

# Schnellaufende Radialverdichter mit Direktantrieb für Kältemaschinen

Klaus Hartmann, München

*Dieser Aufsatz beschreibt die bei der Entwicklung von direkt angetriebenen ölfreien Radialverdichtern geringer Leistung (z. B. 35–350 kW) erzielten Fortschritte. Zu der für eine erfolgreiche Anwendung erforderlichen Technologieentwicklung gehören schnellaufende Motoren und Antriebe, die Radialaerodynamik, ölfreie Lager, Regelorgane, die Systemgestaltung und Wärmetauscher, die mit umweltungefährlichen Fluorkohlenwasserstoff-Kältemitteln (wie R 134a) betrieben werden.*

Zur Entwicklung und Vorführung dieser Konzeption ist eine Arbeitsgemeinschaft gebildet worden. Dieses zum Teil von NIST und NYSERDA finanzierte Projekt ist jetzt in seinem dritten und letzten Jahr. Nachdem 1996 die Einschätzungen und Präsentationen der Einzelkomponenten und 1997 die Konzeptionsnachweisprüfung des Verdichters beim Forschungszentrum UTRC erfolgreich abgeschlossen wurden, wird nun in den Carrier-Entwicklungslabors in Syracuse ein weiterer Verdichterprototyp einer Konzeptionsnachweisprüfung unterzogen.

## Einführung

Eine der vielen Herausforderungen der Kälteindustrie ist die Entwicklung zuverlässiger, kostengünstiger, hocheffizienter, kompakter und geräuscharmer Verdichtungstechnologien mit hohem Wirkungsgrad zur Versorgung des luft-/wassergekühlten gewerblichen Kälte- und Klimaanlagenmarktes ab ungefähr 35 bis 350 kW. In dieser Übergangszeit gibt es für die Verdichtungs- und Kältemitteltechnik eine Chance zur Entwicklung einer Radialverdichtertechnologie für geringe Leistung mit hohen Drehzahlen. Gegenüber den konkurrierenden Hubkolben-, Schrauben und Spiralverdichtern bieten kleine Radialverdichter bedeutende potentielle Vorteile in bezug auf den Wirkungsgrad (15–20 % bei Auslegungstemperatur), Größe/Gewicht (30–50 % Einsparung) und Teilezahl (30–50 % weniger).

Zu der für eine erfolgreiche Anwendung erforderlichen Technologieentwicklung gehören schnellaufende Motoren und Antriebe, die Radialaerodynamik, ölfreie Lager, Regelorgane, die Systemgestaltung und Wärmetauscher, die mit umweltungefährlichen Fluorkohlenwasserstoff-Kältemitteln (H-HFKW) betrieben werden. Die bislang durchgeführten analytischen Entwicklungen und experimentellen Vorführungen waren ermutigend und haben den Beweis erbracht, daß diese Konzeption technisch realisierbar ist. Vorgestellt wurde u. a. folgendes:

- Schnellaufende, kältemittelgekühlte Motoren mit Direktantrieb
- Regelantriebe mit hohem Wirkungsgrad (Mitte bis obere 90 %)
- Betriebsprüfung kostengünstiger, kältemittelgeschmierter Kugellager
- radialaerodynamische Leistung mit hohem Wirkungsgrad (Mitte 80 % isentrop) über den erforderlichen Betriebsbereich

## zum Autor

Ing. (grad.)  
Klaus  
Hartmann,  
Direktor Quality  
und Training,  
Carrier GmbH,  
Unterschleißheim



Schnellaufende Radialverdichter sind früher schon in manchen Klimaanlagen für Militärflugzeuge eingesetzt worden, wo das Gewicht vorrangig ist und Kostenziele nicht so zwingend sind wie bei gewerblichen Kälte- und Klimasystemen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der Radialverdichter geringer Leistung für Flugzeuganwendungen geht weiter, ebenso wie für andere HLK-Anwendungen, z. B. die Kraftfahrzeugklimatisierung. Die United Technologies Corporation hat eine lange Geschichte technischer Neuerungen bei Radialverdichtern, einschließlich zahlreicher Projekte zu schnellaufenden Radialverdichtern geringer Leistung.

Bei diesen Bemühungen liegt das Schwergewicht auf der Entwicklung und Erprobung der Komponententechnik, die zur Erzielung eines effektiven, kostengünstigen und zuverlässigen Verdichters mit hohem Wirkungsgrad für gewerbliche HLK-Systeme notwendig ist. Die ständigen Verbesserungen der Eigenschaften und Kosteneinsparungen bei Regelantrieben machen diese Konzeption zunehmend gewerblich realisierbar.

