SV-0401-D-GB

Eine neue Generation optimierter Kompakt-Schraubenverdichter für R134a

A New Generation of Compact Screw Compressors Optimised for R134a

Sonderausgabe 09.2004
special edition 09.2004

Eine neue Generation optimierter Kompakt-Schraubenverdichter für R134a

1 Einführung

Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit Verdränger-Verdichtern wurden in der Vergangenheit vorwiegend mit dem Kältemittel R22 betrieben. Sicherheitsrelevante und thermodynamische Eigenschaften dieses Kältemittels bieten besonders günstige Voraussetzungen für hohe Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit.

Wegen des frühen Verwendungsverbots von R22 in Europa, wurden Neuentwicklungen in erster Linie auf R407C umgestellt. Dieses Kältemittel kommt R22 in volumetrischer Kälteleistung, Drucklagen und Massenstrom sehr nahe, dadurch konnten ursprünglich für R22 entwickelte Verdichter mit relativ geringem Aufwand angepasst werden. So wurde z.B. R134a weniger intensiv verfolgt, obwohl Hersteller von Schraubenverdichtern schon frühzeitig auf die Vorteile beim Einsatz dieser Alternative hingewiesen haben. Als Begründung gegen R134a-Technologie wurden insbesondere höhere Verdichterkosten angeführt.

2 Kältemitteleigenschaften – Bewertung mit Blick auf den Verdichter

Für eine Bewertung der Kältemittel hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Verdichterbauarten ist bereits ein Vergleich der wichtigsten thermodynamischen Eigenschaften aufschlussreich. Neben dem zu erwartenden Leistungsverhalten lässt sich der günstigste Anwendungsbereich beurteilen, aber auch eine Einschätzung über Liefer- und Gütegradverlauf vornehmen (Wirtschaftlichkeit).

Im Rahmen verschiedener Untersuchungen und Forschungsprogramme [1] erwiesen sich R134a, R407C und R410A als besonders geeignete Kandidaten für Kühlsätze in Klimasystemen, Wärmepumpen und anderen Hochtemperatur-Anwendungen. Die thermodynamischen Eigenschaften dieser Stoffe zeigen allerdings erhebliche Abweichungen, die sich je nach Verdichtertechnologie unterschiedlich auf das Leistungs- und Wirkungsgradverhalten auswirken können.

2.1 Relativer Vergleich der Kälteleistung

Der in Abb. 1 dargestellte Vergleich der volumetrischen Kälteleistung zeigt eine besonders große Bandbreite zwischen den einzelnen Kältemitteln. Die Unterschiede resultieren aus den Stoff spezifischen thermodynamischen Daten.

R134a rangiert am unteren Ende der Skala, wobei aber für den Betrieb von Schraubenverdichtern mit Economiser ein deutlicher Anstieg erkennbar wird. Die relativ niedrige Kälteleistung von R134a erfordert ein entsprechend höheres

A New Generation of Compact Screw Compressors Optimised for R134a

1 Introduction

In the past, most liquid chillers and heat pumps with positive displacement compressors were operated with refrigerant R22. The safety relevant and thermodynamic properties of this refrigerant provide especially favourable conditions for a high degree of efficiency and operational reliability.

Due to the early phase-out of R22 in Europe, most new product developments favorised R407C. Since this refrigerant's volumetric cooling capacity, pressure level and mass flow are very similar to those of R22, compressors which had originally been developed for R22, could easily be adapted. Therefore, less attention was paid to R134a, for instance, although screw manufacturers had pointed out the advantages of this alternative at an early stage. Increased compressor costs were used as major arguments against the R134a technology.

2 Refrigerant properties – assessment with focus on the compressor

In order to evaluate a refrigerant's suitability for a certain compressor design, the comparison of their particular thermodynamic properties is very helpful. Besides the expected performance characteristics, the best application range may be determined, and the volumetric and isentropic efficiency development can be evaluated.

According to different analyses and research programs [1] R134a, R407C and R410A have shown to be particularly suitable for liquid chillers in air conditioning systems, heat pumps and other high temperature applications. The thermodynamic properties of these substances, however, show considerable deviations which can have various effects on performance and efficiency characteristics depending on compressor technology.

2.1 Relative comparison of cooling capacity

The comparison of the volumetric cooling capacity given in Fig. 1 shows significant differences between the refrigerants which derive from the substance's specific thermodynamic data.

R134a is found at the bottom of the scale, whereas when operating screw compressors with economiser a considerable increase can be noticed. The relatively low cooling capacity of R134a requires a higher displacement which, in

Fördervolumen, das bei Schraubenverdichtern relativ einfach durch ein Rotorpaar größerer Abmessung erreicht werden kann.

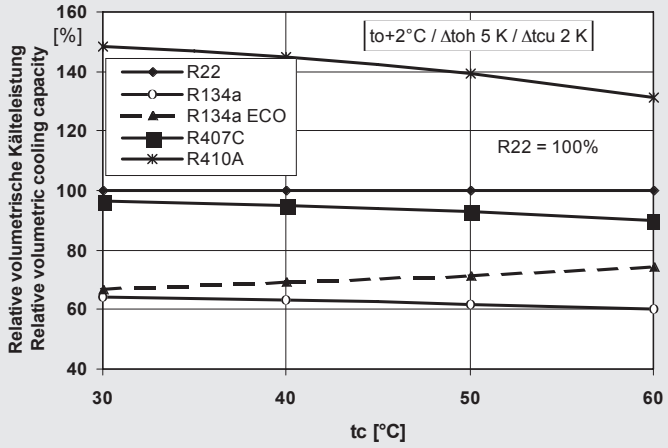
R407C kommt, wie eingangs schon erwähnt, dem Referenz-Kältemittel R22 sehr nahe. Auslegung und Konstruktion des Verdichters können deshalb im Grundsatz beibehalten werden.

