

# Einige Merkmale hochentwickelter Kolbenverdichter im Vergleich zu Schraube und Scroll \*

Wolfgang Sandkötter, Sindelfingen

Betrachtet man den Markt kleinerer Verdrängerverdichter in der Kälte- und Klimatechnik, so kann man in den Klimaanwendungen einen Trend zu rotierenden Verdichtern feststellen, während die Kälteanwendungen nach wie vor von Hubkolbenverdichtern dominiert werden. Die allgemein zunehmenden Anforderungen hinsichtlich Umweltverträglichkeit, einfacher Handhabung, Einsatz neuer Kältemittel und Energieeffizienz verschärfen dabei die Wettbewerbssituation.

\* Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 2000 des DKV am 24. November in Bremen

Am Beispiel einer neuen Baureihe halbhermetischer Kolbenverdichter wird gezeigt, wie mit einfachen Mitteln hochgesteckte Ziele aus den heutigen Marktanforderungen erreicht werden. Dabei ist es interessant festzustellen, welche Parameter durch Neu- und Weiterentwicklung beeinflussbar sind und welche prinzipbedingt fest sind. Einige prinzipbedingte Unterschiede zu den Bauarten Scroll- und Schraubenverdichter werden hinsichtlich ihrer Wirkung in den verschiedenen Anwendungsbereichen erläutert.

## Einleitung

Betrachtet man die Vielzahl neuer Verdichterkonstruktionen, stellt sich die Frage, ob die Zeit der Hubkolbenverdichter in der Kälte- und Klimaanwendung demnächst abgelaufen ist. Argumente wie „höhere Laufruhe“, „keine oszillierenden Massen“, „Kompaktheit“, „geringes Gewicht“, „einfache Installation“, „bessere Leistungszahl“ scheinen oft genug für rotierende Verdichter zu sprechen. Doch ist das wirklich so?

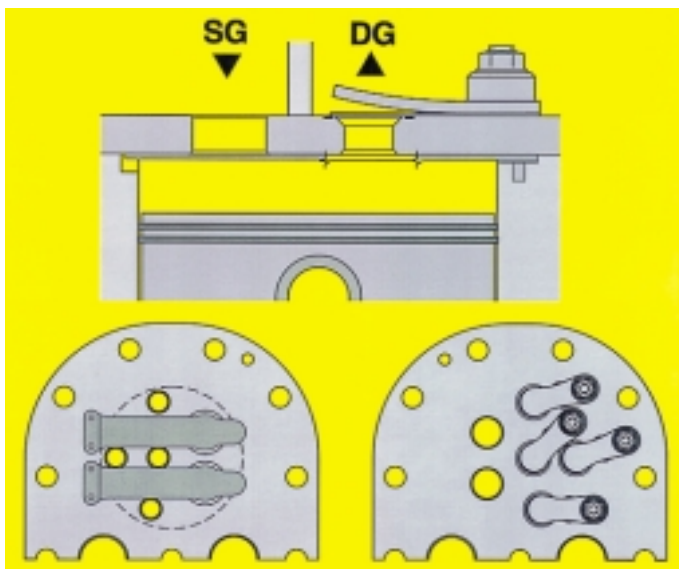


Bild 1 Ventilplatte und Verdichtungsraum (Kolbenverdichter)

## zum Autor

**Dipl.-Ing.  
Wolfgang  
Sandkötter,**  
Technischer  
Leiter und Pro-  
kurist bei Bitzer  
Kühlmaschinen-  
bau GmbH,  
Sindelfingen



Ich möchte mit dem folgenden Beitrag versuchen, einige charakteristische Grundeigenschaften der 3 Verdrängerprinzipien Hubkolben, Schraube und Scrollverdichter darzustellen und mit den veränderbaren Merkmalen zu vergleichen. Dabei markieren die Grundeigenschaften das Betriebsverhalten in einem Bereich, der durch Weiterentwicklung im Wesentlichen nicht beeinflussbar ist, während die veränderbaren Merkmale den Entwicklungsspielraum vorgeben.

Mit dieser Unterscheidung soll deutlich gemacht werden, in welchen Anwendungsbereichen Hubkolbenverdichter nach wie vor besser geeignet sind und durch Weiterentwicklung zu „der Lösung“ schlechthin gemacht werden können und in welchen Anwendungen rotierende Verdichter Vorteile bieten. An dieser Stelle möchte ich auch auf eine frühere Veröffentlichung hinweisen: die Anwendungsbereiche der 3 Verdichterprinzipien wurden in [1] dargestellt.

## Charakteristische Grundmerkmale

### Hubkolbenverdichter

Um die charakteristischen Merkmale der Verdrängermaschinen zu sehen, lade ich Sie ein, einmal einen Blick in die Verdich-

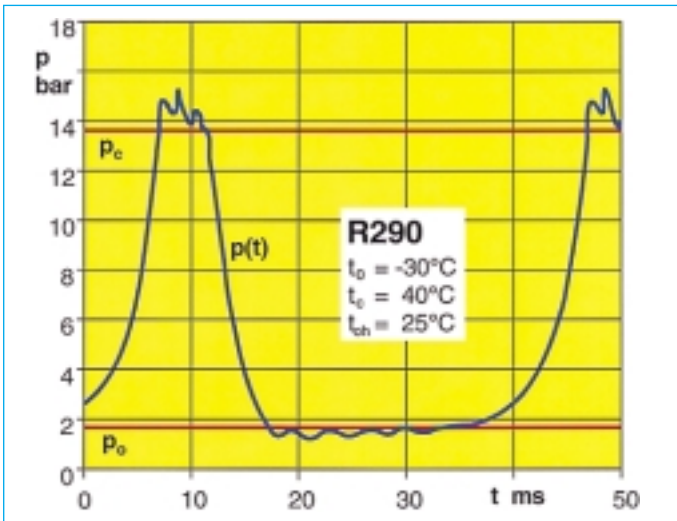


Bild 2  
Druckindizierung  
(Kolbenverdichter)

Trägt man den Druck über dem Hub des Verdichters auf, erhalten wir das bekannte Arbeitsdiagramm, Bild 3.

