr, abhängig von der Klimazone, in der das Kraftfahrzeug betrieben wird. Gleiche oder bessere Effektivität ist natürlich immer das Ziel bei der Konstruktion neuer alternativer Systeme.

In nicht wenigen Anwendungen mit einstufiger Verdichtung haben CO₂-Systeme ihre Wettbewerbsfähigkeit zu modernen Systemen mit anderen Kältemitteln gezeigt. In einigen Anwendungen wird die zweistufige Verdichtung durch die Zwänge der Einsatzbedingungen bevorzugt werden, z. B. zur Reduzierung der Verdichtungsendtemperatur oder um eine höhere Effizienz zu erreichen. Im Unterabschnitt „Ergebnisse und Diskussion“ wurde dargestellt, daß ein großer Gewinn an Effektivität bei Tieftemperaturanwendungen mit äußerer Zwischenkühlung erreicht wird.

Man mag zwar einwenden, daß dazu ein besonderer Zwischenkühler erforderlich ist, aber die geringe zusätzliche Wärmeübertragerfläche führt durch die Wärmeabfuhr beim Zwischendruck sogar zu einem höheren COP-Gewinn als wenn man diese beim Hochdruck anordnet. Durch die Gestaltung des Kühlers als ein integraler Bestandteil eines auch als Gaskühler arbeitenden Wärmeübertragers wird die Gesamtfläche kleiner als bei der Abfuhr der gesamten Wärme im Hochdruckgaskühler.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Effektivität des Prozesses besteht in der Unterkühlung des Hochdruckgases bzw. der Flüssigkeit vor dem Drosseln durch Anwendung eines Zwischendruckwärmeübertragers, s. Bild 4 nach Lorentzen (1993).

Anwendungen

Entsprechend der Haupteigenschaften ergeben sich folgende mögliche Anwendungen für die CO₂-Verdichter:

Gewerbekühlung (Supermärkte)

Dieser Einsatzbereich stellt gegenwärtig ein bedeutendes Anwendungspotential für CO₂ dar. Verschiedene große OEM-Kunden testen CO₂-Systeme und einige Anlagen befinden sich in der Felderprobung. Die reduzierten Abmessungen des Verdichters, seine geräuscharme Arbeitsweise und die Möglichkeit, mit einer sehr geringen Menge flüssigen Kältemittels auszukommen (kleine Rohrleitungsdurchmesser), gewährleisten die Flexibilität der Verkaufsfläche viel besser als die anderen Kältemittel.

Kühlmöbel

In diesem Markt ist der Sicherheitsaspekt sehr bedeutend als direkte Wirkung auf den Endbenutzer und Verbraucher der gelagerten Waren.

Aus diesem Grunde überprüfen große weltweit arbeitende Unternehmen wie z. B. Coca-Cola und Unilever die Möglichkeiten der Nutzung von CO₂ als Kältemittel. Die Erfahrungen mit Kohlenwasserstoffen sind nicht voll befriedigend.

Ein anderer wichtiger Aspekt zu Gunsten von CO₂ sind seine niedrigen Kosten und seine weltweite Verfügbarkeit.

Industrielle Kühlung

In diesem Einsatzfall ist CO₂ sehr interessant als Ersatz von NH₃ in den Niederdruckstufen von Kaskadenkälteanlagen. Das erlaubt den Ersatz großer Mengen von NH₃ durch geringe Mengen von CO₂ und den Ersatz von großen (und teuren) Industrieverdichtern durch Verdichter des Gewerbekühlbereiches.

Wärmepumpen

Dank der Möglichkeit, die Verflüssigungswärme auf einem hohen Temperaturniveau zu nutzen, stellt die Kombi-Wärmepumpe (Heizung und Warmwasserbereitung) eine der interessantesten Anwendungen dar. Verschiedene Firmen in Europa, USA und Japan (Frostmann, Denso, Thermoking) entwickeln Wasserwärmepumpen mit CO₂ als Kältemittel.

Der Gesamt-COP-Wert erreicht hohe Werte im Vergleich zu den konventionellen Anlagen.

In Japan liefert Denso die ersten CO₂-Wasserwärmepumpen für Wohnhäuser.

Kühltransport

Anwendungen mit verhältnismäßig großen Kältemittlemissionen, wie es beim Kühltransport und der Fahrzeugklimatisierung sowie bei Schiffsanlagen der Fall ist, sind offensichtlich sehr interessante Fälle für den Einsatz von CO₂ im Vergleich mit den bisher verwendeten HFKWs.

Andere natürliche Kältemittel haben in diesen Fällen oft Akzeptanzprobleme ohne Realisierung besonderer Vorsichtsmaßnahmen gegen deren Brennbarkeit und Giftigkeit bzw. sie haben eine geringe Energieeffektivität.

Gegenwärtig sind wir einbezogen in drei unterschiedliche Projekte für Containerkühlanlagen. Die Ergebnisse zeigen, daß mit CO₂ die gleichen Effektivitätswerte wie mit den HFKWs erreichbar sind.