R410A zeigt die mit Abstand höchsten Leistungswerte, woraus ein reduziertes Fördervolumen mit entsprechend kleineren geometrischen Abmessungen resultiert. Dies erscheint auf den ersten Blick als Vorteil, führt aber z.B. bei Schraubenverdichtern zu geringerer Rotor-Umfangsgeschwindigkeit mit nachteiligen Auswirkungen auf Liefergrad und isentropen Gütegrad (COP) – siehe auch Abschnitte 2.2 und 3.

case of screw compressors, can be achieved by a larger set of rotors.

As mentioned above, R407C is closely related to the reference refrigerant R22. Therefore the basic design and construction of the compressor may be retained.

R410A shows by far the highest performance data, resulting in a reduced displacement and smaller physical dimensions respectively. What seems to be an advantage at first sight causes a lower rotor tip speed with negative effects on the volumetric efficiency and COP for screw compressors – see also sections 2.2 and 3.

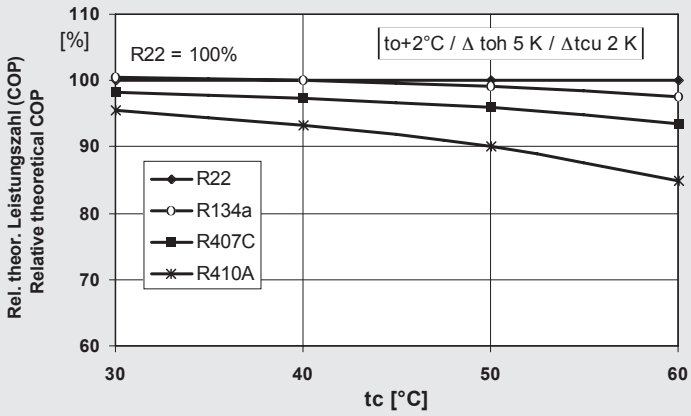


t_o Verdampfungstemperatur
Δt_{oh} Sauggasüberhitzung
t_c Verflüssigungstemperatur
Δt_{cu} Flüssigkeits-Unterkühlung

t_o Evaporating temperature
Δt_{oh} Suction gas superheat
t_c Condensing temperature
Δt_{cu} Liquid subcooling

Abb. 1 Relativer Vergleich der volumetrischen Kälteleistung

Fig. 1 Relative comparison of the volumetric cooling capacity



COP Leistungszahl

COP Coefficient of performance

Abb. 2 Relativer Vergleich der theoretischen Verdichter-Leistungszahl (COP)

Fig. 2 Relative comparison of the theoretical compressor COP

2.2 Relativer Vergleich der theoretischen Verdichter-Leistungszahl (COP)

Im Gegensatz zur Kälteleistung unterscheiden sich die theoretischen Leistungszahlen der betrachteten Kältemittel (Abb. 2) merklich weniger.

Auffällig ist jedoch der stärkere Abfall von R410A bei höheren Verflüssigungstemperaturen, der u.a. auf die niedrige kritische Temperatur (73°C) zurückzuführen ist. Wegen der vergleichsweise hohen Wärmeübertragungs-Koeffizienten und geringen Druckabfälle von R410A in Verdampfern und Verflüssigern, kann dieser Nachteil jedoch teilweise kompensiert werden.

R134a zeigt die günstigsten Verhältnisse über den gesamten Anwendungsbereich. Im Zusammenhang mit der erforderlichen Vergrößerung des Fördervolumens bzw. der Rotorabmessungen bei Schraubenverdichtern, kommt es real gesehen sogar zu noch günstigeren Bedingungen.

Aus den größeren Rotorabmessungen ergeben sich – auf das Fördervolumen bezogen – reduzierte Spaltlängen mit geringeren Rückströmverlusten bei der Verdichtung. Außerdem wirkt sich die geringe Druckdifferenz von R134a (ca. 67% im Vergleich zu R407C / 45% zu R410A) zusätzlich begünstigend aus. Diese Bedingungen sind entscheidend für die besonders hohen isentropen Gütegrade und COP-Werte optimierter R134a-Schraubenverdichter.

2.2 Relative comparison of the theoretical compressor COP

Contrary to the cooling capacity, the theoretical COPs of the considered refrigerants vary rather slightly (Fig. 2).

The noticeable drop of R410A at higher condensing temperatures is caused by the low critical temperature (73°C) among others. This disadvantage, however, can partly be compensated by the relatively high heat transfer coefficients and low pressure drops in evaporators and condensers.

R134a shows most advantageous conditions over the entire application range. Considering the required extension of the displacement even better results can be achieved using larger rotors with screw compressors.

With consideration of the displacement, larger rotors lead to reduced sealing lengths with less flow-back losses during compression. Furthermore, the small pressure differential of R134a (approx. 67% compared to R407C / 45% to R410A) results in additional advantages. These conditions are crucial for the extremely high isentropic efficiencies and COP values of optimised R134a screw compressors.

2.3 Kältemittel-Massenstrom / Dampfdichte

Trotz erheblicher Unterschiede in der volumetrischen Kälteleistung liegen die Massenströme für eine definierte Kälteleistung bei allen drei Alternativen innerhalb einer Bandbreite von etwa 10% zu R22. Grund hierfür sind die bei diesen Stoffen jeweils weitgehend proportionalen Verhältnisse zwischen Dampfdichte und Volumenstrom.

Auf dieser Basis und mit Blick auf die relativ geringen absoluten Massenströme und Dampfdichten lassen sich Druckverluste in Verdichter, Wärmeaustauschern und Rohrleitungen auf niedrige Werte auslegen.