### Anwendung

Zu den Zielanwendungen gehören luft- und wassergekühlte Kältemaschinen sowie Dachklimageräte. Nach Abwägung mehrerer Kältemittel, mechanischer Konfigurationen, Motor- und Antriebsoptionen und in Frage kommender Versuchsplattformen wurde für den Konzeptionsnachweis eine für das Kältemittel HFC-134a ausgelegte 100-kW-Maschine gewählt. Der Verdichter wurde für eine Kältemaschine optimiert, die bei einem Auslegungspunkt von 35 °C Außentemperatur und einer gesättigten Saug- bzw. Verflüssigungstemperatur von 7/54 °C arbeitet. Das ergibt ein Verdichtungsverhältnis bei Auslegungstemperatur von ca. 4:1, wobei jedoch genügend Spielraum eingebaut ist, um den Betrieb auch bei höheren Umgebungstemperaturen zu ermöglichen, wenn Verdichtungsverhältnisse bis 4,5:1 auftreten. Unter Zugrundelegung des prognostizierten Betriebsbereichs und Wirkungsgrades müßte diese Auslegung auch für wassergekühlte Systeme, die bei gesättigten Saug- und Verflüssigungsnenntemperaturen von 2/39 °C arbeiten, ein gutes Leistungsverhalten ergeben. Hier liegt das Verdichtungsverhältnis etwas über 3:1.

### Wahl der aerodynamischen Konzeption

Wegen des geringeren Drehzahlbedarfs, der größeren Laufradausführung bei gleicher spezifischer Drehzahl, der Vermeidung hoher Machzahlen am Umfang des Verdichterlaufrades und wegen des Schubausgleichsvorteils wurde anstelle einer einstufigen Bauweise eine zweistufige Verdichterkonzeption gewählt. Gleichzeitig gestattet die zweistufige Verdichterkonzeption

den Einsatz eines Economiser-Kühlkreislaufs. Dies bietet die Möglichkeit, den Kreislaufwirkungsgrad je nach den tatsächlichen Betriebsbedingungen um 5 bis 7 % zu steigern. Es wurden zwei Typen von zweistufigen Bauformen in Betracht gezogen – die Zweistufen-Reihenbauweise und die Rücken-an-Rücken-Bauweise (siehe Abb. 1).

Die Reihenbauweise ist zwar kompakter, erreicht aber aufgrund der relativ scharfen Wendungen, die der Rückführstrom im Umföhrungskanal zu durchfließen hat, einen geringeren Verdichtewirkungsgrad. Infolge dieser Wendeverluste ist der aerodynamische Stufenwirkungsgrad einer zweistufigen Maschine in Reihenbauweise um einiges geringer als der Stufenwirkungsgrad einer gut durchkonstruierten einstufigen Maschine. In der Praxis geht der Economiser-Vorteil einer zweistufigen Maschine oft durch den niedrigeren Kreislaufwirkungsgrad der einzelnen Stufen wieder verloren.

Bei der Rücken-an-Rücken-Bauweise eines zweistufigen Verdichters kann jede Einzelstufe als einstufige Maschine mit entsprechend hohem Stufenwirkungsgrad konstruiert werden. In diesem Fall wird der Kreislaufvorteil des Economisers nicht durch einen niedrigeren Einzelstufenwirkungsgrad in Frage gestellt.

Das Laufrad ist mit Schaufeln ausgestattet, um die Durchlaßfläche des Laufrads zu vergrößern und die Belastung am Auslauf zu verringern. Bei dieser Konstruktion kommen stark gefeilte Schaufeln zur Anwendung (Abb. 2). Dadurch wird der stabile Betriebsbereich vergrößert, was für den Regelbetrieb wichtig ist und bekanntlich den höchsten Verdichtewirkungsgrad erzeugt. Bei Anwendungen mit geringer Leistung wird das verbesserte Längenverhältnis des Gasdurch-

gangs zu einem wesentlichen Vorzug der stark gefeilten Konstruktionsweise.

