

R 410A – Das Leistungsverhalten von Kältemaschinen beim Betrieb im überkritischen Bereich*

Klaus Hartmann und Tedy Kunicic, Unterschleißheim

Das Kältemittel R 410A hat eine kritische Temperatur (die Temperatur, bei der ein Zweiphasengemisch nicht mehr existieren kann), die erheblich unter den Werten der anderen üblichen Kältemittel liegt. Unter bestimmten Bedingungen, die zu hohen Außenlufttemperaturen führen können, besteht daher die Gefahr, daß der Verflüssiger eines luftgekühlten Klimagerätes nicht mehr als Verflüssiger arbeiten kann, sondern anfangen wird, als simpler Gaskühler zu funktionieren. Dementsprechend ändert sich auch das Leistungsverhalten des Klimagerätes und der Kältekreislauf kann instabil werden.

Wird der Verflüssigerdruck rapide ansteigen? Wird die Verdampferleistung drastisch zurückgehen? Werden Verdichterantriebsleistung und Verflüssigungstemperatur sehr schnell zunehmen? Diese und andere Fragen sind zu beantworten, wenn Systementwickler und Installateure die neuen Kältemittel verwenden und sich zwangsläufig mit den Einsatzgrenzen beschäftigen müssen.

Dieser Fachaufsatz vermittelt einige Antworten durch eine Analyse der Kältemittel-Eigenschaften nahe und über den kritischen Verhältnissen, Tests an gebauten Kältesystemen, die Entwicklung von Modellen für luftgekühlte Verflüssiger unter und über den kritischen Bedingungen und Verwendung von kompletten System-Modellen für diese Betriebszustände.

Einführung

Die Verbotsverordnung für R 22 hat zu einer erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaktivität auf dem Gebiet der Alternativkältemittel geführt. Das chlorfreie FKW-Kältemittel R 410A wurde für kompakte Klimageräte aus mehreren Gründen als Alternative zu R 22 ausgewählt. Erstens hat R 410A die gleiche Klassifikation für Toxizität und Entflammbarkeit wie R 22, d. h. nach ASHRAE Standard 34 und Underwriters Laboratory (UL): gering toxisch und nicht brennbar. Zweitens besitzt R 410A eine zu vernachlässigende kleine Fraktionierung mit einem Temperaturgleit von weniger als 0,6 K. Vom Servicestandpunkt aus betrachtet ist diese Eigenschaft sehr vorteilhaft. Drittens ist die totale System-Wärmeübertragung bei R 410A höher als bei R 22, woraus sich ein besserer Wirkungsgrad ergibt oder die Wärmeübertragerflächen reduziert werden können. Schließlich hat R 410A kein Ozonabbau-potential, verglichen mit 0,05 bei R 22 [1].

In Gebieten mit hohen Außentemperaturen stellen sich bei luftgekühlten R 410A-Kälteaggregaten u. a. folgende Fragen:

- Können bei normalem Betrieb auf der Hochdruckseite überkritische Zustände auftreten?
- Was sind die Konsequenzen superkritischer Zustände?
- Systemdruck?
- Kälteleistung des Systems?
- Verdichterantriebsleistung, Verdichtungsendtemperatur?
- Welche Auslegungskriterien können die Effekte einer superkritischen Betriebsweise minimieren?

* Als Vortrag gehalten am 24.11.2001 anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV in Ulm.

zu den Autoren

**Ing. (grad.)
Klaus
Hartmann,**
Berater
der Geschäfts-
leitung,
Carrier GmbH &
Co. KG, Unter-
schleißheim



**Dipl.-Ing. (FH)
Tedy Kunicic,**
System-
Produkt-
Spezialist,
Carrier GmbH &
Co. KG, Unter-
schleißheim



Kältemittel – Grundeigenschaften

Es bestehen einige Unterschiede zwischen R 410A und R 22. Zuerst wäre zu nennen, daß R 410A als Gemisch aus je 50 Gewichtsprozenten R 32 und R 125 besteht und sich nahezu azeotrop verhält. R 410A ist zweitens aufgrund seiner hohen Polarität der R 32-Moleküle ein besseres Lösungsmittel als R 22. Verunreinigungen bleiben damit eher als Schwebstoffe im R 410A und zirkulieren durch das Kältesystem. Zum dritten hat R 410A eine größere Dampfdichte als R 22. Für die gleiche Systemkälteleistung benötigen