Was ist daran typisch? Nun, zu sehen sind 2 typische Vorgänge; einen bei einer Normalkühlanwendung und einen bei Tiefkühlung. Es wird klar deutlich, daß bei höherem Druckverhältnis der Liefergrad sinkt, und zwar hauptsächlich durch den zunehmenden Anteil der Rückexpansion. Da während dieser Rückexpansion aber Arbeit an die Kurbelwelle zurückgegeben wird (schraffierte Fläche), erfolgt eine thermische Entlastung (Abkühlung des Gases), und der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters sinkt nicht in gleicher Weise wie der Liefergrad. Diese Eigenheit ist typisch für Hubkolbenverdichter und nicht auf Schraube oder Scroll übertragbar.

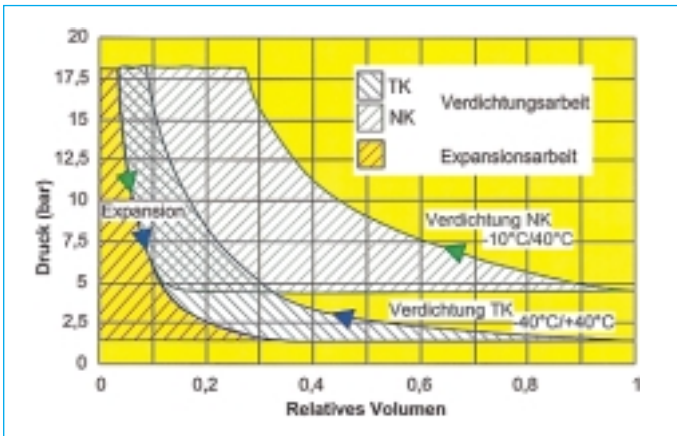


Bild 3 Indiziertes  
Arbeitsdiagramm  
(Kolbenverdichter)

Was bewirkt dies in der Praxis? Zunächst einmal führt dies zu dem bekannten und ungewollten Effekt, daß die Hubraumleistung bei Tiefkühlung überproportional abnimmt. Dies hat jedoch lediglich einen Einfluß auf das zu wählende Hubvolumen. Bei Anwendungen mit drehzahlvariablem Antrieb kann dieser Effekt auch beobachtet werden: Durch die höhere Drehzahl kommt es zu einer Erhöhung des Druckverhältnisses und damit zu einer Verringerung des Liefergrades. Bei Fahrzeug-Klimaverdichtern, die vom Verbrennungsmotor angetrieben werden, kann dieser Effekt sogar von Vorteil sein. Hier kommt es durch die mit zunehmender Drehzahl zunehmende Rückexpansion zu einer willkommenen Reduktion der Kälteleistung, Bild 4. Daher kann bei Busanwendungen häufig auf jede weitere Regelung verzichtet werden; die Verdichter werden nur über eine Magnetkupplung ein- und ausgeschaltet.

Wird dieser Effekt (z. B. bei extremen Tiefkühlanwendungen) nicht gewünscht, so bietet sich hier der zweistufige Hub-

ter zu werfen. Schauen wir uns zunächst einmal einen Hubkolbenverdichter an, Bild 1. Typisch sind die druckgesteuerten Ventile, der einfache, da zylindrische Verdichtungsraum mit seiner sehr großen Dichtigkeit und die Bewegungsumkehr des Kolbens. Diese ist deshalb so wichtig, da sie den Rückgewinn von Arbeit über die

Kurbelwelle während des Expansions-Hubes ermöglicht. Wie sieht nun das typische Betriebsverhalten dieser Anordnung aus?

Bild 2 zeigt eine Druckindizierung, die den Verdichtungsprozess mit Ladungswechsel beschreibt. Dies ist eine Messung, die wir z. B. zur Ventilanpassung für das Kältemittel R 290 durchgeführt haben.

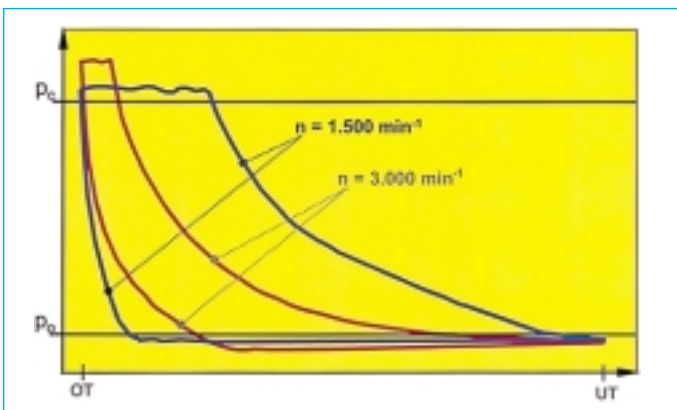


Bild 4 Veränderung des Arbeitsprozesses (Kolbenverdichter) mit der Drehzahl

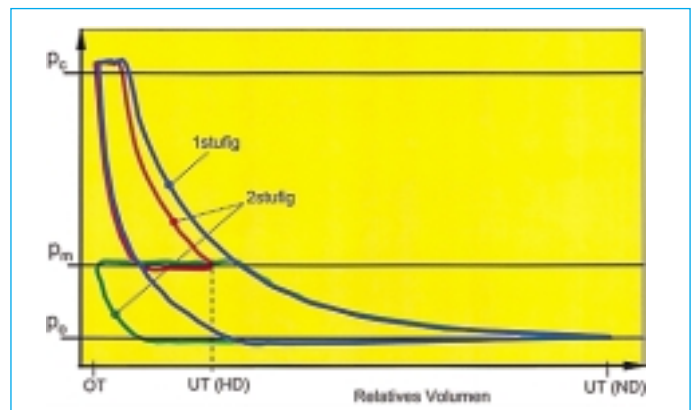


Bild 5 Arbeitsprozess bei 2stufiger Verdichtung (Kolbenverdichter)



kolbenverdichter an, Bild 5: Zu erkennen ist die geringe Rückexpansion, die im Wesentlichen nicht vom Verdampfungsdruck abhängt.