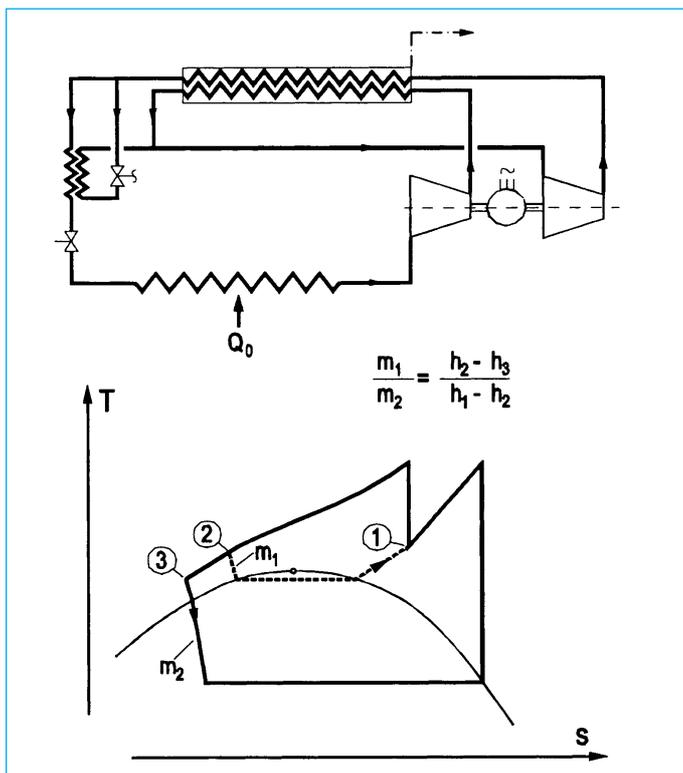


Bild 4 Zweistufige Verdichtung mit Drosselung auf dem Zwischendruck

Zum Beispiel können bei der Verdampfungstemperatur von -35 °C und einer Umgebungstemperatur von 30 °C der COP-Wert um 30 % und die volumetrische Effektivität um bis zu 40 % verbessert werden. Durch Veränderung des Zwischendruck-Massestromes kann die Leistung mit nur geringen COP-Verlusten geregelt werden.

Eine andere Möglichkeit zur COP-Verbesserung ergibt sich durch die Nutzung der Entspannungsenergie. Verschiedene Entwicklungen dazu sind in Arbeit. Einige sind beschrieben von Driver u. a. (1999), Heyl u. a. (2000) und Heidelck u. a. (2000).

Ein anderer herausragender Aspekt ist die Sicherheit für Mensch und Umwelt, was durch die Handelsketten als ein Werbeeffekt benutzt werden kann.

Unternehmen wie z. B. Costan erkannten schon vor Jahren das CO₂ als eine Langzeitlösung.



Bild 5 2stufiger CO₂-Verdichter auf dem Prüfstand. Die erste Stufe arbeitet bei 67 bar, die zweite Stufe bei 112 bar

Andere spezifische Anwendungen sind die Trucks mit eutektischen Platten. Wir sind in zwei unterschiedliche Projekte für diese Tieftemperaturanwendung einbezogen.

Für die Anwendung von CO₂ als Kältemittel in mobilen Klimaanlage ist die Entscheidung der FFSS/DB/SNCF bedeutend, die Konstruktion und Prototypentwicklung für einige Bahnanwendungen zu unterstützen.

Zusammenfassung

CO₂ kann als alternatives Kältemittel für die meisten Anwendungen betrachtet werden, denn es ist nicht brennbar, nicht toxisch und bezüglich der Emissionen in die Atmosphäre ist es nicht gefährlich. Bedeutend ist sein niedriger Preis und die weltweite gute Verfügbarkeit.

In verschiedenen Anwendungen ergibt sich eine bessere Energieeffektivität im Vergleich zu anderen alternativen Kältemitteln. Es wurde gezeigt, daß bei Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des CO₂ und bei richtiger Ausnutzung

seines thermodynamischen Verhaltens die Systemgestaltung auch in den Fällen zum Erfolg führen kann, in denen eine einfache theoretische Berechnung zu Gunsten anderer Alternativen ausfallen würde.

CO₂ erfordert einen höheren mittleren Arbeitsdruck als andere Alternativkältemittel. Das ist verbunden mit dem Vorteil der 5–10fachen volumetrischen Kälteleistung, was zu kleineren Strömungsquerschnitten führt. Deshalb können kleinere Komponenten und Rohrleitungsabmessungen verwendet werden. Oft führt das zu Anlagen mit geringerem Gewicht, geringerem Bauvolumen und in einigen Anwendungen auch zu reduzierten Systemkosten.

Die Anwendung von CO₂ wurde in einigen Anwendungen schon handelsüblich und darüber hinaus existieren weitere Pilot- und Demonstrationssysteme. All die weltweit in Arbeit befindlichen Projekte und die bisher erzielten Ergebnisse zeigen eine gute Perspektive für die Anwendung von CO₂ als Kältemittel der Zukunft. □