beide Kältemittel annähernd den gleichen Massenstrom. Bei gleich großen Rohrquerschnitten der dampfführenden Leitungen sind die Geschwindigkeiten bei R 410A etwa 30 % geringer als bei R 22. Viertens: die in den R 22-Verdichtern eingefüllten Mineralöle und Alkylbenzene sind mit R 410A nicht mischbar, müssen folglich gegen mischbare Öle ausgetauscht werden. Polyesteröle (POE) wurden von den Verdichterherstellern als bester Schmierstoff für Anwendungen in Split-Systemen ausgewählt. Als letztes muß schließlich auf den um 50 bis 70 % höheren Betriebsdruck hingewiesen werden, der auch von dem System-Wirkungsgrad mit beeinflusst wird.

In Tabelle 1 sind einige der maßgeblichen thermodynamischen Eigenschaften der üblichen und verbreiteten Kältemittel zusammengestellt [2].

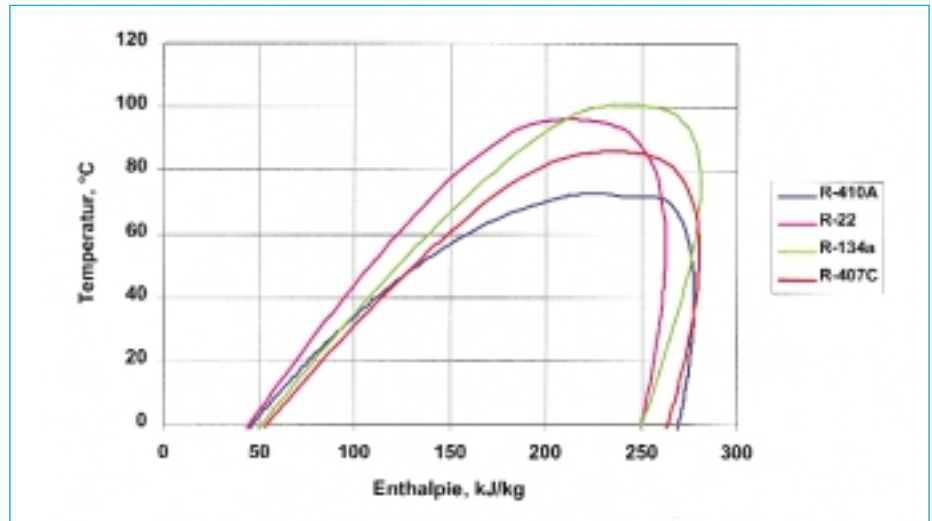


Bild 1 Temperatur/Enthalpie-Diagramm verschiedener Kältemittel

Kältemittel	R 22	R 134a	R 407C	R 410A
Molekulargewicht	86	102	86	73
Kritische Temperatur, °C	96	101	87	73
Kritischer Druck, kPa	4978	4068	4819	4964
Gesättigter Dampfdruck bei 10 °C, kPa	682	414	648	1082
Druck/Temperaturempfindlichkeit bei 10 °C, kPa/K	19,9	13,7	21,1	32,3

Tabelle 1 Grundeigenschaften verschiedener Kältemittel

Aus Tabelle 1 können folgende Besonderheiten für R 410A entnommen werden:

1. Niedrige kritische Temperatur
2. Hoher gesättigter Dampfdruck
3. Hohe Druck-/Temperaturempfindlichkeit

etwa die gleiche Enthalpie. Bei Erreichen der Sättigungstemperatur von 72,5 °C geht bei R 410A der Wärmeinhalt sehr schnell gegen 0, während er bei den anderen Kältemitteln relativ hoch bleibt.