### Scrollverdichter

In der heute für die Klimaanlage üblichen Bauform wird ein Spiralelement orbitierend angetrieben. Dieses Element ist typischerweise einseitig gelagert, was die erreichbare Baugröße begrenzt. Die Verdichter saugen pro Umdrehung einmal an und schieben das verdichtete Gas einmal aus, Bild 6.

Wie bei der Schraube handelt es sich um einen Verdränger ohne Ventilsteuerung, d. h. das Gas wird wegabhängig auf ein eingebautes Druckverhältnis verdichtet und dann ausgeschoben. Eine weitere Besonderheit beim Scrollverdichter ist die Verdichtung von außen nach innen und

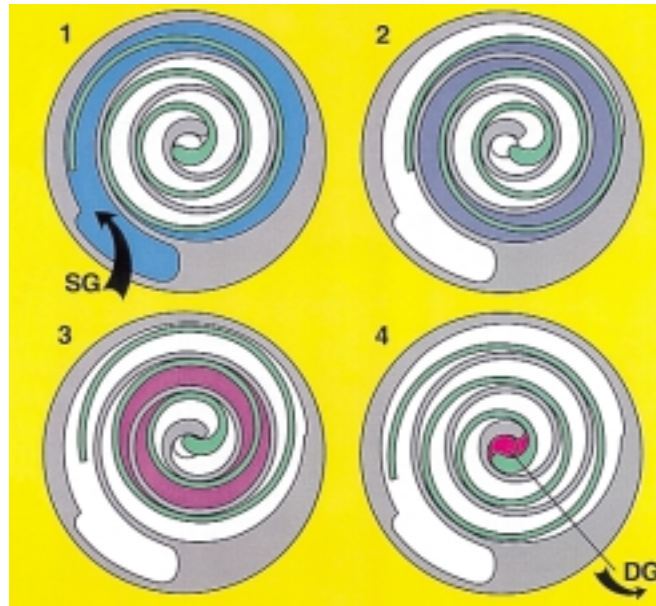


Bild 6 Verdichtungs-  
vorgang in einem Scroll-  
verdichter

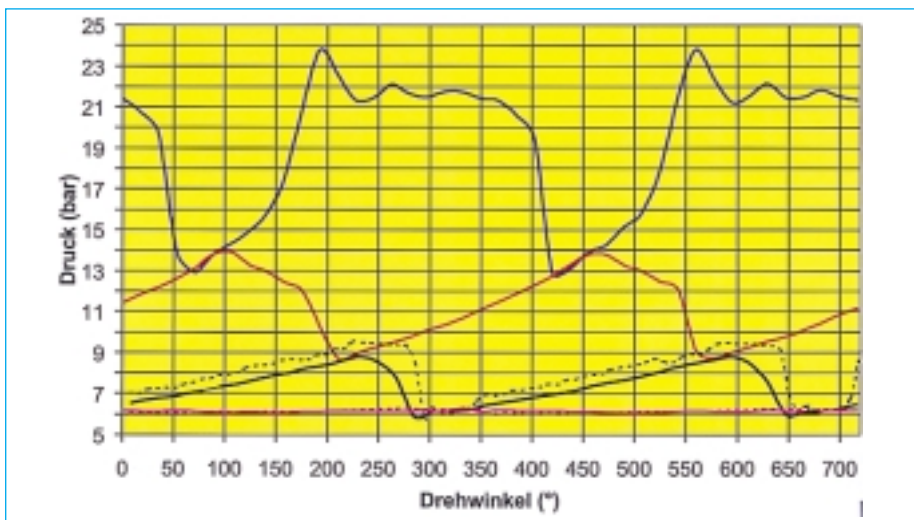


Bild 7 Druckverlauf Scrollverdichter bei ARI-Bedingung (+ 7,2/54,4° C)

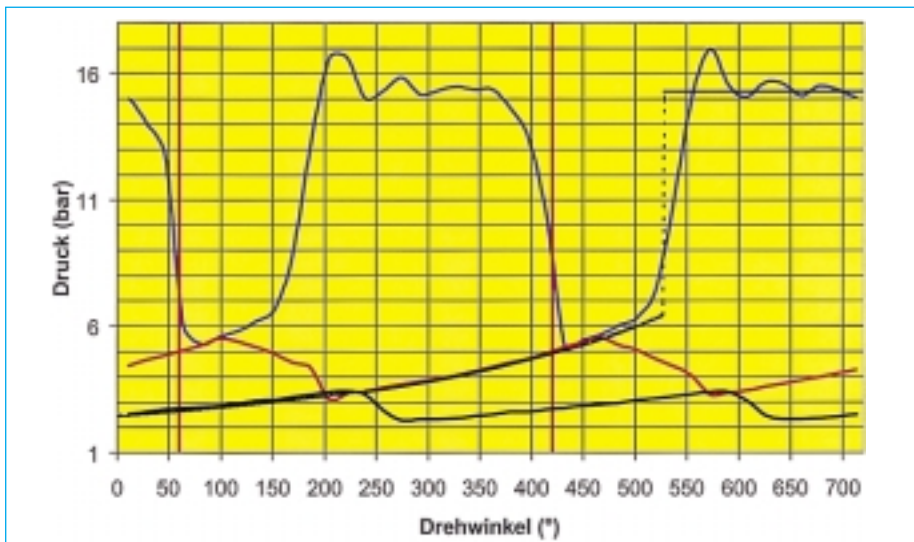


Bild 8 Druckverlauf Scrollverdichter bei Normalkühlung

die radiale Öffnung der innersten Verdichtungskammer, die den Ausschubvorgang beendet. Dies begrenzt auch die Wirksamkeit des bei Tiefkühlverdichtern teilweise vorhandenen Druckarbeitsventils. Eine Rückexpansion mit Arbeitsgewinn ist nicht möglich, da die Expansion gegen die Drehrichtung erfolgt.