Um einen maximalen Stufenwirkungsgrad zu erzielen, wurde für jede der zwei Stufen das bereits bei einstufigen Kälte-

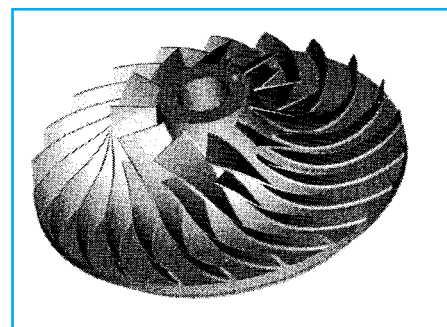


Abb. 2 Prototyp-Laufradkonstruktion

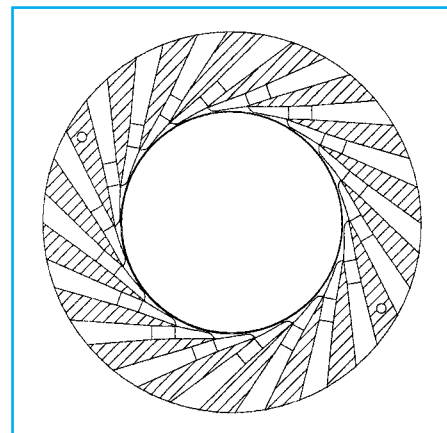
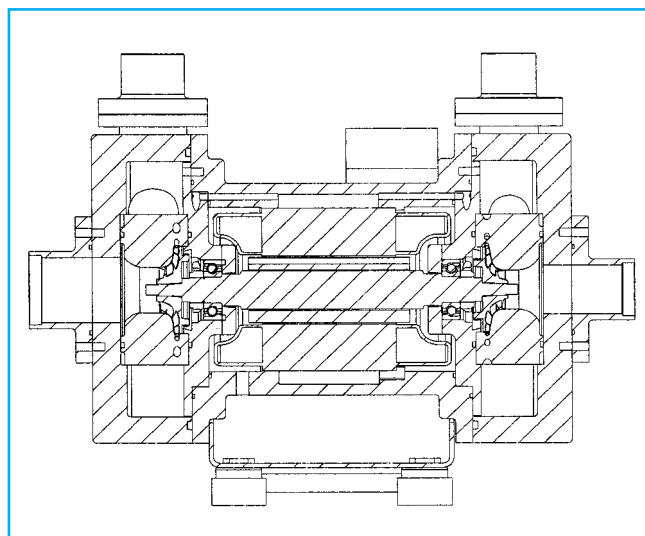


Abb. 3 Prototyp-Rohrdiffusorquerschnitt

mittelverdichtern hoher Leistung erfolgreich angewendete Rohrdiffusorprinzip (Abb. 3) gewählt. Eine Unsicherheit bestand bei dieser Konstruktion darin, in welchem Maße sich die Reynoldssche Zahl auf den von der Technologie mit hochgefeiltem Laufrad/Rohrdiffusor/Sammler bei Radialverdichtern hoher Leistung (700 bis 5000 kW) demonstrierten Wirkungsgrad verringernd auswirken würde. Erste Berechnungen ergaben eine Reynoldssche Zahl von 500 000 für ASME-Verdichter, d. h. ein Zehntel kleiner als die Reynoldssche Zahl bei Großverdichtern, wie sie bei Turbokältemaschinen hoher

Abb. 1 Querschnitt eines Radialverdichters in zweistufiger Rücken-an-Rücken-Bauweise