Kreisprozeßeigenschaften bei $t_0 = 7,2 \text{ °C}$; $t = 54,4 \text{ °C}$ (45F/130F); ohne Überhitzung und Unterkühlung [3]:				
Kältemittel	R 22	R 134a	R 407C	R 410A
COP-Kühlung	4,51	4,45	4,39	4,19
Kreisprozeßwirkungsgrad, %	75,9	74,9	74,0	70,6
Druckverhältnis	3,44	3,91	3,69	3,36
Kältemittel-Massenstrom, kg/h/kW	25,5	28,1	25,4	24,9
Verdichter-Hubvolumen, m ³ /h/kW	0,016	0,025	0,016	0,011

Tabelle 2 Kreisprozeßeigenschaften verschiedener Kältemittel

Kältemittel – Verhalten im überkritischen Bereich

Bild 1 zeigt die Gegenüberstellung der Grenzkurven in einem Temperatur/Enthalpie-Diagramm. Unter ca. 40 °C haben alle gezeigten Kältemittel in

In Bild 2 sind die Hauptunterschiede des Verhaltens von R 410A unter und über dem kritischen Punkt gegenübergestellt. Auffällig ist der scharfe Übergang von Dampf in Flüssigkeit im unterkritischen Bereich im Gegensatz zu dem allmählichen Verhalten oberhalb des kritischen Druckes. Ebenfalls kann beobachtet werden, daß die Dichte der Flüssigkeit

etwas druckabhängig ist. Die Arbeitsweise des Expansionsorgans wird allerdings dadurch nicht drastisch beeinflusst.

Wie auf Bild 3 anschaulich zu sehen, ist die spezifische Wärme nahe des kritischen Punktes sehr groß; ein Vorteil, der den Wärmeübergang verbessert.

Bild 4 zeigt den berechneten Wärmeübergangskoeffizienten sowie die Druckverluste von Rohrleitungen bei Betriebsbedingungen geringfügig über dem kritischen Druck. Zu beachten ist hierbei ein scharfes Kurvenmaximum beim Wärmeübertragungskoeffizienten und auch, daß die Koeffizienten bei Flüssigkeit und Dampf annähernd gleich groß sind. Die Druckverluste in den Rohrleitungen hingegen steigen stetig an.

Gerätetests im Labor

In den Laborversuchen wurden zwei unterschiedliche Gerätetypen verwendet; eines mit Rollkolben-, das andere mit Scrollverdichter. Die Tests wurden bei Normaltemperaturen sowie erhöhten Außenluftzuständen vorgenommen, welche die Hochdruckseite über den kritischen Betriebszustand brachten.

Zusammenstellung der technischen Daten der Testgeräte:

- Gerätetype: Split-Klimageräte
- Nennkälteleistung: 2,9 kW und 7,0 kW
- Verdichterarten (hermetisch): Rollkolben, Scroll
- Kältemittel: R 410A