Wie sieht nun der Verdichtungsprozess aus? Nachfolgend sind 2 Druckindizierungen eines Scrollverdichters für die Betriebsbedingungen Klima (ARI), Bild 7, und Normalkühlung dargestellt.

Zunächst einmal kann man feststellen: Bei Klimaanlage mit den bekannt kleinen Druckverhältnissen kann der Scrollverdichter seine Vorteile ausspielen: Die fehlende Drosselung an den Ventilen kompensiert den Nachteil der hier relativ geringen Unterverdichtung. Die aufgrund der geringen Relativgeschwindigkeit generell geringe Reibung ermöglicht hier einen hohen Wirkungsgrad bei geringer thermischer und mechanischer Belastung. Die internen Leckagen sind aufgrund der relativ geringen Druckdifferenzen gering. Schaut man sich den gleichen Verdichter bei höherem Druckverhältnis an, Bild 8, so erkennt man die größere Arbeit gegen Ende der Verdichtung, wenn die Rückexpansion entgegen der Drehrichtung stattfindet.

Dies führt zu einer erhöhten thermischen Belastung und erhöht innere Leckage – verbunden mit einem schlechteren Wirkungsgrad. Die Gleichförmigkeit in der Verdichtung ist gegenüber der Klimaanlage stark reduziert, was zu erhöhten Gaspulsationen führen kann. Hier wird ein

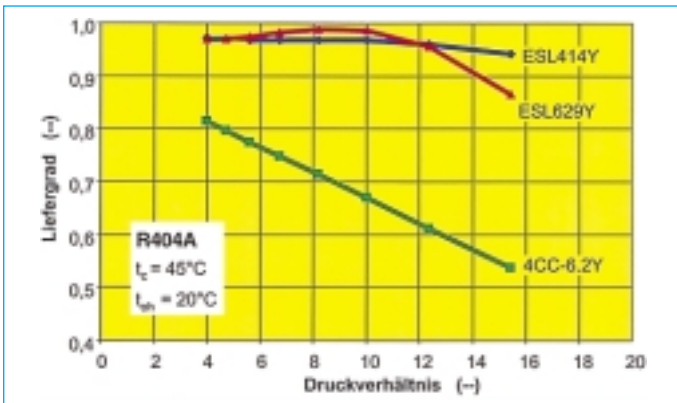


Bild 9 Vergleich des Liefergrades Octagon (Scroll)

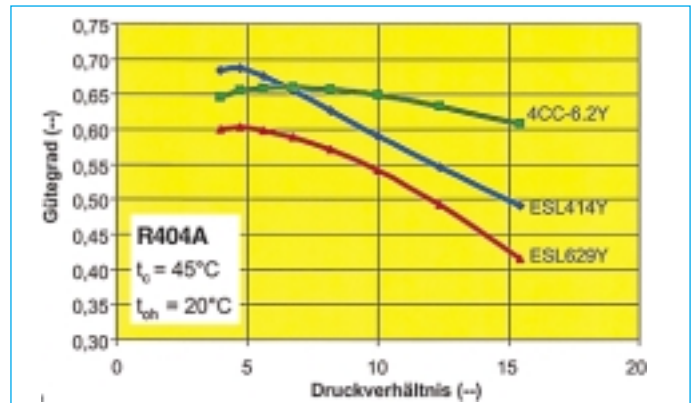


Bild 10 Vergleich des Gütegrades Octagon (Scroll)

prinzipbedingter Nachteil gegenüber den Hubkolbenverdichtern deutlich, der mit dem Druckverhältnis zunimmt.

Dies schlägt sich auch in den erreichbaren Leistungsdaten nieder: Während der Liefergrad über dem Druckverhältnis den Vorteil der höheren Nutzung des Hubvolumens der Scrollverdichter zeigt, Bild 9, ist in Bild 10 dargestellt, wie der Gesamtwirkungsgrad eines guten und eines weniger guten Scrollverdichters auf jeden Fall bei Druckverhältnissen oberhalb der Klimaanwendungen unter den der Hubkolbenverdichter fällt.

### Schraubenverdichter

Wie der Scrollverdichter arbeitet auch die Schraube ohne Ventile entlang einer geometrisch vorgegebenen Verdichtungslinie. Ist sie deshalb auch für die Kälteanwendung weniger geeignet?

Nein, denn die Schraube kann aus verschiedenen Gründen besser auf die Kälteanwendung eingestellt werden, wie bereits verschiedentlich veröffentlicht [3]. Hier sei nur auf die üblicherweise verwendete Ölkühlung verwiesen, die den Verdichtungsprozess in Richtung der Isothermen verschiebt. Ferner kann bei Schraubenverdichtern, die ja eher bei größeren Hubvolumina zum Einsatz kommen, die Möglichkeit genutzt werden, mittels ECONOMISING den Verdichtungsprozess „aufzufüttern“, was den Nachteil der Unterverdichtung kompensiert, Bild 11.

Beim Scrollverdichter ist dies weniger möglich, da kaum ausreichende Querschnitte für die Gaseinspeisung zur Verfügung stehen. Diese sind auf die Wandstärke der Spirale begrenzt wegen der sonst drohenden Leckagen zwischen den Verdichtungsstaschen. Außerdem ist auch der relative Aufwand für die ECO-Schaltung bei Scrollverdichtern höher. Daher wird bei Scrollverdichtern häufig die besonders unwirtschaftliche Flüssigkeitseinspritzung

