

Mehr als 5 Jahre Bitzer Octagon®-Verdichter

Wolfgang Sandkötter, Rottenburg

Im Jahre 1998 wurde mit der Markteinführung der Octagon®-Verdichter begonnen, von denen mittlerweile mehr als 300 000 Stück produziert wurden. Mit Einführung der kleinen 4-Zylinder in der C3-Baureihe ab dem Jahr 2000 begann die effektive Serienproduktion. Grund genug, einmal zurückzuschauen und ein technisches Resümee zu ziehen.

Entwickelt wurden die neuen Verdichter im Werk Schkeuditz der Bitzer Kühlmachineschinenbau GmbH, wo sie auch zunächst ausschließlich produziert wurden. Im Gegensatz zu Scrollverdichtern, die ursprünglich für die Klimaanlage entwickelt wurden und nachher mit allerlei Kunstgriffen auch für die Anwendung in Normal- und Tiefkühlung angepasst werden sollten, sind die Octagon®-Hubkolbenverdichter von vornherein für die typische Kälteanwendung entwickelt. Dass sie dabei auch die technische Eignung für Klima- und Wärmepumpensysteme mitbringen, ist natürliche Folge des breitbandigen Einsatzbereichs dieser Verdichterkonstruktion. Warum das so ist? Schauen wir ein wenig hinter die Kulissen.

Hintergrund

Mit Einführung der chlorfreien Kältemittel Anfang der 90er Jahre änderten sich die Anforderungen an die Verdichter. Dort, wo mit R22 und seinen recht günstigen Dampfdichten und Drucklagen ein zufriedenstellender Verdichterbetrieb möglich war, führte die gleiche Technik beim Einsatz von R404A plötzlich zu einer erhöhten Fehlerrate. Es kam häufig zu Schwingungsproblemen, erhöhtem Geräuschniveau und dadurch bedingten Anlagenstörungen. Nun hätte sich das Haus Bitzer

ja mit den schnell gefundenen Abhilfen begnügen können: diese lagen in einem mechanisch verbesserten Einbau der Verdichter sowie in der Einführung eines in die Zylinderköpfe integrierten Pulsationsdämpfers, womit die akuten Probleme sicher gelöst wurden. Schon damals wurde schnell erkannt, dass sich hier die Chance einer Neuentwicklung ergab, die mehrere Zielsetzungen zusätzlich umfassen konnte, wie z. B.:

- Verringerung der Baugröße
- Verringerung des Gewichtes
- Verbesserung der Laufruhe
- robustere Gehäusegestaltung mit besserer Druckfestigkeit
- Verbesserung des Wirkungsgrades
- Senkung der Herstellkosten
- Minimierung der Lebenszyklus-Kosten und damit der Umweltbeeinträchtigung durch:
 - Verwendung möglichst einfacher Materialien
 - Beachtung der Recycling-Fähigkeit
 - Höchste Zuverlässigkeit im Kundeneinsatz
 - beste, gleich bleibende Wirkungsgrade auch nach langen Betriebszeiten
 - optimale Anpassung an verschiedene Betriebszustände
 - minimal mögliche thermische und mechanische Einflüsse (z. B. Schwingungen) auf die Anlage – damit minimale Störungsrisiken

Octagon Baureihen

Es wurde schnell klar, dass sich die Anforderungen in der Kältetechnik mit Druckverhältnissen zwischen etwa 5 und 15 (Normal- und Tiefkühlbereich) am besten auf Basis des bewährten Hubkolbenprinzips mit seinen Druck gesteuerten Arbeitsventilen realisieren ließ. Daher wurden auf dieser Basis die Octagon®-Baureihen C1 bis C4 entwickelt (Bild 1). Allen gemeinsam sind folgende bestimmenden Parameter:

- Einteiliges, druckfestes Gehäuse ohne Bodenplatte

zum Autor

**Dipl.-Ing.
Wolfgang
Sandkötter,**
Technischer Leiter
Bitzer Kühl-
maschinenbau,
Werk Rottenburg



- Triebwerke mit kurzen Hübten und Exzenterwelle
- einfache und robuste (überlastbare) Ventilauslegung mit Lamellenventilen – bei gleichzeitiger Optimierung für hohe Liefer- und Gütegrade sowie einen großen Drehzahlbereich
- 4-Zylinderbauart bereits ab Baureihe C3 mit 18m³/h Hubvolumen (verbesserte Laufruhe)
- Leistungsregelung bei den 4-Zylinderverdichtern
- breitbandige Drehzahlregelbarkeit für Betrieb mit Frequenzumrichter
- Neuentwickeltes Zentrifugalschmiersystem [1]
- Pulsationsdämpfer in die Zylinderköpfe eingegossen (Bild 2)
- Direktantrieb durch integrierten, 4-poligen Motor mit robuster Auslegung, hohem Wirkungsgrad und PTC-Überwachung

Mit diesen Parametern ergeben sich hervorragende Eigenschaften für die Basisanwendung und interessante Weiterentwicklungsmöglichkeiten, die mittlerweile sowohl die betriebssichere Anwendung in unterkritischen CO₂-Kaskaden umfassen wie inzwischen auch eine erste Ausführung von Verdichtern für transkritischen Einsatz mit zulässigen Betriebsdrücken

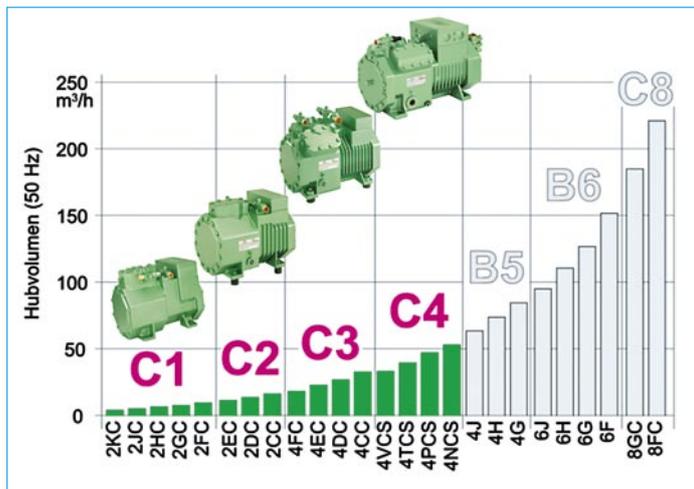


Bild 1
Übersicht der
halbhermetischen
Hubkolben-
Verdichterbaureihen

haben oft 2,5 oder 3 „Windungen“, was dazu führt, dass mehrere Verdichtungs Vorgänge entsprechend langsam parallel ausgeführt werden. Dies trägt zur Vergleichmäßigung des Drehmoments bei, verändert jedoch nicht die Anzahl der Fördervorgänge pro Zeit. Die Grundfrequenz der Druckgas pulsation ergibt sich also direkt aus der Antriebsfrequenz; der Verdichter ist vom Druckgasausstoß her quasi ein „Einzylinder“.

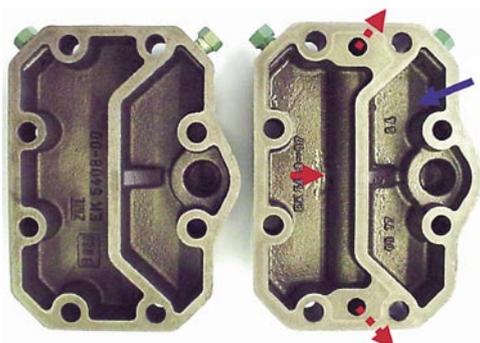


Bild 2 Konventioneller Zylinderkopf im Vergleich zum patentierten Zylinderkopf mit integriertem Muffler (Bitzer-Standard)

von 120 bar und höher (Bild 3). Auch diese konnten auf Basis des Octagon®-Konzepts ausgeführt werden; ein weiterer Beweis für dessen universelle Stärke. Doch wenden wir uns zunächst wieder dem üblichen Einsatz mit HFKW-Kältemitteln zu und schauen uns dort einige Grundeigenschaften im Vergleich zu Scroll-Kälteverdichtern an.

Charakteristische Merkmale

Verdichtungsvorgang

Hubkolbenverdichter

Dieser ist ganz einfach: Jeder Zylinder saugt pro Umdrehung einmal an und stößt auch das Druckgas einmal aus, so dass sich die Grundfrequenz der Förderung aus Zylinderzahl mal Drehzahl ergibt.