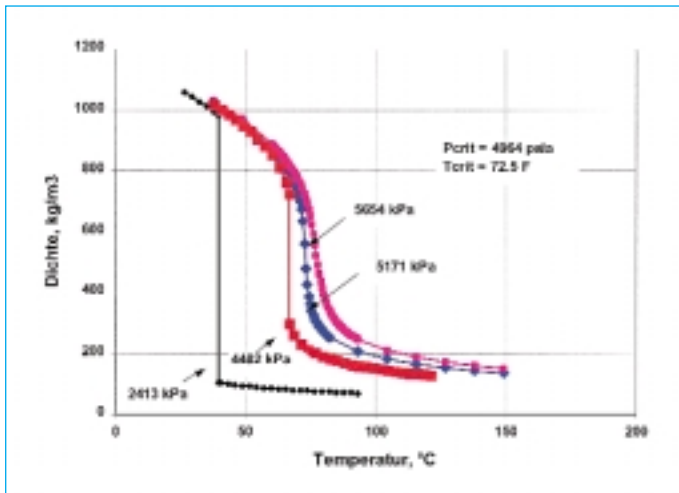


Bild 2
Dichte von R 410A
als Funktion
von Druck und
Temperatur

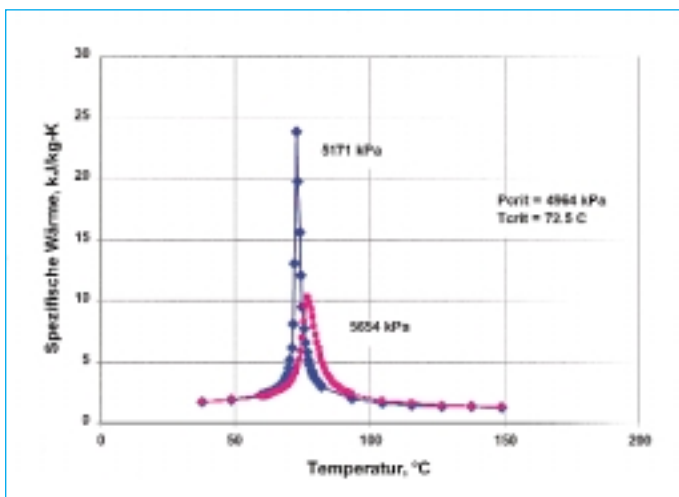


Bild 3
Spezifische Wärme
von R 410A
in Abhängigkeit
von Temperatur
und Druck

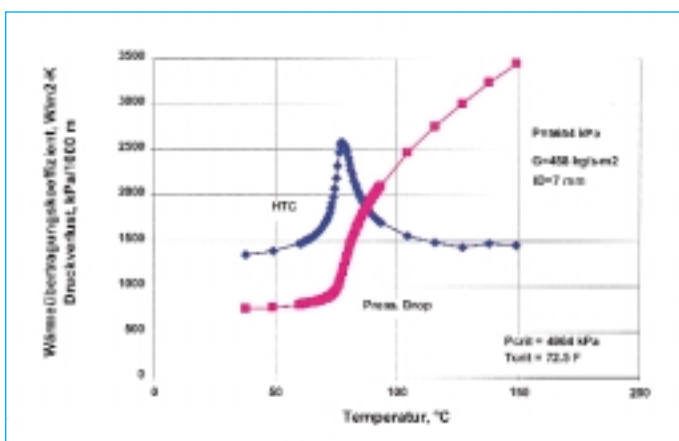


Bild 4
Kältemittel-
druckverlust und
theoretische
Wärmeübertragungs-
koeffizienten bei
superkritischem
Betrieb von R 410A

Modellentwicklung

Für das Verhalten unterhalb des kritischen Punktes sind vorhandene Computermodelle benutzt worden, während für den überkritischen Bereich neue Berechnungsmodelle entwickelt wurden.

Nachstehend sind die generellen Vorteile der Modellkomponenten für den überkritischen Bereich aufgelistet. Es stellte sich heraus, daß die konventionellen (unterkritischen) Modelle gut für Verdampfer, Einspritzorgan und Verdichter arbeiten. Der superkritische Gaskühler erfordert jedoch ein komplett neues Computermodell. System-Simulation:

- Verdampfermodell konventionell
- Verdichtermode ll konventionell
- Expansionsorgan konventionell
- Subkritischer Gaskühler (Verflüssiger)
 - Doppelrohr, kurze zunehmende Abstufungen entlang jeden Rohres
 - Einphasen-Wärmeübertrager
 - Variable spezifische Wärme und Dichte des Kältemittels R 410A

Man fand heraus, daß die Kältemite leigenschaften sowohl thermodynamisch als auch hinsichtlich des Kältemitteltransportes aus dem neuen Modell REFPROP 5 sehr zufriedenstellend für den Betrieb unterhalb und oberhalb des kritischen Punktes sind.

Modellstudien

Der Gaskühler arbeitet als einfacher Wärmeübertrager und normalerweise würde es eine sehr simple Modellierung sein, wenn nicht die beträchtliche Änderung der spezifischen Wärme nahe des kritischen Punktes zu berücksichtigen wäre. Dieser Umstand verhindert auch die Verwendung der sonst üblichen mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz.

Zur Modellierung wird der Gaskühler in sehr viele schmale Elemente entlang jedes Kältemittelrohrs eingeteilt, Nachstehende Gleichungen verdeutlichen die charakteristischen Merkmale der Basiselemente vom Kreuzstrom-Wärmeaustausch zwischen Kältemittel- und Luftströmen.

$$T_2 = (T_1 - T_3) (1 - e^{-K^2})$$

- Außenwärmeübertrager: Kreuzstrom, einreihig und zweireihig
- Innenwärmeübertrager: Kreuzstrom-Gegenfluß, zweireihig
- Expansionsorgan: kurze Rohrblende

- Testbedingungen: Außentemperatur 35 °C und höher; Innentemperatur 26,7 °C
- Aufgezeichnete Daten: Kälteleistung, Verdichterkraftbedarf, Kältemittel-Temperaturen und -drücke, Luft-Temperaturen