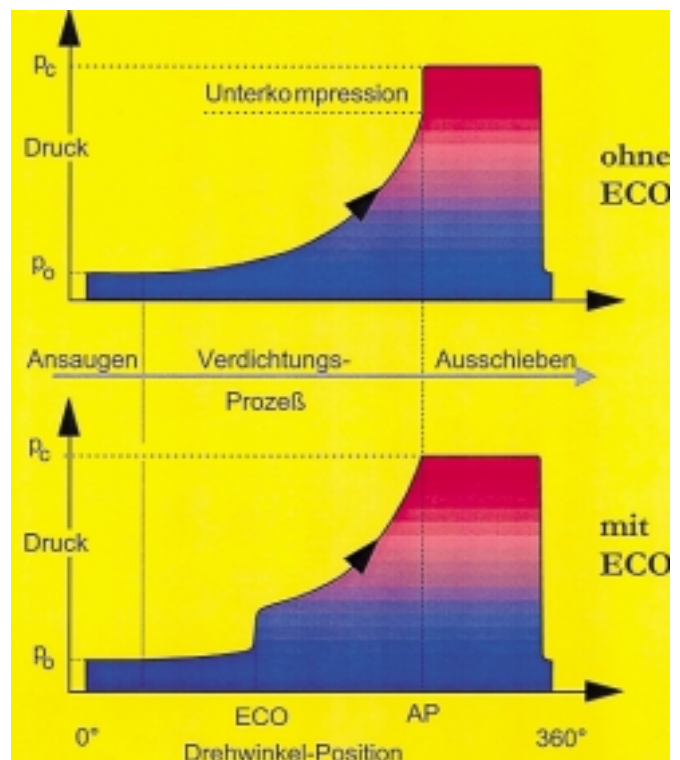
eingesetzt, die wirklich nur die thermische Überlastung des Verdichters verhindert.

### Beeinflussbare Verdichtermerkmale

Nach diesem Ausflug in die Grundlagen möchte ich nun zu einigen typischen Entwicklungsparametern kommen und dazu Anwendungsbeispiele geben. Typische in der Entwicklung beeinflussbare Merkmale sind u. a.:

- Baugröße/Gewicht
- Kosten
- Wirkungsgrad
- Laufruhe
- Handling
- Regelbarkeit

Bild 11 Schraubenverdichter (Druckverlauf mit und ohne Economiser)



### Beispiel: Octagon-Baureihe

Am Beispiel der Octagon-Baureihe, Bild 12, möchte ich aufzeigen, wie schwingungs- und geräuscharm ein Hubkolbenverdichter gebaut werden kann.

### Geräuschverhalten mit Pulsationsdämpfer im Zylinderkopf

Über die geringen Geräusche und Schwingungen dieser Baureihe wurde während der letztjährigen DKV-Tagung bereits berichtet [2]. Trotz der konzeptbedingt hervorragenden Laufruhe kam es in einzelnen Anwendungen zu Schwingungen in Druckleitungen, die durch Resonanzen der Druckpulsationen hervorgerufen wurde.



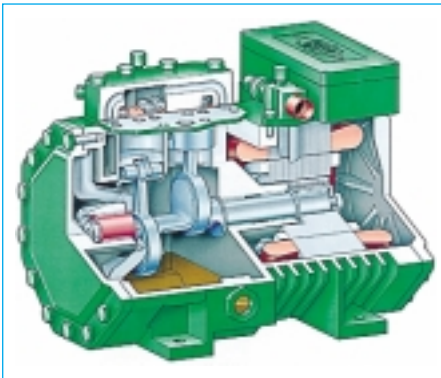


Bild 12 Halbhermetischer Hubkolbenverdichter der Octagon Baureihe

Bild 13 Zylinderköpfe links ohne, rechts mit Pulsationsdämpfer (Octagon-Verdichter)

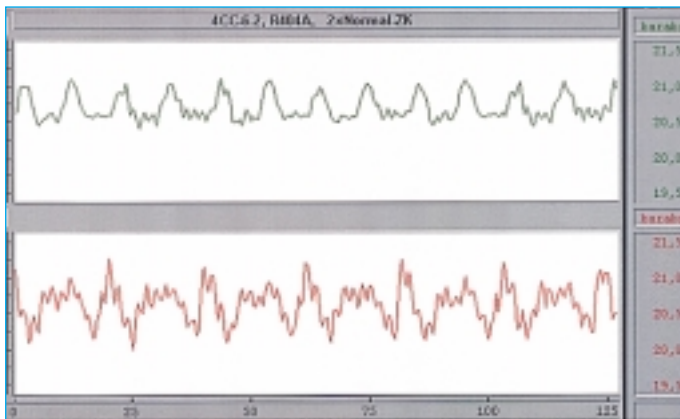
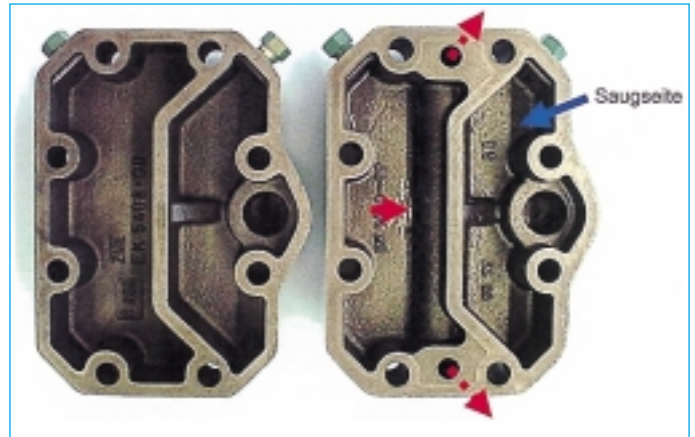


Bild 14 Druckschwingungen mit Standard-Zylinderkopf ohne Pulsationsdämpfer (oben in der Rohrleitung, unten im Zylinderkopf)

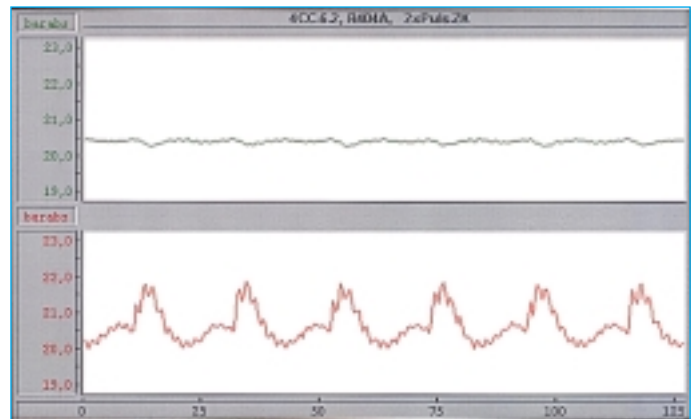


Bild 15 Druckschwingungen mit Zylinderkopf mit integriertem Pulsationsdämpfer (oben in der Rohrleitung, unten im Zylinderkopf)