Verdichtungsvorgang

Scrollverdichter

Man kann den Scroll mit beliebig vielen Spiralumdrehungen ausführen: Er saugt pro Umdrehung einmal an und stößt das Druckgas auch nur einmal pro Umdrehung aus, was sein Betriebs- und Geräuschverhalten charakterisiert. Übliche Spiralen

Bild 3
Octagon®-Verdichter
für Tiefkühlkaskaden-
Kreisläufe mit CO₂

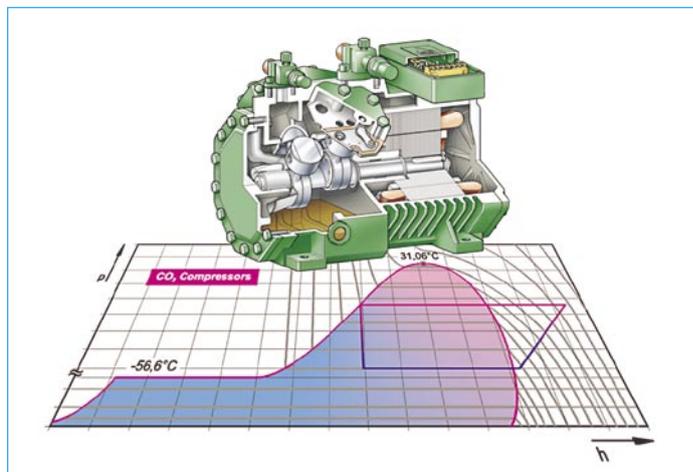


Bild 4
Liefergradverläufe
von Scroll- und
Octagon®-Verdichtern,
basierend auf
dokumentierten
Leistungsdaten

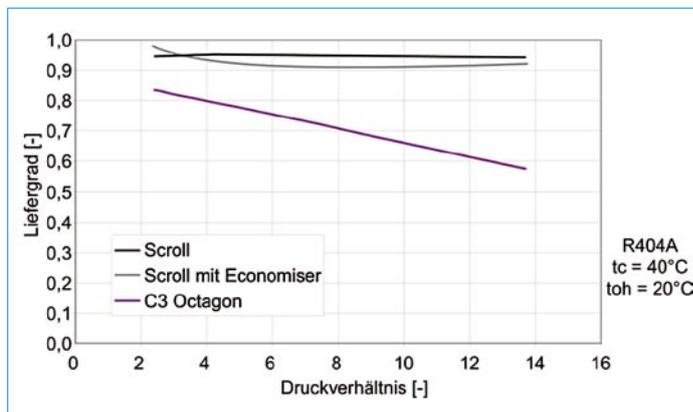
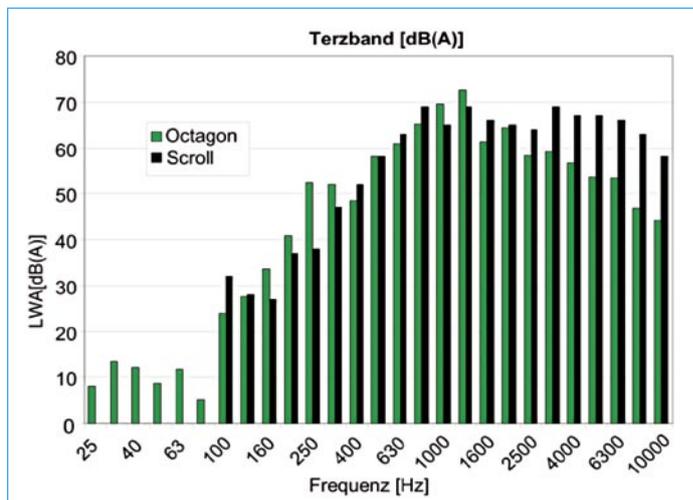


Bild 5
Vergleich der
Schallemissionen
von Scroll- und
Octagon®-Verdichtern



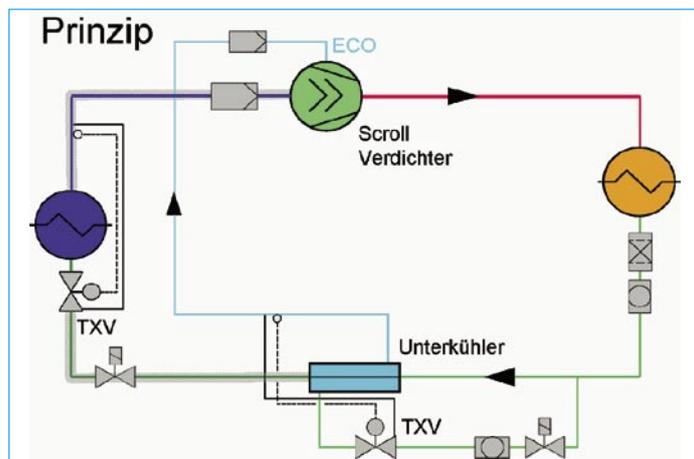


Bild 6
Das Kreislaufprinzip
eines Scrollverdichters
mit Economiser

„eingebauten Volumenverhältnis“ ideal. Bei hiervon abweichenden Betriebsbedingungen (Druckverhältnis) ist der Arbeitsprozess von Über- oder Unterverdichtung gekennzeichnet.

Erreichbare innere Verdichtungsverhältnisse

Bei einstufigen Hubkolbenverdichtern werden bei üblicher Bauweise Grenzdruckverhältnisse von etwa 40 erreicht, dabei wird der durchgesetzte Massenstrom dann zu Null.

Bei Scrollverdichtern werden üblicherweise innere Druckverhältnisse von etwa 3,5 erreicht. Bei konstruktiver Auslegung auf höhere Druckverhältnisse werden die verfügbaren Auslassquerschnitte immer kleiner, führen dadurch zu entsprechenden Druckverlusten und je nach Betriebsbedingungen auch zu innerer Überkompression. Wird ein Scrollverdichter bei einem höheren als dem inneren Druckverhältnis betrieben (Beispiel: Tiefkühleinsatz), so spricht man von „Unterverdichtung“. Die restliche

Steuerung des Ladungswechsels

Alle mechanischen Verdrängerverdichter verdichten das Gas, indem sie das eingeschlossene Gasvolumen verkleinern. Beim Hubkolbenverdichter geschieht dies durch den auf und ab gehenden Kolben, wobei der Ladungswechsel durch Druck gesteuerte Ventile erfolgt, so dass sich der innere

Verdichtungsprozess verschiedenen Arbeitsdrücken anpassen kann.

Beim Scrollverdichter geschieht dies durch die zirkulare Verkleinerung des spiralförmigen Verdichtungsraums, wobei der Ladungswechsel durch eine vorgegebene Drucköffnung gesteuert wird. Der Verdichtungsprozess ist daher nur beim sog.

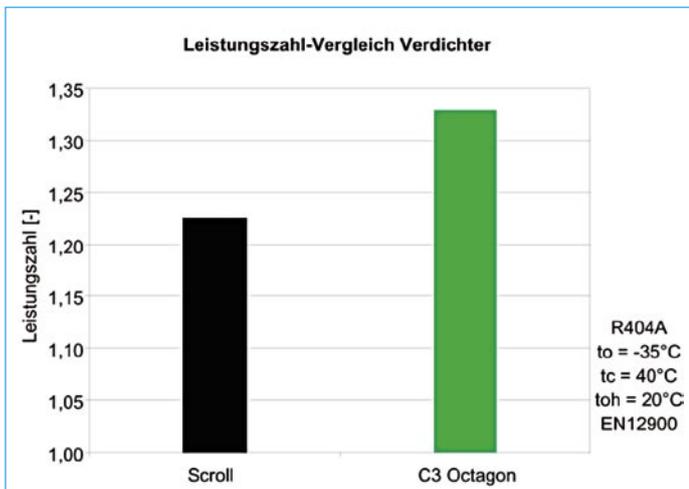


Bild 7 Vergleich der Leistungszahlen eines Scroll- und Octagon®-Verdichters

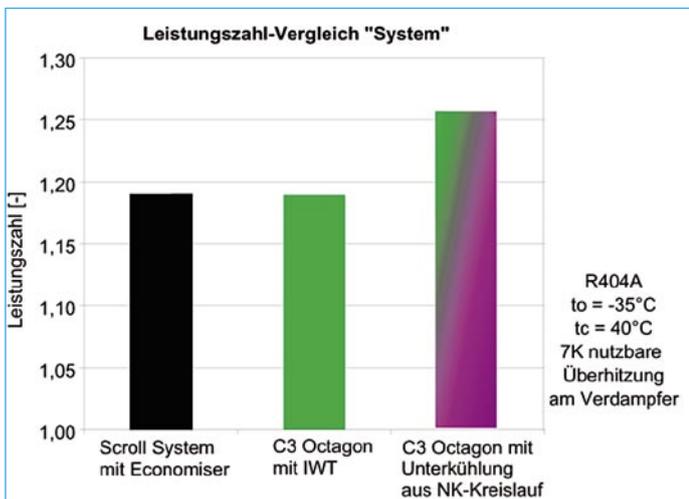


Bild 8 Vergleich der Leistungszahlen eines Scrollsystems mit klassischen Octagon®-Systemen

Verdichtung, die nicht bei abgeschlossenem Verdichtungsraum stattfindet, erfolgt energetisch ungünstig als Gleichraumverdichtung (isochor). Durch modifizierte Spirargeometrie und Einsatz eines Arbeitsventils im Auslassbereich lassen sich die Verluste zwar reduzieren, der prinzip bedingte Wirkungsgradabfall ist aber dennoch stark ausgeprägt. Das Auslassventil kann die innere Rückströmung in der Spirale beim hochdruckseitigen Öffnen gegen die Mitteldruckkammer nicht verhindern.

Liefergrad über dem Druckverhältnis

Betrachtet man die Liefergrade über dem Druckverhältnis (Bild 4), so erkennt man den flachen Verlauf des Scrollverdichters gegenüber dem steiler abfallenden Liefergrad des Hubkolbenverdichters, der insgesamt auch auf niedrigerem Niveau liegt. Der in diesem Bild gezeigte Liefergradverlauf des Scrollverdichters – aus Wettbewerbsdokumentation rückgerechnet – ist übrigens nicht charakteristisch: Ein Anstieg des Liefergrades mit zunehmendem Druckverhältnis ist bei Verdrängerverdichtern nicht möglich. Ein 2-stufiger Kolbenverdichter hätte einen ähnlich flachen Verlauf wie der Scrollverdichter. Beim Hubkolbenverdichter ergibt sich jedoch ein Großteil des Liefergradverlustes aus der Rückexpan-

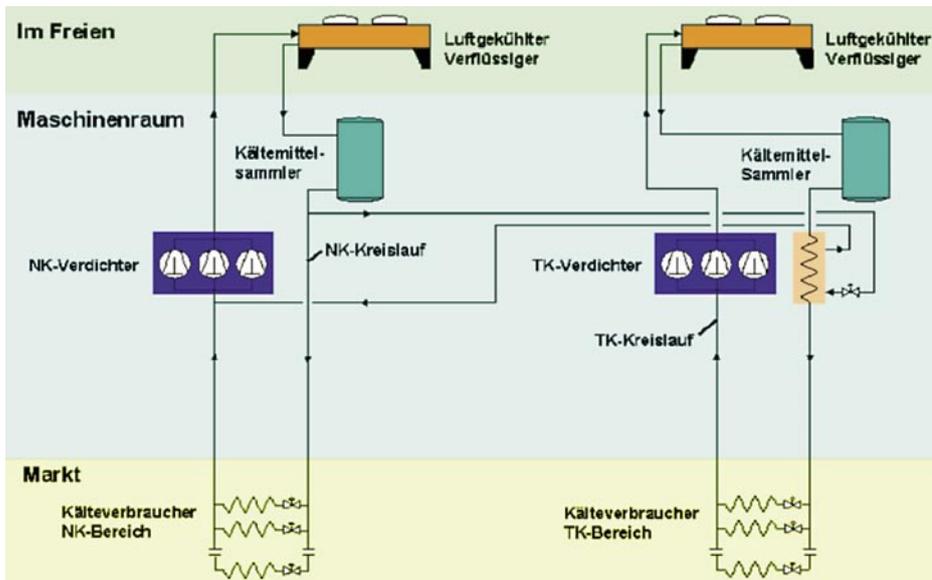


Bild 9 Das Kreislaufprinzip in einer typischen Supermarktanwendung

sion des nicht ausgeschobenen Restgases im Zylinder. Allerdings leistet dieses Restgas bei abwärts gehendem Kolben nützliche Arbeit an der Exzenter- bzw. Kurbelwelle (und kühlt sich dabei ab), so dass dieses sich kaum schädlich auf Gütegrad und Leistungszahl auswirkt.

Vergleich Octagon® mit Scrollverdichtern für Kälteanwendungen

Geräusche und Schwingungen

Es zeigt sich, dass der „Einzylinder“ Scroll bei hohen Druckverhältnissen, also speziell in Kälteanwendungen, oft erhöhte Betriebsgeräusche und Schwingungen aufweist. Moderne Hubkolbenverdichter laufen erheblich ruhiger. In Bild 5 ist der Schall-Leistungspegel zweier aktueller Verdichter gleicher Kälteleistung verglichen: Hier zeigt sich, dass

der Octagon®-Verdichter deutlich leiser ist. Der Pegelunterschied entspricht annähernd einer Verdoppelung des Geräusches.