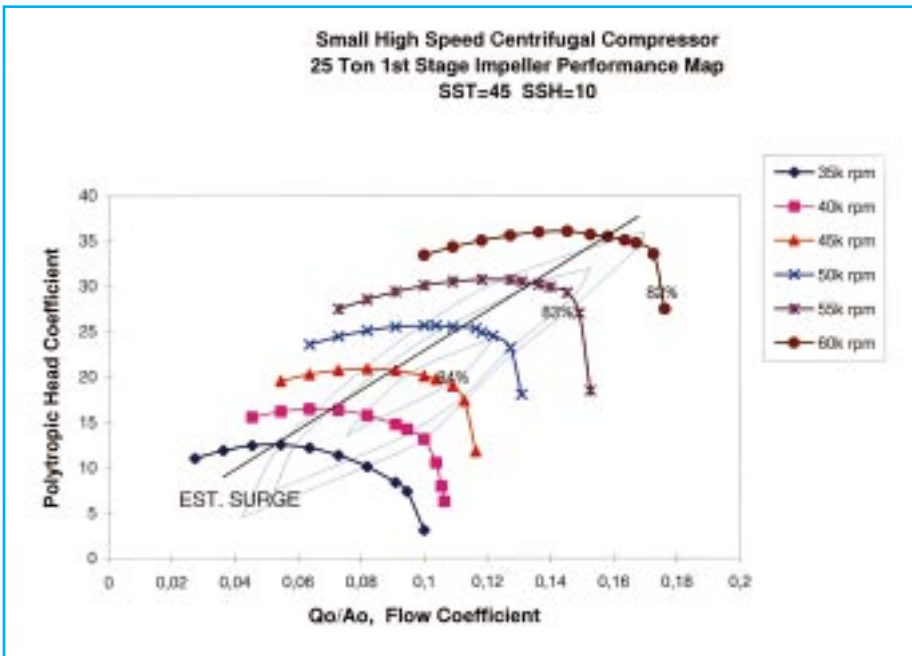


Abb. 4 Prognostizierte Förderleistung der 1. Stufe

Kälteleistung zur Anwendung kommen, aber für Luftverdichter noch recht hoch. Von Luftverdictern mit dieser Reynoldsschen Zahl und Diffusoren mit unzeitigem Durchgang ist berichtet worden, daß sie Wirkungsgrade weit über 80 % erreichen.

Das carriereigene Modellprogramm für die mittlere Stromlinienleistung prognostizierte für den Stufenwirkungsgrad einen Spitzenwert von 84 % (siehe Abb. 4).

### Mechanische Konstruktion

Die Konstruktion des Verdichterprototyps für den Konzeptionsnachweis ergibt eine einfache Maschine mit bedeutend weniger Gesamtteilen und beweglichen Teilen als bei den meisten Verdrängungsverdictern. Wie in Abb. 5 gezeigt, sind es 15 Hauptteile. Der kompakte 100-kW-Prototypverdichter wiegt etwa 40 kg und mißt ca. 38 cm in der Länge und 24 cm im Durchmesser. Nach Berücksichtigung des für den Betrieb des Radialverdicthers bei Auslegungsdrehzahl notwendigen Regelantriebs stellt dies immer noch eine Ge-

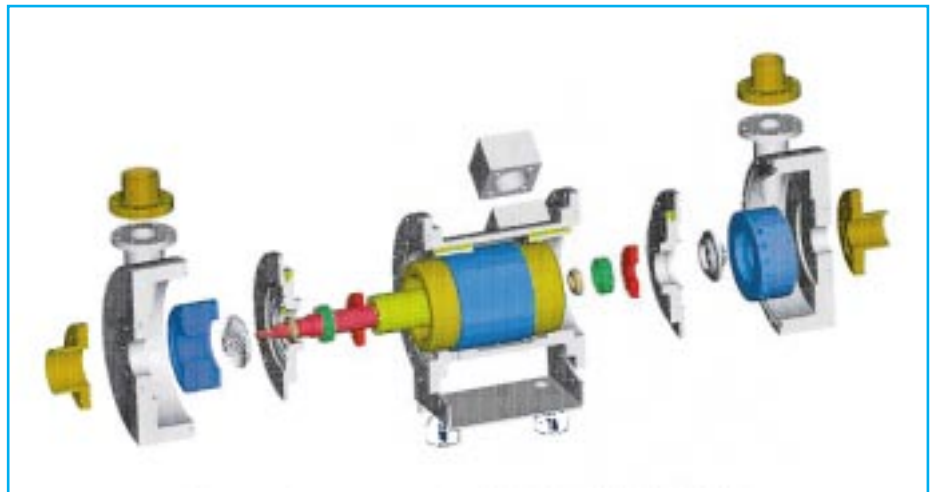


Abb. 5 Perspektivschnitt durch einen 100 kW-Prototypverdichter

wichtseinsparung von 30 bis 50 % gegenüber anderen Verdichtungstechnologien dar.

Über Einzelheiten zu den kritischen Drehzahlen, zur Lagerauswahl und Motorkühlung ist schon früher berichtet worden. Der Verdichter ist ölfrei, d. h. seine Lager werden vom Kältemittel geschmiert. Ein vorrangiger Aspekt bei der Konstruktion war der Wärmehaushalt für den kompakten Schnellläufermotor und die Lager. Die Labyrinthdichtungen zur Minimierung der Leckage am Laufradumfang sowie aus jedem Lagerhohlraum in das Motorgehäuse wurden sorgfältig für die hohen Betriebsdrehzahlen durchkonstruiert.