Es bedeuten: T_1 = Kältemittel-Eintrittstemperatur
 T_2 = Kältemittel-Austrittstemperatur
 T_3 = Lufteintrittstemperatur
 K_2 kann aus folgender Formel berechnet werden:

$$K_2 = (mc_p) / (M\Delta c_p) (1 - e^{-K_1})$$

Es bedeuten: M = Luftmenge
 c_p = spezifische Wärme Luft
 M = Kältemittel-Massenstrom
 Δc_p = mittlere logarithmische Wärme des Kältemittels
 $\Delta c_p = (c_{p2} - c_{p1}) / \ln(c_{p2}/c_{p1})$
 c_{p2} = spezifische Wärme des austretenden Kältemittels
 c_{p1} = spezifische Wärme des eintretenden Kältemittels

K_1 kann mittels folgender Formel berechnet werden:

$$K_1 = (U_0 A_0 / mc_p)$$

Es bedeuten: U_0 = gesamter Wärmeübertragungskoeffizient
 A_0 = gesamte Wärmeübertragerfläche des Elementes

K_1 bedeutet ebenfalls die Anzahl der Übertragungseinheiten (NTA) für das Element. Die Wärmeübertragungsmenge Q für dieses Element ergibt sich zu:

$$Q = M\Delta c_p (T_1 - T_2)$$

Für genauere Vergleiche wurde auch eine mittlere logarithmische Kältemittel-Enthalpie eingeführt. Die Berechnung erfolgt schrittweise entlang der Kältemittelrohre vom Eintritt zum Austritt. Die im Labor gemessenen Daten wurden mit der Rechnung verglichen und bestätigen das Modell.

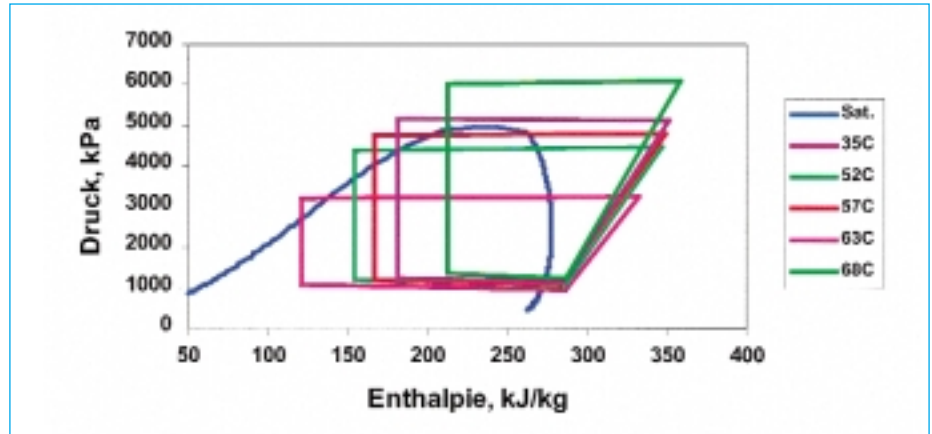


Bild 5 h/loge-Diagramme für Verflüssiger mit niedrigem NTU

Ergebnisse der Systemsimulation System-Leistungsdiagramme

Es wurde eine Systemsimulation zum Übergang zwischen unterkritischen (welche akkurat durch ein konventionelles Modell vorausgesagt wurden) und überkritischen Betriebszuständen entwickelt. Die Simulation wurde dann dazu benutzt, um System-Leistungsdiagramme für verschiedene Gerätetypen aufzustellen.

Bild 5 zeigt die Folge der System-Punkte mittels h/loge-Diagrammen, wenn sich das Klimagerät dem kritischen Punkt annähert und diesen Zustand dann durchläuft. Besonders zu beachten ist eine fast stetige Progression der Flüssigkeits-Entropie und die entsprechende Verminderung der spezifischen Kältemenge. Außerdem bemerkt man keine scharfe Abweichung vom Trend der überkritischen Betriebsweise.

Bemerkenswert ist ebenfalls, daß der Hochdruck auf den etwa zweifachen Wert gegenüber Normalbedingungen bei 35 °C ansteigt.

In Bild 6 ist das berechnete Leistungsdiagramm eines Kälteaggregates mit einem Verflüssiger mit niedrigem NTU (0,5, einreihig) und einem hohen Wert für Luftmenge/kW Kälteleistung (CFM/TON = 900, bzw. 150 m³/h/kW) dargestellt. Die Ergebnisse sind auf ihre Werte bei 35 °C normalisiert, ausgenommen des Verdichterenddruckes, der auf den kritischen Druck bezogen ist.