Kosten / Aufwand

Scrolls werden mit dem Argument geringerer Kosten angeboten. In einfachen Klimaanwendungen, bei denen die Verdichter ohne Zubehör wie Kältemitteleinspritzung oder Economiser-Unter Kühlung eingesetzt werden können, mag dies zutreffen. In einer Tiefkühlanlage, wo Scrolls dem Betrieb ohne Zusatzkühlung aufgrund ihrer Prinzip bedingten höheren thermischen Belastung (s. o. Verdichtungsprozess) nicht gewachsen sind, ergibt sich ein erheblicher Installationsaufwand (Bild 6).

Hier müssen die relativ kleinen Verdichter mit Flüssigkeitseinspritzung und/oder Unterkühlungskreisläufen versehen wer-

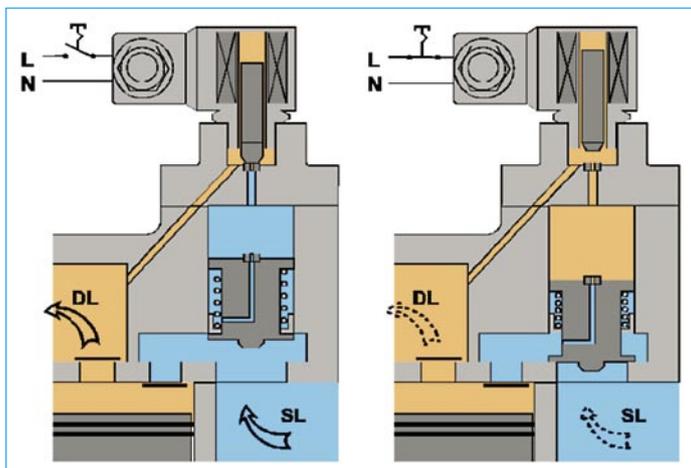


Bild 10 Leistungsregelung durch Zylinderkopfabstimmung bei Bitzer-Kolbenverdichtern

den, um die Verdichter thermisch zu entlasten bzw. die unzureichende Leistungszahl anzuheben. Die erforderlichen Komponenten, wie Flüssigkeitsunterkühler, Expansions- und Magnetventil, Verrohrung, Isolierung von Unterkühler und Flüssigkeitsleitung, Elektrik stellen eine kosten- und fehlerträchtigen Zusatzaufwand dar.

Energieeffizienz / Leistungszahl

Vergleicht man z.B. die Dokumentation eines C3 Octagon®-Verdichters mit einem etwa leistungsgleichen Scroll, dann zeigt sich bei Referenzbedingungen ohne Flüssigkeitsunterkühlung ($-35/40/t_{oh} = 20^\circ\text{C}/\text{R404A}$) entsprechend EN12900 eine deutliche Überlegenheit des Octagon®-Verdichters (Bild 7).

Im Falle realer Anlagen stellen sich bekanntlich andere Überhitzungs- und Unterkühlungsbedingungen ein, die je nach Systemkonfiguration sehr unterschiedlich sein können. Bei klassischer Betriebsweise von Octagon®-Verdichtern mit reichlich dimensioniertem inneren Wärmeaustauscher (IWT) direkt beim Verdampfer (bzw. den Verdampfern) lässt sich die Sauggasüberhitzung nutzbringend auf die Flüssigkeitsunterkühlung übertragen [3]. Damit sind trotz unvermeidbarer Systemverluste sowohl die nutzbare Kälteleistung am Verdampfer als auch die Leistungszahl nur unwesentlich geringer als bei o. g. Referenzbedingungen (Bild 8).

Scrollverdichtern werden inzwischen ebenfalls mit Economiser (Dampfeinspritzung) angeboten, um die zuvor beschriebenen thermischen und energetischen Nachteile auszugleichen. Im praktischen Einsatz ist aber bei diesem Konzept der effiziente Einsatz eines zusätzlichen IWT zwischen Sauggas und kalter Flüssigkeit (nach dem Unterkühler) nahezu nutzlos. Darüber hinaus wird die Flüssigkeitstemperatur (nach dem Unterkühler) trotz Isolierung der Leitung auf dem Weg zum Verdampfer durch Wärmeintrag ansteigen und dadurch zu einer weiteren Leistungs- und Effizienzminde rung führen. Deshalb wird der Scroll in einer realen Kälteanlage trotz des komplexen Systemaufbaus mit Economiser bestenfalls die Leistungszahl des Octagon®-Verdichters bei einfachster Systemtechnik erreichen (Bild 8).