2.3 Refrigerant mass flow / vapour density

In spite of significant differences in the volumetric cooling capacity, the mass flow for a defined cooling capacity varies within 10% according to R22 for all three alternatives. This can be attributed to the almost proportional relations of vapour density and volume flow rate for these substances.

According to these facts and with respect to the relatively small total mass flows and vapour densities, the pressure drops in compressors, heat exchangers and pipe lines can be kept at low levels.

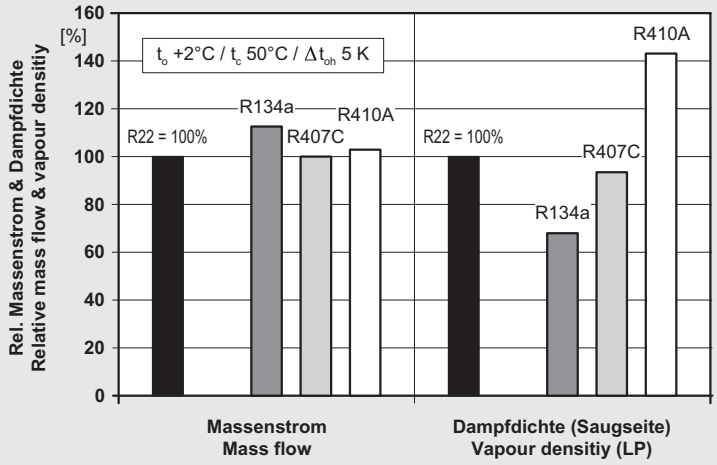


Abb. 3 Relativer Vergleich der Kältemittel-Massenströme und Dampfdichten (Saugseite)

Fig. 3 Relative comparison of refrigerant mass flows and vapour densities (LP)

3 Entwicklungsschritte zu hocheffizienten R134a-Schraubenverdichtern

Wie schon zuvor erwähnt, besteht im Allgemeinen die Auffassung, dass Verdichter für R134a zwar effizient, aber im Vergleich zu teuer wären. Dies trifft vielfach zu, da Verdichter mittlerer und größerer Leistung üblicherweise für universellen Betrieb mit R134a, R22 und R407C (R404A, R507A) ausgelegt sind. Das für R134a erforderliche höhere Fördervolumen führt dabei zu größeren geometrischen Abmessungen des gesamten Verdichters. Das Potential zur Kostenreduzierung liegt in einem kleineren Motor und ist damit relativ gering. Diese "Gesetzmäßigkeit" lässt sich bei Hubkolben- und Scroll-Verdichtern nur schwer durchbrechen, da Hubraum und Triebwerk bzw. Spiraldurchmesser die Gehäusegröße wesentlich bestimmen.

3.1 Konstruktiver Aufbau von CSH-Kompakt-Schraubenverdichtern

CSH-Schraubenverdichter sind bereits durch eine äußerst kompakte Bauweise gekennzeichnet. Das spezifische Bauvolumen des mechanischen Verdichterteils wird von den beiden anderen Technologien nicht erreicht.

Die Verdichter beinhalten einen integrierten dreistufigen Ölabscheider mit entsprechendem Ölmanagement-System. Bei Anwendungen in Flüssigkeitskühlsätzen hat sich diese Bauart als besonders vorteilhaft erwiesen.

3 Development steps for highly efficient R134a screw compressors

As mentioned earlier, the general opinion is that all compressor types designed for R134a are efficient, but comparably too expensive. This is true in many cases because medium and larger size compressors are usually designed for universal operations with R134a, R22, and R407C (R404A, R507A). The higher displacement required for R134a widens the entire compressor dimensions. The potential for a cost reduction is in a smaller motor and is therefore relatively low. This "rule" can hardly be bypassed with reciprocating and scroll compressors since their overall size is mainly determined by displacement and drive gear or spiral diameter.

3.1 Constructional design of CSH compact screw compressors

CSH screw compressors are already characterised by a very compact design, which in regard to the mechanical compressor part cannot be achieved by any of the other two technologies.

The compressors contain an integrated 3-stage oil separator with a relevant oil management system. This design is very favourable for the application in liquid chillers.

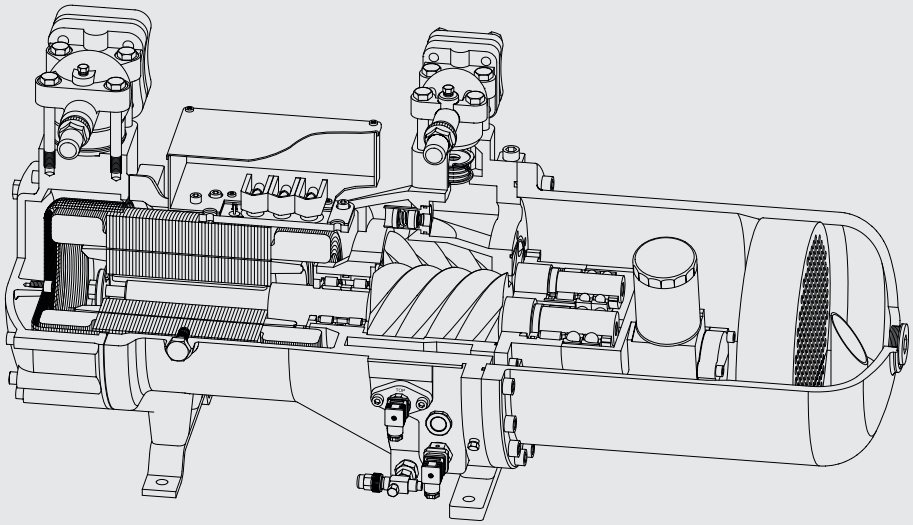


Abb. 4 Halbhermetischer Kompakt-Schraubenverdichter – konstruktiver Aufbau

Fig. 4 Semi-hermetic compact screw compressor – constructional design

3.2 Konstruktive Grundmerkmale

- Schraubenprofil: Twinrotor-Design (Profilverhältnis 5:6)
- Halbhermetische Bauart, sauggasgekühlt
- Basiskonstruktion (Fördervolumenbereiche, Motorzuordnung, mechanische Festigkeit, Lagerdimensionen) ausgelegt für R407C und R22 (R404A, R507A)
- Doppelwandiges, druckkompensiertes Rotorgehäuse
- Dauerfeste Wälzlagerung mit Druckentlastung
- Integrierter Ölabscheider