Von der grünen Verdichterenddruckkurve (P_{disch}) kann abgelesen werden, daß der kritische Zustand bei Außentemperaturen von 60 °C erreicht wird. An diesem Punkt beträgt die Kälteleistung (CAPE) nur noch ca. 60 % der Nennleistung mit 35 °C Außentemperatur, der Verdichterkraftbedarf beläuft sich auf 160 % gegenüber Normalbetrieb (rote Kurve POWC) und der Kältemittel-Massenstrom (FLOW) ist auf 90 % zurückgegangen.

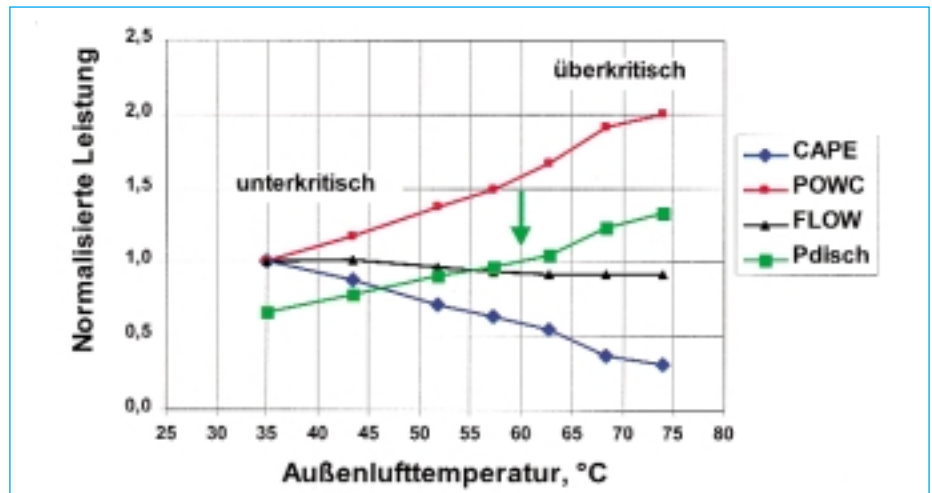


Bild 6 Leistungsdiagramm eines Kälteaggregates mit niedrigem Verflüssiger-NTU und hoher Luftmenge (CFM/TON = 900; bzw. 150 m³/h/kW)

Bei Außenlufttemperaturen über 60 °C hält dieser Trend zwar an, doch in veränderter Relation. Bei ca. 70 °C wächst der Verdichterenddruck auf 130 % des kritischen Druckes an, die Kälteleistung fällt bis auf 30 % der Nennleistung ab, die Antriebsleistung steigt bis auf 190 %, während der Kältemittel-Massenstrom bei 90 % ziemlich konstant bleibt.

Abbildung 7 zeigt das Leistungsdiagramm eines luftgekühlten Kälteaggregates mit einem Verflüssiger mit hohem NTU (0,9, zweireihig) und einem niedrigen Kennwert für Luftmenge/kW Kälteleistung (CFM/TON = 640; bzw. 105 m³/h/kW).

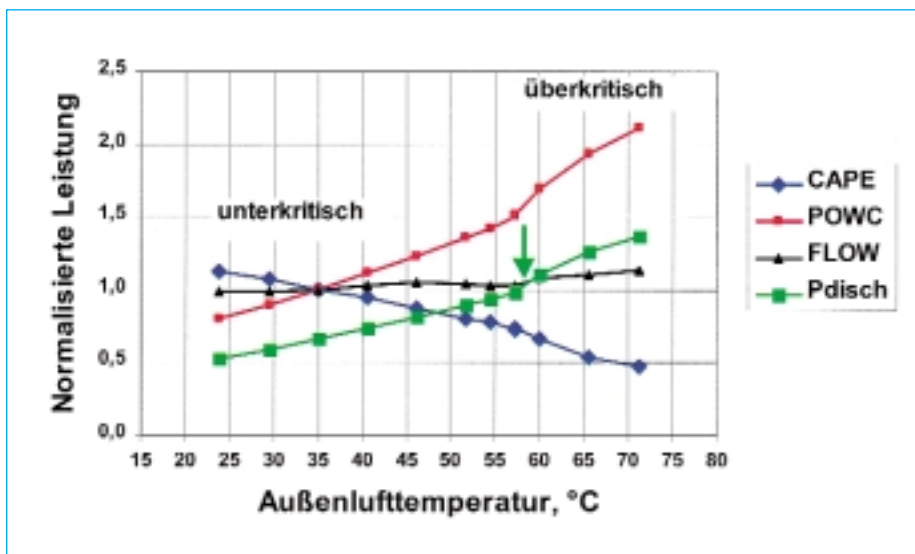


Bild 7 Leistungsdiagramm eines Kälteaggregates mit hohem Verflüssiger-NTU und niedriger Luftmenge (CFM/TON = 640; bzw. 105 m³/h/kW)

