

Vorgestellt auf der Mostra Convegno Expocomfort in Mailand

# Eine neue Generation optimierter Kompakt-Schraubenverdichter für R 134a

Hermann Renz, Sindelfingen

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.

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 (Wirtschaftlichkeit) vornehmen. 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.

## Relativer Vergleich der Kälteleistung

Der in Bild 1 dargestellte Vergleich der volumetrischen Kälteleistung zeigt eine besonders große Bandbreite zwischen den einzelnen Kältemitteln. Die Unterschiede resultieren aus den stoffspezifischen 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 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

### zum Autor

**Dipl.-Ing. Hermann Renz,**  
Leiter des Geschäftsbereichs Anwendungstechnik und Sonderprojekte, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen



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).

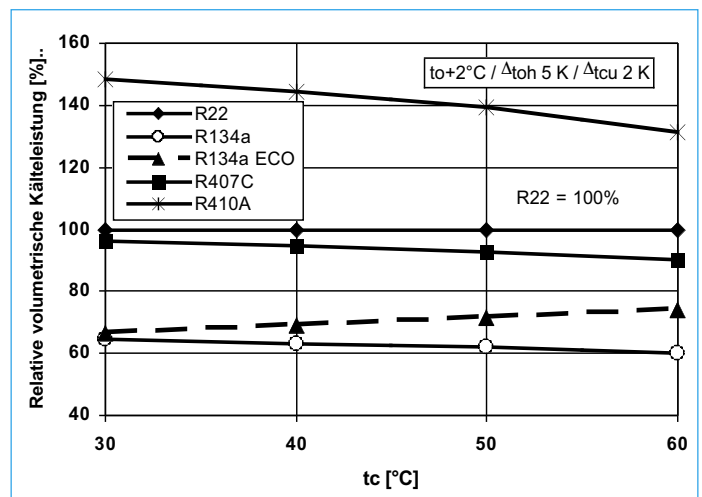


Bild 1 Relativer Vergleich der volumetrischen Kälteleistung

## Relativer Vergleich der theoretischen Verdichter-Leistungszahl (COP)

Im Gegensatz zur Kälteleistung unterscheiden sich die theoretischen Leistungszahlen der betrachteten Kältemittel (Bild 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 Schrau-

benverdichtern, 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.

## Kältemittel-Massenstrom und Dampfichte

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 weitge-

hend proportionalen Verhältnisse zwischen Dampfichte und Volumenstrom.

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

## 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 den 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.

## Konstruktiver Aufbau von CSH Kompakt-Schraubenverdichtern

CSH Schraubenverdichter sind bereits durch eine äußerst kompakte Bauweise gekennzeichnet. Das spezifische Bauvolu-

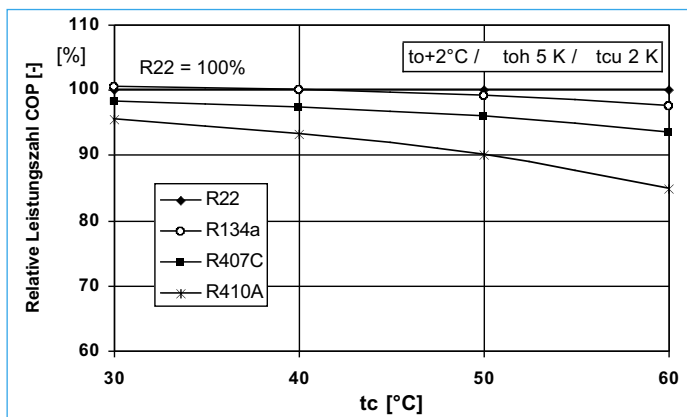


Bild 2 Relativer Vergleich der theoretischen Verdichter-Leistungszahl (COP)

men 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.