3.2 Basic design features

- Screw profile: twin rotor design (lobe ratio of 5:6)
- Semi-hermetic design, suction gas cooled
- Basic construction (displacement, motor allocation, mechanical strength, bearing dimensions) designed for R407C and R22 (R404A, R507A)
- Double wall, pressure compensated rotor housing
- Lifetime roller contact bearings with pressure unloading
- Integrated oil separator

3.3 Schieber-Leistungsregelung mit integriertem Economiser-Anschluss (ECO)

Die Forderung nach stufenloser Leistungsregelung führte zur Entwicklung eines formschlüssig an die Profilkontur angepassten, direkt zwischen Haupt- und Nebenrotor angeordneten Regelschiebers.

Zur Leistungsregelung wird der Schieber hydraulisch axial bewegt (Abb. 5). Das besondere Konstruktionsmerkmal ist dabei, dass zur Leistungsminderung nicht bereits vorkomprimiertes Gas wieder zur Saugseite zurück gefördert wird, sondern die Verdichtung erst beginnt, wenn das Ansaugvolumen bereits verringert ist. Durch entsprechende Ansteuerung der Ventile CR1 .. CR4 kann die Leistungsregelung im stufenlosen Modus oder auch stufig (100-75-50-25%) betrieben werden.

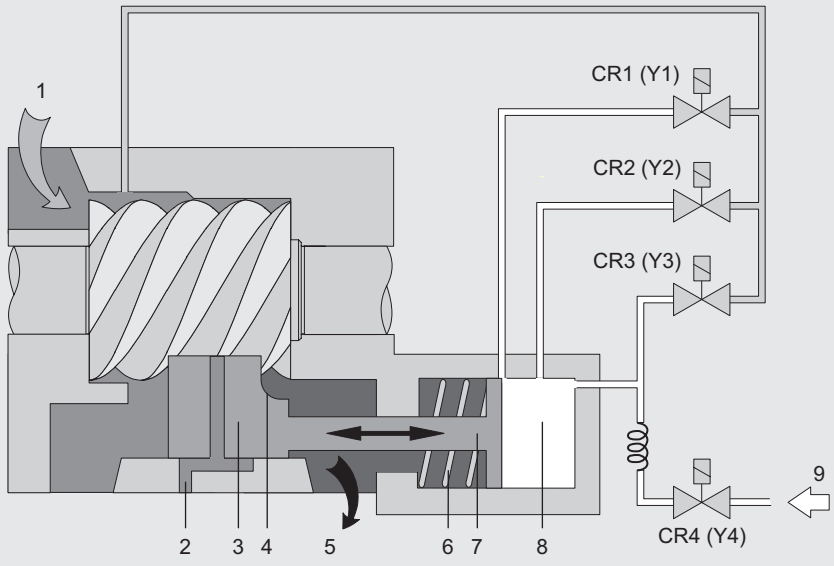
Mit Blick auf besonders hohe Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit ist bei der vorliegenden Konstruktion ein Teil des Auslass-Kanals in den Regelschieber integriert (Abb. 5, Pos. 4 "Kontur für V_i-Anpassung"). Dadurch wird eine V_i-Regelung bei

3.3 Slider capacity control with integrated economiser connection (ECO)

The request for an infinite capacity control led to the development of a control slider, which matches the profile contour and is located directly between male and female rotors.

For capacity control the slider is hydraulically moved in axial direction (Fig. 5). A special constructional feature ensures that for capacity reduction pre-compressed gas is not blown back to the suction side but rather compression begins when the suction gas volume has already been reduced. By energising the valves CR1 .. CR4 accordingly the capacity control can be operated in either infinite or staged mode (100-75-50-25%).

With respect to a high degree of efficiency and operational reliability part of the discharge port is integrated into the control slider (Fig. 5, Pos. 4 "Contour for V_i adaptation") providing a V_i control for part-load conditions. The internal



1 Sauggas-Eintritt
2 ECO-Ansaugposition integriert im Regelschieber
3 Regelschieber
4 Kontur für V_i-Anpassung
5 Druckgas-Austritt
6 Feder
7 Hydraulikkolben
8 Druckkammer
9 Öldruck

1 Suction gas
2 Sliding ECO port
3 Control slider
4 Contour for V_i adaption
5 Discharge gas
6 Spring
7 Hydraulic piston
8 Pressure chamber
9 Oil pressure

Abb. 5 Schieberregelung mit integriertem Economiser-Kanal

Fig. 5 Slider control with integrated economiser port

Teillast erreicht. Das innere Volumenverhältnis (V_i) bleibt dabei bis ca. 70% Teillast nahezu konstant. Bei weiter abnehmender Last reduziert es sich entsprechend dem zu erwartenden geringeren Anlagen-Druckverhältnis.

Eine weitere Besonderheit ist der in den Schieber integrierte Economiser-Kanal (Abb. 5, Pos. 2). Er ermöglicht den Betrieb eines Unterkühlungskreislaufes unabhängig vom Lastzustand des Verdichters.

volume ratio (V_i) is kept constant to approx. 70% part-load. If the load is further reduced, it drops according to the expected smaller system pressure ratio.

The economiser port integrated into the control slider is another special feature (Fig. 5, Pos. 2); it allows the operation of a subcooling circuit independent of the compressor load.

3.4 Anforderungsprofil für die optimierte R134a-Auslegung

Wie bereits erläutert, können Schraubenverdichter sehr effizient und wirtschaftlich mit R134a betrieben werden, wobei jedoch das erforderliche Fördervolumen im Verhältnis zur geringeren volumetrischen Kälteleistung (Abb. 1) erhöht werden muss. Die Herausforderung bestand darin, bei vergleichbaren Verdichterabmessungen und Kosten die identische Kälteleistung mit R134a zu erreichen wie das jeweils größte Modell der bestehenden Baureihen für R407C bzw. R22.

Weitere Anforderungen an die optimierte R134a-Baureihe:

- Ölmanagement, konstruktive Grundmerkmale, Leistungsregelung (mit gleitendem Economiser-Kanal) wie bestehende Baureihen
- höhere isentrope Gütegrade als vergleichbare R407C- und R22-Modelle
- max. Verflüssigungstemperaturen für Dauerbetrieb:
  65°C bei Standard-Anwendung / 60°C bei Economiser
- Lagerlebensdauer – gleiche Kriterien wie bei bestehenden Baureihen
- Druckfestigkeit und sicherheitsrelevante Auslegung – gleiche Kriterien wie bei bestehenden Baureihen (prEN12693, UL 984)
- Befestigungsmaße, Saug-, Druckleitungs- und ECO-Anschlüsse – identische Position wie bestehende Baureihen

3.4 Requirements for an optimised R134a design

As mentioned before, screw compressors can be operated very efficiently with R134a, however the required displacement must be increased proportionally to the smaller volumetric cooling capacity (Fig. 1). The challenge was to achieve an identical cooling capacity with R134a as compared to the largest versions of the existing series using R407C or R22 while keeping comparable compressor sizes and costs.

Additional requirements for an optimised R134a series:

- Same oil management, constructional features, capacity control (with sliding economiser port) like for the existing series
- Better isentropic efficiencies as comparable R407C and R22 versions
- Maximum condensing temperatures for continuous operation:
  65°C for standard application / 60°C with economiser
- Bearing durability – same criteria as for existing series
- Pressure strength and safety relevant design – same criteria as for existing series (prEN12693, UL 984)
- Mounting dimensions, suction line, discharge line and ECO connections – identical positions as for existing series

3.5 Konstruktive Umsetzung des Anforderungsprofils

Bestimmende Größen für die Grundgeometrie des CSH-Schraubenverdichters sind Einbaumotor, Rotorpaar und Ölabscheider.

Auf Grund der etwa gleich bleibenden, tendenziell sogar günstigeren elektrischen Leistungsaufnahme bei der optimierten R134a-Ausführung ist die Motorzuordnung mit dem leistungsgleichen Modell für R407C / R22 identisch. Mit Blick auf die Sauggaskühlung und den höheren Volumendurchsatz sind entsprechende Anpassungen erfolgt.

Die Rotorprofile der Bitzer Schraubenverdichter sind durchweg Eigenentwicklungen mit besonders hoher Stabilität und Effizienz. Auf dieser Basis konnte das Profil so modifiziert werden, dass der höhere Volumendurchsatz durch eine um etwa 10% vergrößerte Grundabmessung der Rotoren erreicht wird. Dadurch ließen sich die notwendigen konstruktiven Änderungen des Rotorgehäuses ohne wesentlichen Einfluss auf die äußere Kontur des Verdichters umsetzen.

3.5 Constructional realisation of the requirements

Determining factors for the basic geometry of the CSH screw compressor are motor, rotor set and oil separator.

Due to the almost constant, in tendency even lower electrical power consumption with the optimised R134a version the motor allocation is identical to equal capacity models for R407C / R22. With respect to suction gas cooling and higher volume flow rate certain modifications have been made.

All rotor profiles are proprietary BITZER developments with an extremely high stability and efficiency. On this basis the profile was modified in such a way that a higher flow rate could already be achieved by enlarging the dimensions of the rotors by approximately 10%. Thereby the necessary constructive modifications were made possible without major influence on the outer compressor contour.

Die bekannt solide Wälzlagerung der Verdichter wurde beibehalten. Bedingt durch günstigen Drehmomentbedarf, geringe Druckdifferenz und niedrige Drucklage in den Lagerkammern sind die Voraussetzungen sogar noch besser als bei den Basismodellen für R407C und R22. Auf Grund der veränderten Abmessungen im Rotorbereich wurden ebenfalls Anpassungen bei Austrittsfenster, Regelschieber und Lagerflanschen vorgenommen.

Umfassende Untersuchungen der ursprünglich für R407C- und R22-Modelle entwickelten dreistufigen Ölabscheider ergaben trotz des höheren Volumenstroms sehr hohe Abscheide-Wirkungsgrade. Gründe liegen u.a. in der niedrigen Dampfdichte und Druckgastemperatur von R134a, die eine optimale Abscheidung begünstigen. Entsprechende Anpassungen wurden deshalb nur in geringem Umfang erforderlich.

The well-known solid bearing arrangements of the compressors were retained. In consequence of a better torque, less pressure differential and a low pressure level in the bearing chambers, the conditions are even better than with the basic versions for R407C and R22. Due to the dimensional changes in the rotor area modifications of the discharge port, the control slider and the bearing flange have been adapted as well.

Extensive investigations of the 3-stage oil separators, originally developed for R407C and R22, showed very high separation efficiencies in spite of the higher displacement. Among others effects this can be attributed to the lower vapour density and discharge gas temperature of R134a which enable an optimal separation. Therefore only slight modifications had to be made.

3.6 Wirkungsgrade der optimierten R134a-Verdichter

Das Anforderungsprofil konnte auch bei den Verdichter-Wirkungsgraden in vollem Umfang erreicht und damit die Zielsetzung erfüllt werden.

Die Leistungsmessungen bestätigen auch den positiven Einfluss der vergrößerten Rotorgeometrie. Bekanntlich handelt es sich bei den in der Kältetechnik standardmäßig eingesetzten Schrauben um öleingespritzte Verdichter, deren enge Spalte zwischen den Arbeitsräumen durch den zusätzlichen Ölanteil im Förderstrom abgedichtet werden. Dies erklärt die Abhängigkeit der Leistungs- und Wirkungsgrad-Charakteristik von der Umfangsgeschwindigkeit der Rotoren, den Spaltlängen im Verhältnis zum Volumendurchsatz, der Ölviskosität sowie der Druckdifferenz zwischen den Arbeitsräumen. Alle genannten Parameter sind bei dieser neuen Baureihe von positivem Einfluss und erklären damit die guten Ergebnisse.

Der folgende Vergleich bezieht sich auf den Verlauf des isentropen Gütegrads in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen. Mit dem Produkt aus Gütegrad und theoretischer Leistungszahl (COP) lässt sich der real erreichbare Wert bestimmen, wobei die Unterschiede zwischen den Kältemitteln (Abb. 2) gleichfalls zu berücksichtigen sind.

Der Vergleich zeigt im Hauptanwendungsbereich von Flüssigkeitskühlern (Verdampfung bei 0° bis 5°C) einen Vorteil des Schraubenverdichters gegenüber den allgemein als überragend dargestellten Scroll-Verdichtern von 5 bis 7%. Wird dabei noch die um 2.5 bis 4.5% höhere Leistungszahl (COP) von R134a berücksichtigt, ergeben sich Vorteile zu Gunsten der R134a-Kompaktschrauben von bis zu etwa 10%. Nicht berücksichtigt ist dabei der im Verflüssiger oftmals nachteilige Einfluss des Temperaturgleits von R407C, der zu höheren Verflüssigungstemperaturen mit der Konsequenz einer zusätzlich reduzierten Leistungszahl führen kann.

3.6 Efficiencies of the optimised R134a compressors

Even with respect to compressor efficiency all requirements were fully accomplished and thus the goal was reached.

The positive influence of enlarged rotors is confirmed by performance measurements. As generally known, standard screws used in refrigeration are oil injected compressors having small gaps between the working spaces which are sealed by an additional oil content in the swept volume. This explains that performance and efficiency characteristics depend on rotor tip speeds, gap lengths in proportion to the volume flow rate, oil viscosity and pressure differentials between the working spaces. All these parameters have positive influences on the new series and account for the good results.

The following comparison refers to the course of the isentropic efficiency dependent on the operation conditions. By calculation of efficiency times theoretical COP the actual achievable value can be determined, whereby the differences between the refrigerants (Fig. 2) have to be considered.

Within the main application range of liquid chillers (evaporation at 0° to 5°C) the comparison shows an advantage of 5 to 7% for the screw compressor over the scroll compressor which has generally been defined as being an outstanding performer. If the 2.5 to 4.5% higher COP of R134a is also taken into account, advantages of up to 10% result in favour of the screw compressor. The often negative influence of the temperature glide of R407C in the condenser, however, has been disregarded which can cause higher condensing temperatures and consequently reduces the COP even further.

4 Leistungs- und Wirkungsgrad-Verhalten bei Voll- und Teillastbetrieb

4.1 Leistungsregelung und Betriebs-Charakteristik

CSH-Schraubenverdichter sind mit einer besonders effizienten Leistungsregelung ausgerüstet – siehe [2] und Abschnitt 3.3 –, die entweder in vier Stufen oder stufenlos betrieben werden kann. Es ist allgemein bekannt und durch Untersuchungen belegt, dass das dynamische Verhalten und die resultierende Wirtschaftlichkeit einer Kälteanlage bzw. eines Flüssigkeits-Kühlsatzes wesentlich von der Regelgüte bestimmt werden. In dieser Hinsicht ist der Schraubenverdichter durch die Möglichkeit einer exakten Leistungsanpassung an den realen Bedarf jeder Regelung durch ON/OFF-Betrieb einzelner Verdichter überlegen.

Bei einem angenommenen System mit zwei Verdichtern pro Kreislauf kommt es beim Abschalten eines der beiden Verdichter (auf ca. 50% Leistung) zu einem deutlichen Abfall der Verflüssigungstemperatur. Hieraus resultiert eine Teilverdampfung der Kältemittelflüssigkeit (Bildung von Flash-Gas), deren Temperatur noch auf hohem Niveau liegt. Als Konsequenz ergeben sich Störungen in der Einspritzregelung des Verdampfers und nachteilige Auswirkungen auf Leistung und Wirtschaftlichkeit. Ebenso kommt es beim Zuschalten eines Verdichters (verdoppelte Leistung) zu starken Schwankungen im Regelkreis, häufig gekoppelt mit unzureichender Sauggasüberhitzung und den resultierenden Abweichungen von den optimalen Betriebsbedingungen.