In diesem Falle bewirkt die geringere Luftmenge, daß der kritische Punkt bei ca. 57 °C erreicht wird, im Gegensatz zu 60 °C beim vorherigen Gerät. Infolge des größeren Verflüssigers NTU bleibt jedoch die Systemleistung ziemlich hoch. Bei diesem Betriebspunkt fällt die Kälteleistung auf 70 % der Nennleistung, die Antriebsenergie beträgt 150 % und der Massenstrom 105 %. Dieses Kälteaggregat ist mit einem Scrollverdichter ausgestattet, was sicher auch einen Einfluß auf den relativ hohen Kältemittel-Massenstrom haben dürfte. Beim vorherigen Aggregat war ein Rollkolbenverdichter eingebaut.

Bei höheren Außentemperaturen fällt die Leistung nicht so rapide ab wie beim ersten Gerät. Bei 70 °C steigt der Verdichterenddruck auf etwa 140 % an, die Kälteleistung fällt auf 50 %, die Verdichterantriebsleistung steigt bis auf 210 % und der Massenstrom auf 115 %.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen sowohl im Labor als auch in zahlreichen ausgeführten Anlagensystemen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Standard-Simulationsmodelle sind gut geeignet für Werte auf der Hochdruckseite bis etwa 95 % des kritischen Druckes, wenn die üblichen Korrekturfaktoren für Verdichtereistung, Wärmeübertrager und Druckverluste verwendet werden.

- Bei Außentemperaturen nahe bzw. am kritischen Punkt, wird die Kälteleistung ca. 60–70 % der Vollastleistung bei 35 °C Außenlufttemperatur betragen. Der Verdichterkraftbedarf hängt maßgeblich von der Verdichtertypen ab und dürfte in Größenordnungen zwischen 110–160 % der Auslegungsbedingungen liegen.
- Die Systemleistung bei hohen Außentemperaturen kann verbessert werden, wenn die Verflüssigereinheit mit einem Speziallamellenwärmetauscher NTU (größer als 1,0) sowie höherer Luftmenge (größer als 165 m³/h/kW) ausgeführt ist.

R 410A wurde als realisierbare Alternative für R 22 erfolgreich in Kompaktklimageräten eingeführt. Anforderungen zur Systemauslegung werden beherrscht und Konstruktionsvorteile, wie kleinere Wärmeübertragerflächen und Verdichter, sind erreichbar. Auch Montageprobleme und -erfordernisse können durch entsprechende Ausbildung des Servicepersonals erkannt und gelöst werden.

Seit Abschluß des Feldversuches sind in den USA inzwischen weit über 100 000 Wärmepumpen und eine erheblich größere Anzahl Kompaktklimageräte mit R 410A gefertigt und montiert worden. Die Zuverlässigkeitsberichte für diese Anlagen sind ganz hervorragend, was den Wert eines umfangreichen Entwicklungs- und Feldversuchsprogramms unter Beweis stellt. □

Referenzen und Literatur

- [1] Hartmann, K., Erfahrungen mit R 410A-Klimageräten, DIE KÄLTE & KLIMATECHNIK, 1998.
- [2] Bullock, C. E., The Performance of Unitary Air Conditioners Utilizing R 410A at High Outdoor Ambient Temperatures, ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, October 1999.
- [3] Bullock, C. E., Performance Considerations for Refrigerants R 404A & R 410A.
- [4] Hartmann, K., Konstruktionsmerkmale und Betriebserfahrungen mit R 410A-Wärmepumpen, TAB Technik am Bau, 2/2000.
- [5] Hartmann, K., Kunicic, T., Eine unstrittige Entscheidung – R 410A versus R 407C bei Kleinklimasystemen, KKA Kälte Klima Aktuell, 4/2001.