Üblicherweise werden solche Schwingungen durch Druckschalldämpfer (Muffler) auf ein vertretbares Maß reduziert. Nachteil dieser Lösung ist, daß es zwischen dem Muffler und Verdichter immer noch zu erheblichen Pulsationen kommt, was den Einbau erschweren kann. Es lag daher nahe, nach einer Lösung zu suchen, welche die Wirkung von Druckpulsationen außerhalb der Verdichter völlig vermeidet. Mit dem neuen Zylinderkopf der Octagon-Baureihe ist das gelungen, Bild 13. Mit einem Resonanzkanal werden die Pulsationen am Ort ihrer Entstehung getilgt; nämlich im Zylinderkopf selbst.

Einen Vergleich der Pulsationen mit herkömmlichen und modifiziertem Zylinderkopf zeigen die Bilder 14 und 15. Eine Nachmessung der Verdichtergrundgeräusche nach dem Intensitätsverfahren ergab keine nennenswerte Verbesserung. Schaut man jedoch auf die Wechselwirkung Verdichter – Anlage, so ist eine deutliche Verringerung der Schalldrücke festzustellen.

Daher wurde zusätzlich ein luftgekühltes Aggregat einer Rundummessung nach DIN 45 635 in 1 m Abstand unterzogen und in folgenden Varianten verglichen: Octagon-Verdichter ohne Pulsationsdämpfer, Octagon-Verdichter mit Pulsationsdämpfer, Scrollverdichter.

Die hier gemessenen Schalldrücke können für eine Anordnung mit luftgekühltem Verflüssiger als typisch angesehen werden. Zu erkennen ist eine weitere Verbesserung des bereits in der Ausgangslage niedrigen Schallpegels durch die Einführung der neuen Zylinderköpfe, Bild 16.

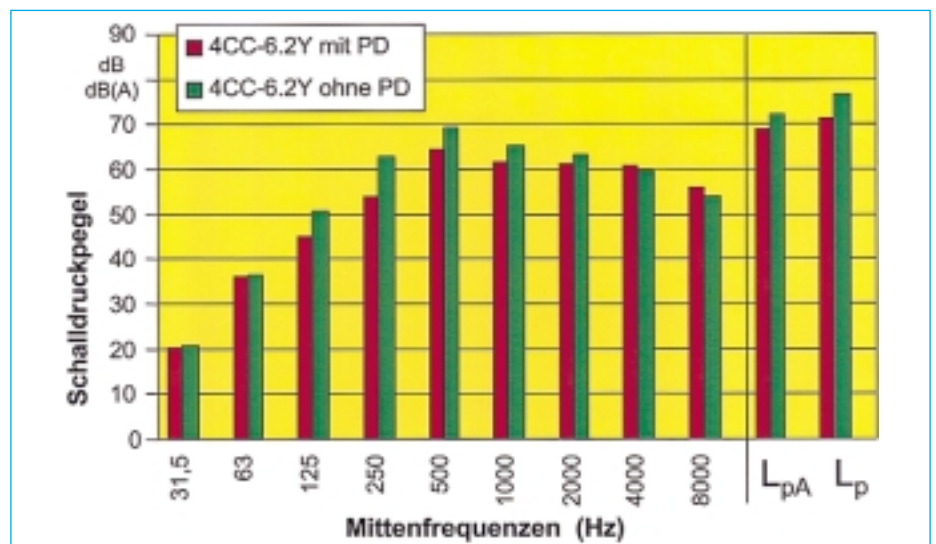


Bild 16 Schalldruckpegel (Abstand 1 m) mit bzw. ohne Pulsationsdämpfer

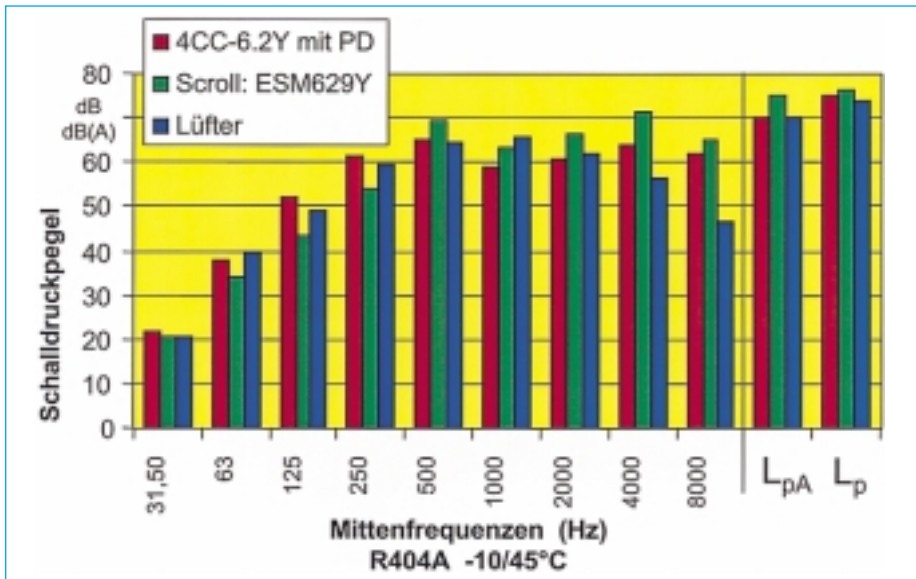


Bild 17 Schalldruckpegel; Abstand 1 m; im Maschinenraum; im Vergleich Octagon (4CC-6.2Y) – Scroll (ESM629Y) – Lüfter

### Drehzahlregelung

Kurzhubige, laufige Hubkolbenverdichter sind von Haus aus gut zur Drehzahlregelung geeignet. Die Octagon-Baureihe ist mit einer freigegebenen Bandbreite von 30–60 Hz (Standard) und 20–70 Hz (erweitert) Antriebsfrequenz hier ein gutes Beispiel, Bild 18.