4.2 Bewertung des Leistungsverhaltens über "Integrated Part Load Values" (IPLV)

Das zuvor beschriebene dynamische Verhalten eines Systems und dessen Auswirkungen werden häufig unterschätzt oder falsch bewertet. Vergleiche über (berechnete) integrierte Teillast-Wirkungsgrade (IPLV) basieren auf quasi statischen

4 Performance and efficiency characteristics at full and part load operation

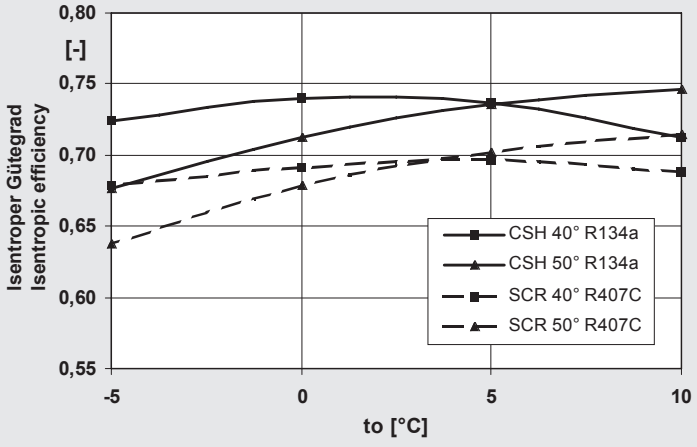
4.1 Capacity control and operating characteristics

CSH screw compressors are equipped with a very efficient capacity control – see [2] and section 3.3 – which can either be operated in 4 steps or stepless. It is generally known and confirmed by tests that the dynamic characteristics and the resulting efficiency of a refrigeration plant or a liquid chiller are basically determined by the control quality. In this respect the screw compressor is superior to any regulation mechanism by individual compressor ON/OFF operation, since the performance can be adjusted exactly to the actual requirements.

In a given system with two compressors per circuit the condensing temperature considerably drops if one of the compressors is switched off (to approx. 50% capacity). This results in part evaporation of liquid refrigerant (flash gas formation), while its temperature is still high. Consequences are malfunctions of the evaporator's injection control and negative effects on performance and efficiency. Moreover, if an idle compressor is started (and performance is doubled), strong fluctuations in the control circuit, often combined with insufficient suction gas superheat, lead to deviations from optimal operating conditions.

4.2 Evaluation of performance characteristics by "Integrated Part Load Values" (IPLV)

The dynamic characteristics of a system and its effects as described before are often underestimated or misinterpreted. Comparisons by means of (calculated) integrated part load efficiencies (IPLV) are based on quasi-static conditions



CSH Kompaktschraube
SCR Scrollverdichter
40° Verflüssigungstemperatur (t_c) 40°C
50° Verflüssigungstemperatur (t_c) 50°C

CSH Compact screw
SCR Scroll compressor
40° Condensing temperature (t_c) 40°C
50° Condensing temperature (t_c) 50°C

Abb. 6 Isentroper Gütegrad – Vergleich zwischen Kompakt-Schraubenverdichter CSH8591-140Y (R134a) und einem 25 HP Scroll-Verdichter (R407C)

Fig. 6 Isentropic efficiency – comparison between a CSH8591-140Y compact screw compressor (R134a) and a 25 HP scroll compressor (R407C)

Bedingungen, mit denen ein reales Betriebsverhalten simuliert werden soll. Es ist deshalb eigentlich nicht zulässig, Systeme mit unterschiedlicher dynamischer Charakteristik nach dieser Methode direkt zu vergleichen.

Andererseits ist diese Art der Berechnung realistischer als der reine Vergleich über Energiebedarf oder Wirtschaftlichkeit bei nominellen Volllast-Bedingungen.

Der nachfolgende Vergleich (Abb. 7) zeigt, dass CSH-Kompaktschrauben auch ohne Berücksichtigung ihrer Vorteile beim dynamischen Betriebsverhalten äußerst günstige Voraussetzungen bieten. Dies zeigt sich besonders deutlich bei den Lastzuständen von 100 bis 50%, die einem Anteil von nahezu 80% der gesamten Laufzeit entsprechen.

Referenz-Bedingungen sowie prozentuale Gewichtung bei den verschiedenen Leistungsstufen (100/75/50/25%) basieren auf der ESEER-Berechnung von Eurovent [3]. Der ESEER definiert eine IPLV-Bewertung für Europa, es kommt deshalb zu Unterschieden gegenüber der in USA üblicherweise angewandten Norm ARI 550 / 590.

Weitere Vergleichsbedingungen:

- Kühlsatz mit CSH Kompakt-Schraubenverdichtern (R134a)
  - 2 getrennte Kältekreisläufe mit je 1 Verdichter
  - stufenlose oder 4-stufige Leistungsregelung pro Kreislauf
- Kühlsatz mit Scroll-Verdichtern (R407C)
  - 4 getrennte Kältekreisläufe mit je 2 Verdichtern
  - 2-stufige Leistungsregelung (Verdichter ON/OFF) pro Kreislauf
- Betriebsbedingungen bei 100% Kälteleistung (Basis für beide Kühlsätze):
  - Verdampfungstemperatur (t_o) +2°C
  - Sauggasüberhitzung (Δt_{oh}) 5 K
  - Verflüssigungstemperatur (t_c) 50°C
  - Flüssigkeitsunterkühlung (Δt_{cu}) 2 K

in order to simulate a real operation. Therefore, this method should only be used with reservation to compare systems of different dynamic characteristics.