### Konstruktive Grundmerkmale

Die Verdichter weisen die folgenden konstruktiven Merkmale auf:

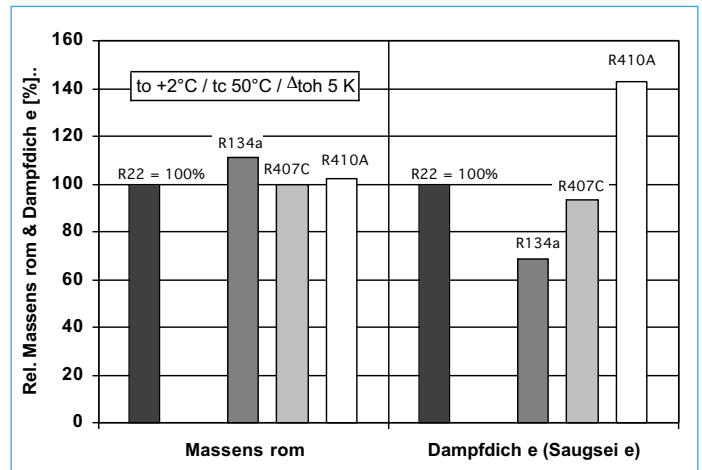
- Schraubenprofil: Twinrotor-Design (Profilverhältnis 5:6)
- Halbhermetische Bauart, sauggasgekühlt
- Basiskonstruktion (Fördervolumenbereiche, Motorzuordnung, mechanische Festigkeit, Lagerdimensionen) ausgelegt für R407C und R22 (R404A, R507A)
- Doppelwandiges, druckkompensiertes Rotorgehäuse
- Dauerfeste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

### Schieber-Leistungsregelung mit integriertem Economiser-Anschluss

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 (Bild 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

Bild 3 Relativer Vergleich der Kältemittel-Massenströme und -Dampfdichten



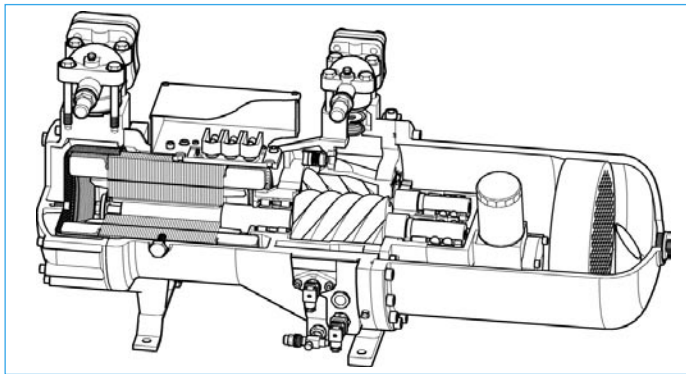


Bild 4 Halbhermetischer Kompakt-Schraubenverdichter – konstruktiver Aufbau

### 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

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 (Bild 5, siehe „Contour for Vi adaptation“) integriert, wodurch eine Vi-Regelung bei Teillast erreicht wird. Dabei bleibt das innere Volumenverhältnis ( $V_i$ ) 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 (Bild 5, siehe „Sliding ECO-Port“); er ermöglicht den Betrieb eines Unterkühlungskreislaufes unabhängig vom Lastzustand des Verdichters.

### 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 (Bild 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 waren:

- 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

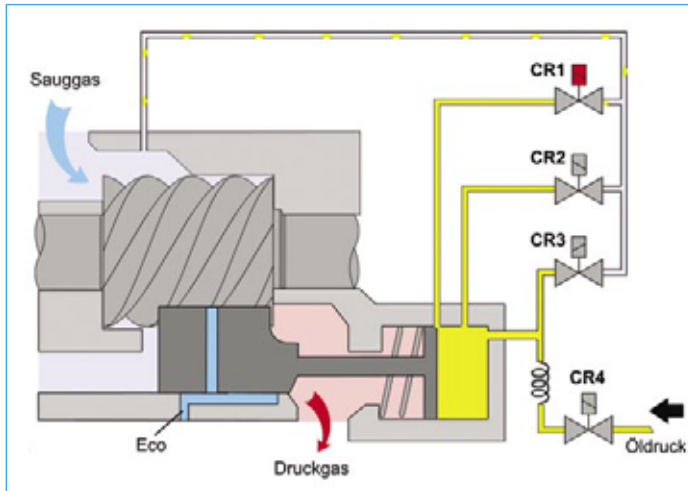
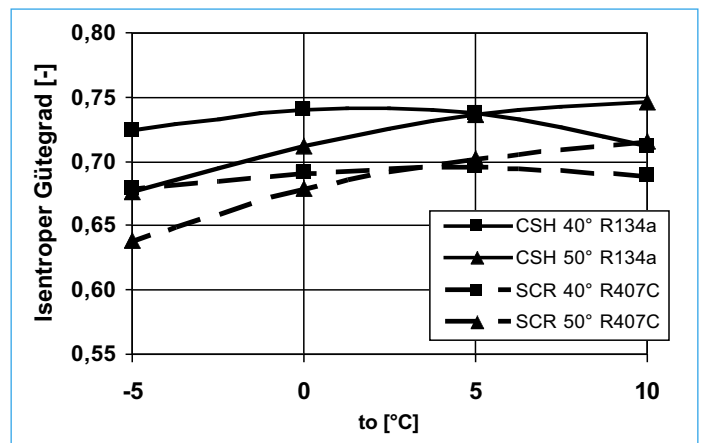


Bild 5 Schieberregelung mit integriertem Economiser-Kanal

Der Vergleich zeigt im Hauptanwendungsbereich von Flüssigkeitskühlern (SST 0° bis 5 °C) einen Vorteil des Schraubenverdichters gegenüber den allgemein als überlegend 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



Rotoren erreicht wird. Dadurch ließen sich die notwendigen konstruktiven Änderungen des Rotorgehäuses ohne wesentlichen Einfluss auf die äußere Kontur des Verdichters umsetzen. 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.

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

### 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 Bauweise 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 (Bild 2) gleichfalls zu berücksichtigen sind.

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.

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

#### Leistungsregelung und Betriebs-Charakteristik

CSH-Schraubenverdichter sind mit einer besonders effizienten Leistungsregelung ausgerüstet (siehe [2]), 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 Verflüssigungstempera-



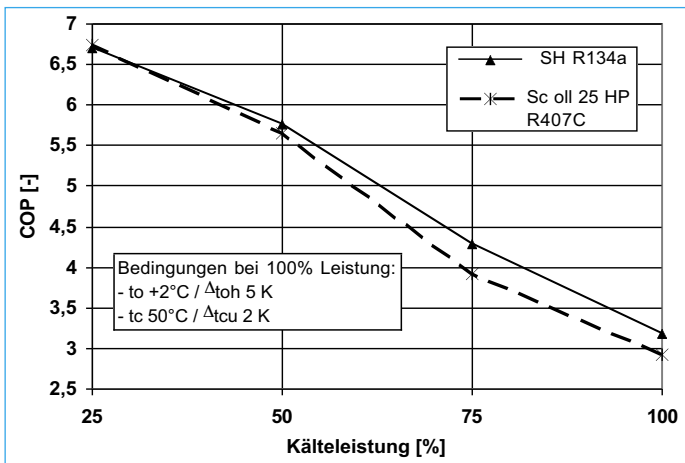


Bild 7 Vergleich der Verdichter-Leistungszahlen im Voll- und Teillastbetrieb bei typischen Betriebsbedingungen von Flüssigkeits-Kühlsätzen

Referenz-Bedingungen sowie prozentuale Gewichtung bei den verschiedenen Leistungsstufen (100/75/50/25%) basieren auf einem Vorschlag von Eurovent [3]. Der Entwurf 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-SCHRAUBEN-VERDICHTERN (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 ( $\Delta t_{oh}$ ) 5 K
  - Verflüssigungstemperatur ( $t_c$ ) 50 °C
  - Flüssigkeitsunterkühlung ( $\Delta t_{cu}$ ) 2 K

tur. 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.

### Bewertung des Leistungsverhaltens über „Integrated Part Load Values“

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 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 Vollast-Bedingungen.

Der nachfolgende Vergleich (Bild 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 etwa 80% der gesamten Laufzeit entsprechen.

#### 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 Manufacturers