Doch dies ist nicht alles: In verschiedenen Anwendungsprojekten wurde das Potential der Verdichter ausgelotet. Als ein Beispiel soll ein Wärmepumpenprojekt vorgestellt werden, wo ein 2-Zylinder-Verdichter zwischen 20 und 80 Hz geregelt wird, Bild 19.

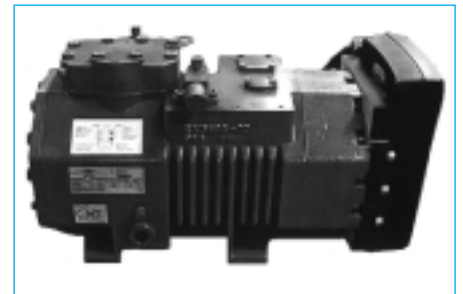


Bild 19 Octagon-Verdichter der Baureihe C2

Die Wärmepumpe, Bild 20, befindet sich im Test.

### Breitbandige Kälteanwendung an einem Projektbeispiel

Die Drehzahlabhängigkeit der Rückexpansionsverluste wurde ja bereits erwähnt. Will man einen Tiefkühlverdichter über die Drehzahl regeln, so muß man dies berücksichtigen, da ab einer Grenzfrequenz mit zunehmender Drehzahl keine

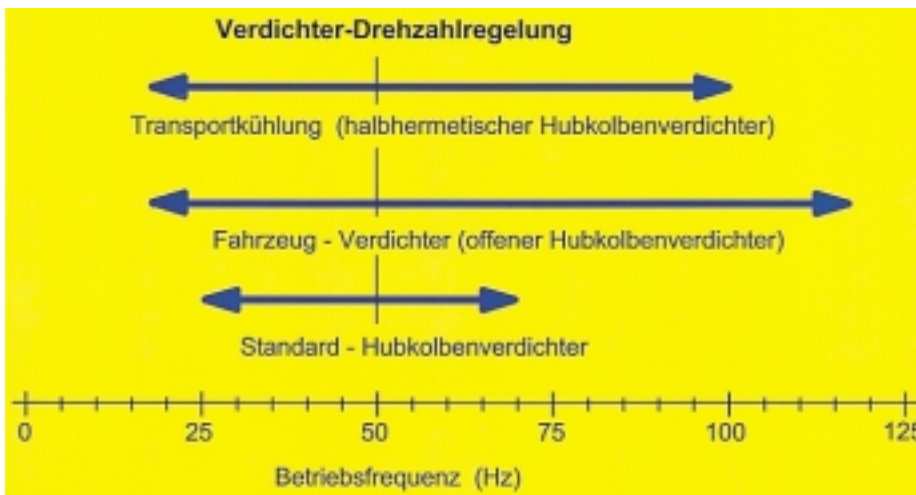


Bild 18 Verdichter-Leistungsregelung durch variable Drehzahlen

Wie gering diese Geräuschwerte wirklich sind, ist aus Bild 17 zu erkennen: der Octagon-Verdichter liegt nicht nur unter dem Scrollverdichter, sondern insgesamt nur auf dem Niveau des Lüfters.

Neben dieser Reduktion der Verdichtergehörnisse wurde auch die universelle Verwendbarkeit der Verdichter in allen möglichen Anlagenarten weiter verbessert. Hiermit ist der Beweis erbracht, daß Hubkolbenverdichter keine höheren Geräusche und Schwingungen haben müssen, als rotierende Verdichter, sie können sogar besser sein.

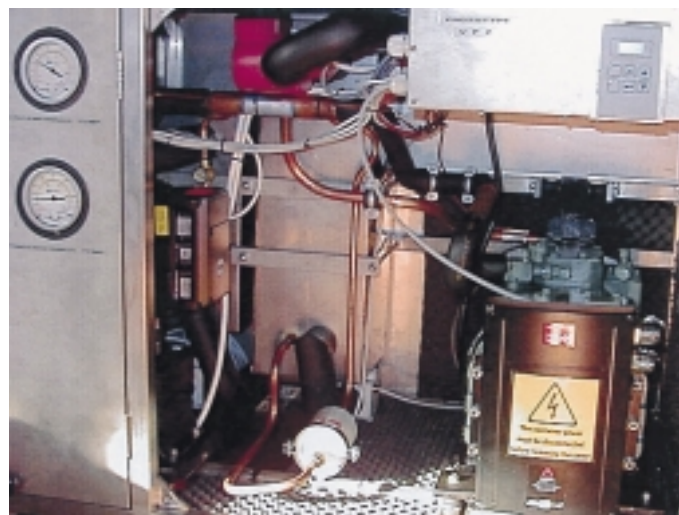


Bild 20 Anwendungsbeispiel (Octagon C2) in einer Wärmepumpe



Leistungserhöhung mehr stattfindet. In solchen Fällen bietet es sich an, über einen 2stufigen Kolbenverdichter nachzudenken. Als Beispiel möchte ich den Verdichter für ein Containerprojekt vorstellen. Folgende Bedingungen waren zu erfüllen:

- Baubreite < 250 mm
- Gewicht < 100 kg
- Kältemittel R 134a
- Regelung stufenlos von 10,5 bis 0,5 kW
- Bedingungen
  - (1) - 28 °C Raumtemperatur,  $Q_o = 3,5 \text{ kW}$
  - (2) - 18 °C Raumtemperatur,  $Q_o = 4 \text{ kW}$
  - (3) - 4 °C Raumtemperatur,  $Q_o = 10,5 \text{ kW}$
- Energieeinsparung 30 % zum Stand der Technik
- Umgebungsbedingungen: + 38 °C Standard, ansonsten von arktisch bis + 55 °C

Sowohl mit dem zunächst gewünschten Schraubenverdichter als auch mit dem Scrollverdichter konnten die Vorgaben nicht erreicht werden. Insbesondere die Teillastwirkungsgrade waren zu schlecht. Bereits mit dem einstufigen Hubkolbenverdichter konnte mittels Drehzahlregelung das erforderliche Hubvolumen verringert werden. Es zeigte sich aber dann, daß oberhalb 80 Hz Antriebsfrequenz bei Tiefkühlung ( $t_o = -33 \text{ °C}$ ) mit dem hier vorgeschriebenen Kältemittel R 134a keine Leistungserhöhung mehr möglich war, Bild 21.