Octagon®-Verdichter bieten noch weiteres Potenzial für eine Effizienzsteigerung. So lässt sich z.B. in Supermarktsystemen auch eine Lösung mit zusätzlichem Economiser (Bild 9) durch einen zentralen Flüssigkeitsunterkühler realisie-

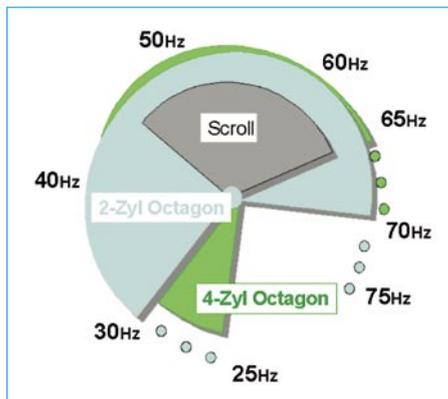


Bild 11 Übersicht der möglichen Drehzahlbereiche von Kolbenverdichtern im Vergleich zum Scroll

ren. Diese Ausführung ist heute weitgehend Stand der Technik. In dieser Anwendung kommt dann der energetische Vorteil des Octagon®-Verdichters in gleicher Relation zum Tragen wie beim Vergleich unter den eingangs erwähnten Referenzbedingungen.

Leistungsregelung

Hier bieten die Octagon®-Hubkolbenverdichter bereits ab $18 \text{ m}^3/\text{h}$ Hubvolumen die bewährte und energetisch günstige Zylinderabschaltung, z. B. auf 50 % beim 4-Zylinder (Bild 10). Scrollverdichter für Kälteanwendungen haben typischer Weise keine Leistungsregelung.

Drehzahlbereich

Moderne kurzhubige Hubkolbenverdichter sind ohne weiteres in einem breiten Band drehzahlregelbar (Bild 11).

Scrollverdichter sind in der klassischen Bauform nur eingeschränkt mit Drehzahlregelung einsetzbar, da sich die Radialkräfte an den Spiralwänden mit dem Quadrat der Drehzahl verändern. Bei geringeren als der Nenndrehzahl drohen so interne Leckagen, bei höheren dagegen Spiralbrüche.

Anwendungsbereiche

Beim Vergleich der dokumentierten Anwendungsbereiche ist zu sehen, dass die Octagon®-Verdichter ohne Innen- und Zu-

satzkühlung deutlich niedriger in der Verdampfung betrieben werden können, was sich aus dem oben erwähnten thermodynamisch günstigeren Verdichtungsprozess mit den Druck gesteuerten Ventilen ergibt. Die Begrenzung in der maximalen Verflüssigungstemperatur ist durch die Motorzuordnung gegeben und entspricht den üblichen Markterfordernissen.

Zuverlässigkeit

Aufgrund der Prozess bedingt notwendigen Kühlung des Verdichtungsprozesses bei Scrollverdichtern und dem damit verbundenen höheren Einzelaufwand bei der Installation sind auch die Versagensrisiken höher zu bewerten als bei einem „simplen“ Hubkolbenverdichter. Dies gilt um so mehr, wenn die Verdichter bei tiefen Verdampfungstemperaturen eingesetzt werden. Irreführend ist hier die in der Werbung vorkommende Aussage, ein Scroll sei allein dadurch zuverlässiger, dass er weniger bewegte Teile habe. Dies würde über-