Die Montageprozesse sind anhand von zwei verschiedenen Konzeptionsnachweis-Prototypverdichtern überprüft und ausgefeilt worden. Diese Maschinen wurden zu Kontrollzwecken und zur funktionellen Bewertung mehrmals montiert und zerlegt. Erste Schätzungen der Fertigungs- und Montagegänge versprechen relativ geringe Investitionskosten und eine kostengünstige Fertigung für den Fall, daß eine Entscheidung zugunsten der Kommerzialisierung dieser Technologie fallen sollte.

Für den Prototyp wurden zwei Motor Konstruktionen realisiert. Der erste Prototyp ist mit einem Induktionsmotor mit einer Nennleistung von 20 kW bei 47 000 U/min ausgestattet. Prüfungen mit einer Schnellläuferpendelmaschine ergaben einen elektromagnetischen Wirkungsgrad von 94 % bei Vollast, wobei der Verlauf der Wirkungsgradkurve über den gesamten Betriebsbereich relativ flach war. Es ist noch ein zweiter Motor entwickelt worden, der demnächst einer Leistungsprüfung mit Pendelmaschine unterzogen

## Versuchsergebnisse

Im vergangenen Jahr ist in einem Entüberhitzerwerk bei UTRC mit Einspielprüfungen des ersten Prototyps begonnen worden. Zunächst lag dabei das Schwergewicht auf dem thermischen und mechanischen Leistungsverhalten. Die Überprüfung der Lagerschmierung und des Funktionierens des Motor- und Lagerkühlsystems konnte abgeschlossen werden. Die Lager- und Motorwicklungstemperaturen haben sich als sehr gut durch Schmierzustände beherrschbar erwiesen, und eine angemessene Filterung des Schmier-systems hat sich als zweckmäßig herausgestellt. Eine vielstündige Erprobung über einen Bereich von Drehzahlen hat einen recht konstanten Verdichterwirkungsgrad über einen weiten Betriebsbereich ergeben. Das Schwergewicht verlagert sich nunmehr auf genaue Leistungsprüfungen und die Einschätzung der Komponentenverlustverteilung (aerodynamisch, mechanisch usw.).

Seit April 1998 läuft in den Carrier-Labors in Syracuse ein zweiter Prototyp als Teil einer Kältemaschinen-Systemgesamtbewertung. Als Versuchsplattform dient eine modifizierte wassergekühlte Kältemaschine. Die Versuchsanordnung ist so gestaltet, daß gewünschte Kombinationen von Saug- und Druckverhältnissen des Verdichters zur Simulation luft- oder wassergekühlter Anwendungen erzeugt werden können. Bei diesem zweiten, in einem kompletten System laufenden Prototyp ist der schon bei der Entüberhitzererprobung beobachtete weite Betriebsbereich doppelt so groß. Auch hier lag zunächst das Schwergewicht auf dem Wärmehaushalt und dem mechanischen Leistungsverhalten des Verdichters. Wie sich erwiesen hat, reagieren die inneren Lager- und Motortemperaturen sehr gut auf Veränderungen des Schmier-systems. Die ersten Versuchsergebnisse haben die aerodynamischen polytropen Spitzenwirkungsgrade (gesamt zu statisch) der Verdichterstufen nahe der Entwicklungsziele bestätigt.

Eine bedeutende Herausforderung betraf die elektrische Rauschstörung zwischen der Kombination aus Hochfrequenzregelantrieb und Motor des Konzeptionsnachweisprototyps und dem Datenerfassungssystem mit Druckmeßwandlern, Thermo-elementen und Leistungsanaly-satoren. Diesem Thema muß besondere Aufmerksamkeit entgegengebracht werden, da die Datenerfassung gegenüber Zufallsrauschen sowie systematischen Fehlern anfällig ist.