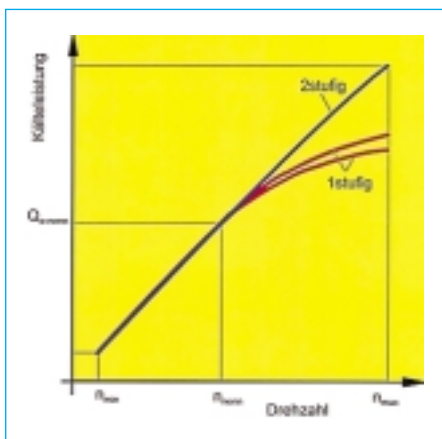


Bild 21 Veränderung der Kälteleistung mit der Drehzahl

Der Durchbruch gelang mit einer 2stufigen Version, Bild 22: Obwohl nur mit dem halben Hubvolumen ausgestattet, wurde die Kälteleistung des einstufigen



Bild 22 Octagon-Verdichter S4CC-5Y, umschaltbar 1–2stufig, mit Frequenzumrichter

Verdichters um 25 % übertroffen. Der mittlere Energieverbrauch für einen typischen Lastzyklus war 30 % geringer als mit einer Serienanlage.

## Zusammenfassung

Am Beispiel einiger typischer Merkmale wurde aufgezeigt, daß halbhermetische Hubkolbenverdichter noch ein erhebliches Entwicklungspotential besitzen, welches sie insbesondere in der Kälteanwendung auch in Zukunft die beste Wahl bleiben läßt. Es wurde gezeigt, daß diese gute Eignung mit der Grundcharakteristik der Kolbenverdichter zusammenhängt, welche sich positiv von allen rotierenden Prinzipien unterscheidet. Die Anpassung an neue Anwendungen und Kältemittel ist mit relativ geringem Aufwand möglich. Weder im Gewicht, noch im Vergleich der Laufruhe oder Kompaktheit müssen moderne Hubkolbenverdichter den Vergleich mit rotierenden Verdichtern fürchten, da die-

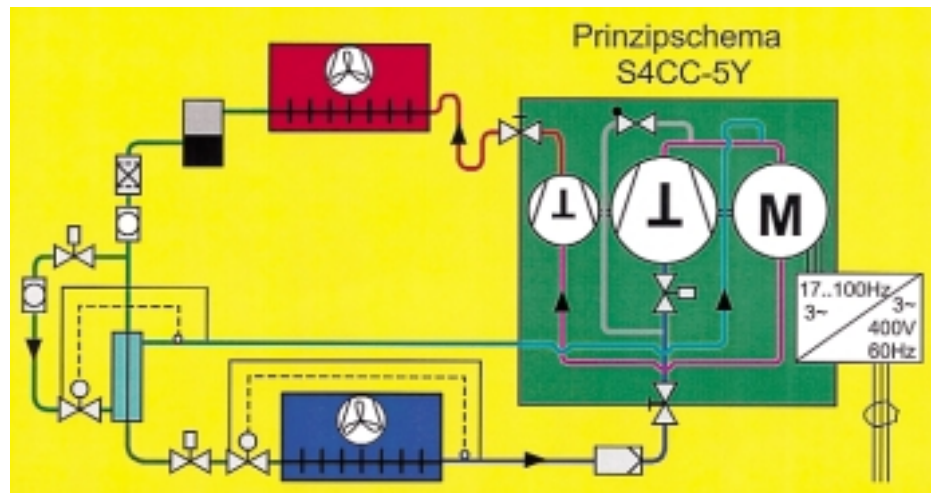


Bild 23 Kreislauf-Prinzipschema mit dem Octagonverdichter S4CC-5Y und mechanischer Flüssigkeitsunterkühlung

Durch die Kältemittelunterkühlung avancierte das „Klima-Kältemittel“ R 134a zu einem hervorragenden Tiefkühlkältemittel und erreichte in einer Vergleichsmessung gleiche Leistungszahlen wie R 404 A. Bei weltweiten Transportanwendungen spielt die Verfügbarkeit des Kältemittels eine besondere Rolle, daher der Wunsch nach R 134a. Die Einbindung in das System zeigt Bild 23.

Alle Forderungen bezüglich der Bauweise und Laufeigenschaften konnten erreicht werden. Man kann getrost sagen, daß in dieser Anwendung kein Prinzip besser geeignet ist als das des Hubkolbenverdichters.

se Parameter durch die Entwicklung beeinflussbar sind. Die Drehzahlregelung, bisher schon verschiedentlich angewandt, bietet bei Serienanwendung ein erhebliches Energie-Einsparpotential. Dagegen sind Schrauben- und Scrollverdichter besonders bei kleineren Druckverhältnissen einzusetzen, wo sie in der Klimaanwendung ihre Vorteile zur Wirkung bringen können. Unberührt davon sind Schraubenverdichter mit Ölkühlung und Economising bei größeren Hubvolumina eine interessante und zukunftsweisende Alternative in der Kälteanwendung. □

## Literatur

- [1] Sandkötter, W.: „Kleine Schraubenverdichter in der Kältetechnik“, DKV-Vortrag 1995
- [2] Renz, H.: „Einsatz kleiner Schraubenverdichter in gewerblichen Kälteanlagen“, KK 51 (1998)
- [3] König, H.: „Gegenüberstellung von Schallmessungen ...“ DKV-Vortrag, Berlin 1999