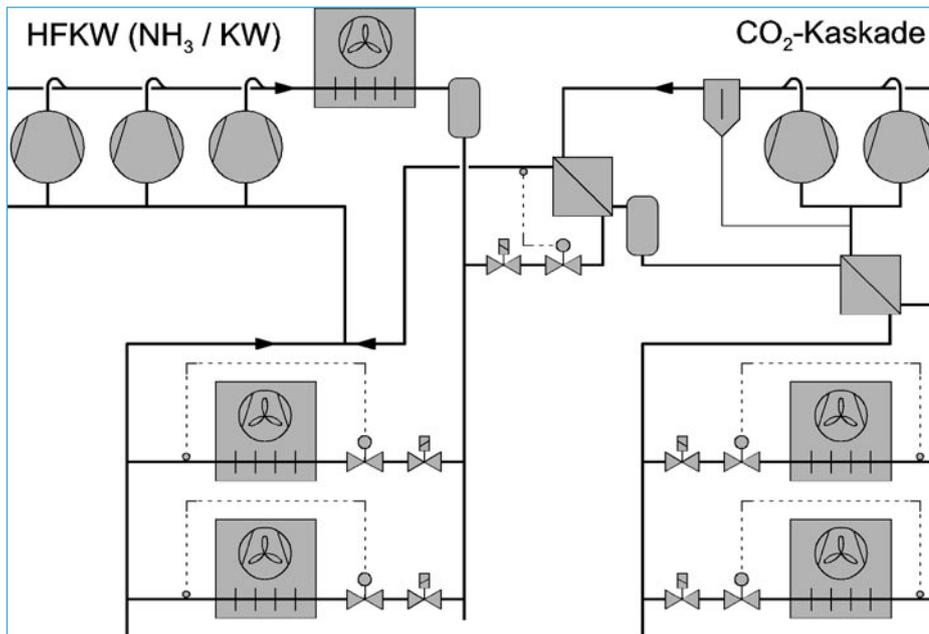


Bild 12 Konventionelle Kälteanlage kombiniert mit CO₂-Tiefkühlkaskade

tragen auf eine Hubkolbenmaschine bedeuten, dass ein Einzylinder zuverlässiger als ein Sechszylinder wäre. Hier ist wohl jeder Kommentar überflüssig.

Weitere Anwendungen

CO₂-Kaskaden

In Tiefkühlanwendungen lassen sich mit CO₂ als Kältemittel hervorragende Leistungsdaten erzielen, wenn das CO₂ unterkritisch auf der Verdampfungsseite des Normalkühlkreislaufs kondensiert werden kann (Bild 12).

Aufgrund ihrer guten Druckbelastbarkeit sind die Octagon®-Baureihen von Haus aus auch für Anwendungen bei höheren Betriebsdrücken prädestiniert. Bereits seit 1998 werden Verdichter in unterkritischen CO₂-Anwendungen als Kaskadenverdichter eingesetzt. Die dabei notwendigen Modifikationen betreffen den max. Betriebsdruck von 42 bar und das Lager- und Schmierungs-system des Verdichters, welches aufgrund der hohen Kältemittellöslichkeit der POE-Öle mit CO₂ hier besondere Anforderungen stellt.

Transkritische Anwendungen

Auch für transkritische Anwendungen des Kältemittels CO₂ ist das Octagon®-Konzept gut geeignet. In Supermarktanwendungen werden hierzu Betriebsdrücke bis 120 bar erforderlich. Die notwendigen Entwicklungsmaßnahmen am Verdichter

(Bild 3) betrafen hier Gehäuse-Konstruktion und -Material sowie eine Neuauslegung des Hubraums und Hub-Bohrungsverhältnisses entsprechend den Drucklagen und Druckverhältnissen von CO₂.

Zusammenfassung

Die seit 1998 auf den Markt gebrachten Octagon®-Verdichter haben sich besonders in Kälteanwendungen durch ihre solide Konstruktion, Laufruhe, Leistungsfähigkeit und kompakte Bauweise einen Namen gemacht. Nach Vorstellung der C3-Baureihe im Jahre 2000 mit bis dato erstmals im Bereich kleinerer Verdichter angewandter 4-Zylindertechnik und turbinenhafter Laufruhe bekam die Entwicklung eine erhebliche Eigendynamik.

Aus Massenerstellung von Scrollverdichtern für die Klimaanwendung abgeleitete Kältescrolls sind eine fragwürdige Lösung, die trotz eines relativ hohen Zusatzaufwands die Effizienz gängiger Systemausführungen mit Octagon®-Verdichtern nicht erreicht.

Unterm Strich bleiben deshalb neu entwickelte Hubkolbenverdichter, wie sie z. B. mit den Octagon®-Baureihen verfügbar sind, für Anwendungen in Kälteanlagen die sinnvollere Lösung. ■

Literaturhinweise und Referenzen

- [1] Bitzer Sonderausgabe und Veröffentlichung (09/2004): Ein verbessertes Zentrifugal-Schmier-system für Kältemittelverdichter
- [2] Linde Veröffentlichung (KK 2/2005): Erste CO₂-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung in einem Schweizer Hypermarkt
- [3] Info Tour 1 – Thema: Überhitzung – Unterkühlung