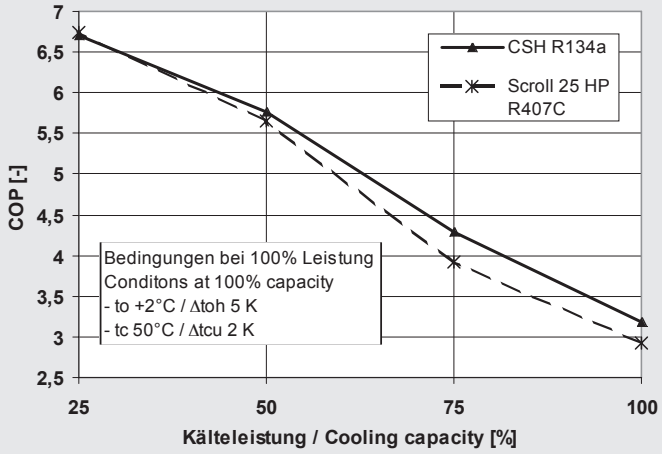
On the other hand, this method is more realistic than a comparison purely by means of energy requirement or efficiency at rated full load operation conditions.

The following comparison (Fig. 7) shows that CSH compact screws offer excellent conditions even without considering their advantages derived from the dynamic operating characteristics. This is made very evident at load conditions of 100 to 50% which corresponds to almost 80% of total operating time (according to usual IPLV calculations).

Reference conditions and percentage weight of the different capacity steps (100/75/50/25%) are based on the ESEER calculation by EUROVENT [3]. The ESEER defines an IPLV evaluation for Europe. Hence there are differences to ARI 550 / 590 as usually applied in the U.S.A.

Additional comparative requirements:

- Liquid chiller with CSH compact screw compressors (R134a)
  - 2 separate cooling circuits with 1 compressor each
  - Infinite or 4-step capacity control per circuit
- Liquid chiller with scroll compressors (R407C)
  - 4 separate cooling circuits with one compressor each
  - 2-step capacity control (compressor ON/OFF) per circuit
- Operating conditions at 100% cooling capacity (basis for both liquid chillers):
  - Evaporating temperature (t_o) +2°C
  - Suction gas superheat (Δt_{oh}) 5 K
  - Condensing temperature (t_c) 50°C
  - Liquid subcooling (Δt_{cu}) 2 K



COP Verdichter-Leistungszahl
t_o Verdampfungstemperatur
Δt_{oh} Sauggasüberhitzung
t_c Verflüssigungstemperatur
Δt_{cu} Flüssigkeitsunterkühlung

COP Coefficient of performance
t_o Evaporating temperature
Δt_{oh} Suction gas superheat
t_c Condensing temperature
Δt_{cu} Liquid subcooling

Abb. 7 Vergleich der Verdichter-Leistungszahlen im Voll- und Teillastbetrieb bei typischen Betriebsbedingungen von Flüssigkeits-Kühlsätzen

Fig. 7 Comparison of the compressor COPs at full and part load operation with typical operating conditions of liquid chillers

5 Zusammenfassung

Auf Grund seiner thermodynamischen Eigenschaften bietet R134a sehr günstige Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Einsatz von Schraubenverdichtern bei mittleren und hohen Verdampfungstemperaturen. Nachteilig ist jedoch die niedrige volumetrische Kälteleistung, die bei üblichen Verdichterkonstruktionen zu relativ hohen spezifischen Kosten führt.

Mit einer neuen, für R134a optimierten Generation von Kompakt-Schrauben konnte das Fördervolumen ohne Änderung der äußeren Verdichtergeometrie wesentlich vergrößert werden. Dadurch werden bei ähnlichen Kosten identische Kälteleistungen erreicht wie beim jeweils größten Modell der Verdichterfamilien für R407C bzw. R22. Wesentliches Merkmal sind zudem die äußerst hohen isentropen Gütegrade als Voraussetzung für geringsten Energiebedarf.

In Verbindung mit der besonders effizienten Leistungsregelung (4-stufig oder stufenlos) lässt sich eine hohe Regelgüte und damit beste System-Effizienz erreichen. Auch bei der sogenannten IPLV-Bewertung erzielen Kühlsätze mit den optimierten R134a Kompakt-Schraubenverdichtern überragende Ergebnisse.

5 Conclusion

Due to its thermodynamic properties, R134a offers very favourable conditions for the efficient application of screw compressors at medium and high evaporating temperatures. A drawback, however, is the small volumetric capacity, which involves relatively high cost for usual compressor constructions.

A new generation of compact screws optimised for R134a permitted a considerable increase of the displacement without changing the compressor dimensions. Thereby identical cooling capacities are achieved at similar cost as for the largest versions of the existing series for R407C or R22. Another major characteristic is an extremely high isentropic efficiency entailing a minimum energy requirement.

In combination with the very efficient capacity control (4-step or stepless) a high performance and thus excellent system efficiency is achieved. Moreover, with regard to the IPLV evaluation extraordinary results are achieved for liquid chillers with optimised R134a compact screw compressors.

Literaturhinweise und Referenzen

[1] Bitzer Kältemittel-Report A-500

[2] H. Renz
Verdichter mit dualer Leistungsregelung und gleitender Economiser-Position
European Conference – Politecnico di Milano 6/2003

[3] EUROVENT-CECOMAF – European Committee of Air Handling and Refrigerating Equipment Manufactureres

References

[1] Bitzer Refrigerant Report A-501

[2] H. Renz
Screws with Advanced Capacity Modulation and Sliding Economiser Port
European Conference – Politecnico di Milano 6/2003

[3] EUROVENT-CECOMAF – European Committee of Air Handling and Refrigerating Equipment Manufacturers

Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH
Eschenbrünnlestr. 15
71065 Sindelfingen (Germany)
Tel. +49 (0) 7031 -932-0
Fax +49 (0) 7031 -932-146 & -147
bitzer@bitzer.de • http://www.bitzer.de

Änderungen vorbehalten / Subject to change 03.05