Abb. 6 zeigt den Versuchsaufbau und die Anordnung der Meß- und Prüfinstrumente für die Kältemaschinensystemkom-

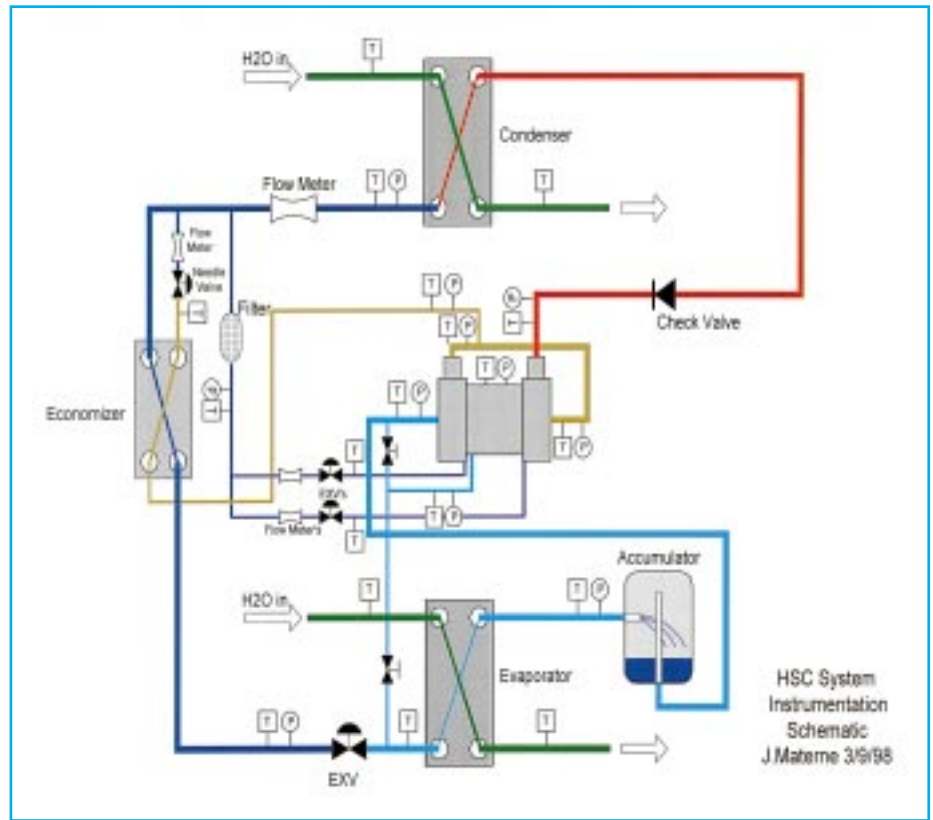


Abb. 6 Systeminstrumentierung

ponentenprüfung. Bei diesem System kommen für Verflüssiger, Verdampfer und Economizer gelötete Plattenwärmetauscher zur Anwendung. Elektronische Expansionsventile ermöglichen eine Einzelkontrolle über jeden Lagerschmierweg. Die Inneninstrumentierung des Verdichters umfaßt Thermo-elemente an den Lagern, Motorwicklungen, am Luftspalt zwischen Läufern und Ständer, am Kühlmantel und am Ein- und Ausgang jeder Stufe. Druckmessungen finden am Ein- und Ausgang jeder Stufe sowie in jedem Hilfskältemittelstrom statt. Damit wird beabsichtigt, das Gesamtverhalten sowie auch das Leistungsverhalten der Einzelkomponenten genau messen zu können und die Möglichkeiten zur Verbesserung der Ausgangskonstruktion einzuschätzen.

Ein weiterer interessanter potentieller Vorzug dieser Technologie besteht in den großen- und gewichtsmäßigen Auswir-

kungen auf das komplette Kälte-System. Das hier als Versuchsplattform verwendete wassergekühlte Kältemaschinenprodukt könnte beispielsweise mit einem schnelllaufenden Radialverdichter ungefähr 30 % kleiner sein und etwa 20 % weniger wiegen.

## Zukunftspläne

Der Schwerpunkt der Erprobungen verschiebt sich von der Funktionalität zum Leistungsverhalten. Die analytischen Einschätzungen zu jeder Einzelkomponente des Verdichters ergaben die Möglichkeit zu einem 10 bis 20 %igen Auslegungspunktvorteil gegenüber den konkurrierenden Verdichtertechnologien. Die verbleibenden Programmpunkte haben die Überprüfung dieser Prognosen und die Untersuchung des gesamten Umfangs und der Verdichterleistung über den erforderlichen Betriebsbereich für luft- und wassergekühlte gewerbliche HLK-Anwendungen zum Ziel. □

### Literatur

Brondum, D. C., Materne, J. E., Biancardi, F. R., Pandey, D. R., High Speed, Direct-Drive Centrifugal Compressor for Commercial HVAC Systems, 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue