

# Entwicklung eines $\text{NH}_3$ -Standard-Flüssigkeitskühlsatzes mit minimaler Füllmenge

Thorsten Behnert und Holger König, Lindau

Es ist erstmals gelungen, die spezifische Leistung bei  $\text{NH}_3$ -Flüssigkeitskühlern auf Werte unter  $28 \text{ g NH}_3/\text{kW}$  Kälteleistung zu reduzieren. Diese bisher unerreichten Werte konnten durch Kombination der  $\text{NH}_3$ -Direktexpansion mit löslichen Ölen, die Verwendung von Plattenwärmetauschern und Optimierung der Dimensionierung der Rohrleitungen realisiert werden. Die Entwicklungsschritte und die Erprobung wurden erfolgreich abgeschlossen, eine neue Baureihe wurde bereits am Markt mit der Bezeichnung FrigoBox (Bild 1) vorgestellt [1], die Ergebnisse der Detailentwicklung werden im vorliegenden Artikel beschrieben.

Seit dem Phase-Out von FCKW-Kältemitteln [2] und der derzeit zunehmenden Diskussion um die Zukunft der H-FKW-Kältemittel [3, 4] werden  $\text{NH}_3$ -Konzepte mit minimaler Füllmenge und hin zu kleinen Kälteleistungen verfolgt. Dieser Fragestellung sind auch diverse Forschungsvorhaben nachgegangen, so wurden Versuche mit  $\text{NH}_3$  mit Kupferwerkstoffen durchgeführt, der Einsatz von Aluminium in  $\text{NH}_3$ -Anlagen untersucht und erfolgreich im Bereich der Wärmeübertrager eingeführt sowie neue azeotrope Mischungen aus

## zu den Autoren

**Dipl.-Ing. Thorsten Behnert,**  
Entwicklungsingenieur,  
Axima Refrigeration GmbH,  
Lindau



**Dipl.-Ing. Holger König,**  
Leiter  
Entwicklung,  
Axima Refrigeration GmbH,  
Lindau



$\text{NH}_3/\text{DME}$  vorgeschlagen. Als bahnbrechend kann der Einsatz von löslichen Ölen und die Entwicklung von Nickel gelöteten Plattenwärmetauschern bezeichnet werden, obwohl in der ersten Entwicklungs-

phase erhebliche Schwierigkeiten zu lösen waren. Aus heutiger Sicht ist zumindest für den Einsatz von offenen  $\text{NH}_3$ -Kolbenverdichtern die Verwendung von löslichen PAG-Ölen Stand der Technik [5].



Bild 1 FrigoBox mit Schalldämmplatten und wetterfestem Gehäuse

Problematisch ist insbesondere bei kleinen Kälteleistungen die Verfügbarkeit von Komponenten, vor allem Expansionsventilen und Verdichtern bei Kälteleistungen unter 20 kW (Klimaregime). Auch ist die Verwendung der Direktexpansion bei  $\text{NH}_3$  mit einem erheblichen Steuerungsaufwand der Regeltechnik verbunden, neben der Problematik des Öltransportes bei Teillastbetrieb.

### Aufstellungsbereiche zur Anwendung von $\text{NH}_3$

$\text{NH}_3$  ist das älteste Kältemittel für den Kaldampfprozeß. Zur Zeit wird  $\text{NH}_3$  vor allem aus wirtschaftlichen Gründen bei industriellen Kälteanlagen eingesetzt.  $\text{NH}_3$  ist toxisch und grundsätzlich brennbar, das Kältemittel ist in die Sicherheitsklasse B2 der EN 378-1 eingestuft. Aus diesem Grund wurden entsprechende Sicherheitsauflagen entwickelt, und ständig angepaßt.

### $\text{NH}_3$ -Aufstellungsbereiche

Es werden Aufstellungsbereiche [6] für Anwendungen mit direkten und indirekten Systemen unterschieden. Während direkte Systeme derart betrieben werden, daß ein gefährdeter Bereich direkt von kältemittelführenden Komponenten gekühlt werden kann, kommen in der Regel indirekte Systeme bei  $\text{NH}_3$  zum Einsatz. Beispiele sind die Kühlung von Flüssigkeiten, die als Kälte Träger oder Kältemittel wiederum zur Prozesskühlung verwendet werden.

Indirekte Systeme werden durch Kälteanlagen versorgt, die in einem Maschinenraum betrieben werden. Hierzu zählen beispielsweise auch geschlossene Gehäuse, welche nicht von Personen betreten werden können. Werden diese Kälteanlagen im Freien oder in Maschinenräumen aufgestellt, bestehen keine Einschränkungen im Bezug auf die Kältemittelfüllmenge.

Direkte Systeme werden bei Aufstellung in Fabrikationsräumen mit geschultem Personal auf eine Kältemittelfüllmenge von 10 kg  $\text{NH}_3$  beschränkt, unterschreitet die Personendichte einen Wert von durchschnittlich  $\frac{1}{10} \text{ m}^2$ , gilt der Wert von 50 kg bei entsprechend vorhandenen Notausgängen als maximale Füllmenge.

Kälteanlagen, welche in einer Einhausung installiert werden, können somit mit Füllmengen unter 10 kg grundsätzlich im Freien, in Maschinenräumen und in Fabrikationsräumen betrieben werden. Details regeln einschlägige Regelwerke wie [6].

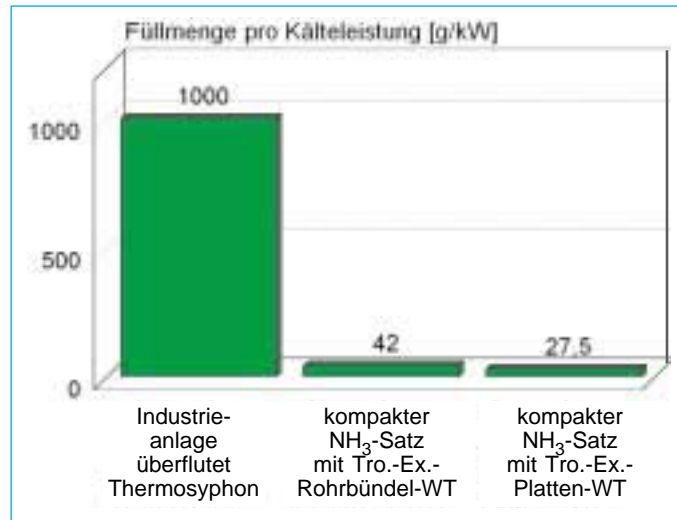


Bild 2 Füllmengen für  $\text{NH}_3$ -Anlagen

### $\text{NH}_3$ -Kältemittelfüllmengen

Die Reduzierung von Kältemittelfüllmengen ist ein generell vorhandenes Bestreben. In Bild 2 sind die Füllmengen für verschiedene kältetechnische Anwendungsfälle und Systeme für  $\text{NH}_3$ -Kälteanlagen grafisch dargestellt.

Während industrielle Kälteanlagen mit überfluteten Verdampfern und Thermosyphon Füllmengen von 1000 g  $\text{NH}_3/\text{kW}$  aufweisen, reduzieren sich die Füllmengen bei kompakten Flüssigkeitskühlern mit Rohrbündelwärmetauschern auf 50 kg  $\text{NH}_3/1200 \text{ kW} = 42 \text{ g } \text{NH}_3/\text{kW}$ . Weiter reduziert werden die Füllmengen auf Werte von 29 g  $\text{NH}_3/\text{kW}$  beim Einsatz von Plattenwärmetauschern. Erreicht werden diese sehr geringen Werte insbesondere durch Direktexpansion und ursächlich durch lösliche Öle.

### Technologische Anforderungen an Flüssigkeitskühler mit minimaler $\text{NH}_3$ -Füllmenge

Ausgelöst durch die Randbedingungen:

- Reduzierung des Einsatzes von treibhausrelevanten Stoffen,
- Steigender Nachfrage nach alternativen Konzepten zur Flüssigkeitskühlung bei kleinen Kälteleistungen (minimaler Bauraum, maximale Kälteleistung),
- Reduzierung der Füllmengen auf minimalste Werte,
- Einsatz von  $\text{NH}_3$ -Direktexpansion und lösliche Öle (Axima SKM-Öl) und
- Verwendung von Nickel gelöteten Plattenwärmetauschern

wurde ein Flüssigkeitskühlsatz mit Kolbenverdichter mit einer Kälteleistung von 100 kW mit rund 3 kg  $\text{NH}_3$ -Füllmenge entwickelt.

### Plattenwärmeübertrager für $\text{NH}_3$ -Direktexpansion

Eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung war die Markteinführung von Nickel gelöteten Plattenwärmeübertragern. Im Gegensatz zu Rohrbündelwärmeübertragern haben diese wesentlich geringere Innenvolumen bei gleicher spezifischer Wärmeübertragerleistung.

Plattenverdampfer für  $\text{NH}_3$  müssen – als eine wesentliche Voraussetzung für den sicheren Betrieb bei unterschiedlichen Lasten und Temperaturen – mit speziellen Einbauten ausgeführt werden. Ohne diese Einbauten kommt es zur Fehlverteilung des eingespritzten  $\text{NH}_3$  mit Minderleistung > 40 %. Das Know-how für die Dimensionierung und das Design der Einbauten war neben der Platzierung des Temperaturfühlers zur Überhitzungsregelung ein wesentliches Entwicklungsziel.

### Randbedingungen zur Füllmengenreduzierung

Bei der Reduzierung der Kältemittelfüllmenge eines Kälteaggregats müssen verschiedene Komponenten hinsichtlich ihrer Füllmenge betrachtet werden. Die herkömmliche Betriebsweise und Aufbau von  $\text{NH}_3$ -Anlagen basiert auf großen Kälteleistungen und auf optimalen Kälteleistungszahlen. Dies führt auf überflutete Bauweise, oft mit Thermosyphonumlauf und einem Sammler. Wird der Leistungsbereich auf kleine Leistungen ausgeweitet, ist eine Verkleinerung der Bauräume und die Verringerung der spezifischen Kosten unumgänglich. Das größte Potential zur Kostenoptimierung besteht hierbei im Verdampfer/Sammler. Bei Verwendung der Direktexpansion kann

- der Sammler entfallen oder von seiner Größe minimiert werden,
- der Thermosyphonumlauf entfallen,
- kompakte Apparate eingesetzt werden.

Die größte Füllmenge bei Einsatz der Direktverdampfung befindet sich dann in der flüssigen Phase im Sammler – wenn vorhanden – und im Verflüssiger.

### Regelung bei NH<sub>3</sub>-Direktexpansion

Neben der Ölrückführung bei Teillast ist die Optimierung der Regelung für die variablen Betriebszustände eines Flüssigkeitskühlsatzes entscheidend.

Thermostatische Expansionsventile sind für die Verwendung mit NH<sub>3</sub> aufgrund der Regelcharakteristik ungenügend anpassungsfähig, vielmehr ist die Verwendung von elektronischen Expansionsventilen sinnvoll. Für elektronische pulsweitenmodulierte Expansionsventile sind spezifische Regelparameter und -strategien notwendig. Zur Regelung wird der Druck und die Temperatur hinter dem Verdampfer erfaßt. Die Öffnungszeiten des Expansionsventils werden dann aus diesen Daten mittels variablen Parametersätzen errechnet.

In Bild 3 ist der Verdampfungsdruck für drei unterschiedliche Soleaustrittstemperaturen über der Zeit dargestellt, wobei der Parametersatz für das pulsweitenmodulierte Expansionsventil nicht verändert wurde. Nur für die Soleaustrittstemperatur 3 (mittlere Kurve) ist der Parametersatz optimal. Dies ist daran zu erkennen, daß der Verdampfungsdruck über den gesamten Zeitraum im tolerierten Bereich liegt. Im Gegensatz dazu ist bei den Soleaustrittstemperaturen 1 und 2 eine deutliche periodische Druckschwankung zu erkennen. Die Schwankungen sind auf das nicht optimal angesteuerte Expansionsventil zurückzuführen. Um eine bessere Regelcharakteristik zu erreichen, muß der Parametersatz in der Regelung den veränderten Temperaturen angepaßt werden.

Die Regelgenauigkeit wird weiterhin durch die Verdampfung des Kältemittels selbst in der Platte beeinflusst. Bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit gelangt zuviel flüssiges Kältemittel aufgrund der Trägheit an die hinteren Platten, was zu einer sehr unterschiedlichen Beaufschlagung mit flüssigem Kältemittel führt. Zu geringe Strömungsgeschwindigkeiten führen hingegen dazu, daß das Kältemittel überwiegend durch die ersten Platten strömt und die hinteren Platten nur wenig zum Wärmeübergang beitragen. Weiterhin

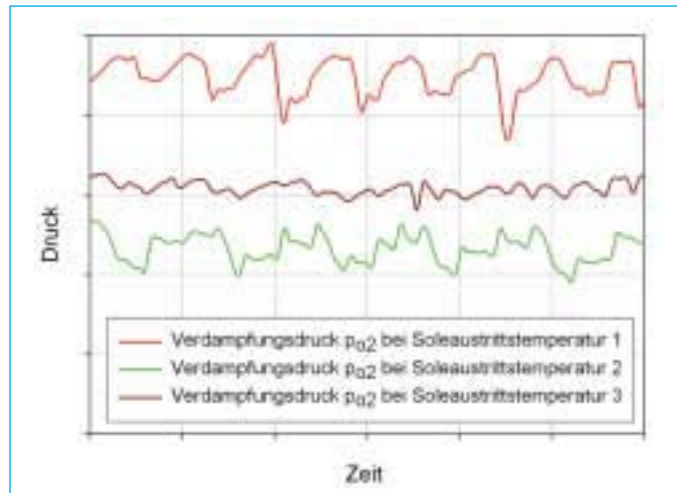


Bild 3 Verlauf des Verdampfungsdruckes nach dem Plattenverdampfer über der Zeit bei variablen Soleaustrittstemperaturen bei festem Parametersatz des pulsweitenmodulierten Expansionsventils

ist die Ölrückführung nicht mehr sichergestellt. Beide Fälle haben zur Folge, daß die Übertragungsfläche nicht vollständig ausgenutzt wird. Es kommt zu einer verminderten Kälteleistung. Nur bei optimaler Strömungsgeschwindigkeit kommt es zu einer günstigen und gleichmäßigen Beaufschlagung des Plattenverdampfers. Dabei ist weiter zu beachten, das zum einen die Strömungsgeschwindigkeit durch konstruktive Maßnahmen nicht variabel gestaltbar und weiterhin die Kälteleistung bei Teillast stark absinkt und somit die Strömungsgeschwindigkeit in den Platten variiert. Um über große Temperaturbereiche die Leistung zu optimieren, sind spezielle Einbauten im Verdampfer unabdingbar.

### Ölrückführung

Da herkömmliche Verdichter einen mehr oder weniger großen Ölwurf aufweisen, gelangt Öl in den gesamten Kältemittelkreislauf. Um Schmiermittelmangel im Verdichter zu verhindern, ist eine gute Ölrückführung auch bei Teillast, beispielsweise bei Kolbenverdichtern durch Zylinderabschaltung bis zu 33 % sicherzustellen. Das kritischste Bauteil ist hierbei aufgrund der geringen Temperaturen und des vertikalen Strömungsverlaufs der Plattenverdampfer. Die Strömungsgeschwindigkeiten in allen Kanälen zwischen den Platten darf einen Minimalwert nicht unterschreiten, so daß das Öl auch bei Teillast aus dem Verdampfer mitgerissen wird. Werden keine Einbauten verwendet, so kann es durch die unterschiedliche Beaufschlagung der Platten mit dem Kältemittel-Öl Gemisch zu sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten in einigen Plattenkanälen kommen. Dadurch kann das Öl in den unteren Teil des Plattenverdampfers zurückfließen. Besonderes Augenmerk ist auch den minimalen Lauf-

zeiten und damit den Umlaufzeiten des Öles zu widmen, bei Start/Stopp-Betrieb kommt es sonst wiederum zum aufakkumulieren des Öls.

Nachdem das Öl aus dem Verdampfer gefördert wurde, kann aufgrund eines positiven Gefälles der Saugleitung auch mit relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten gearbeitet werden, um möglichst geringe Druckverluste zu erreichen.

### Optimierung des Gesamtsystems und Ergebnisse

#### Optimierung der Kältemittelfüllmenge

Die Optimierung der Füllmenge wird um so wichtiger, je geringer die Gesamtfüllmenge des Systems wird. Daß eine optimale Kältemittelfüllmenge existiert, ist einerseits aus zahlreichen Veröffentlichungen bekannt, andererseits durch nachfolgende Erläuterungen einsichtig.

Bei zu geringen Füllmengen sinkt die spezifische Wärmeübertragerleistung im Verflüssiger und Verdampfer aufgrund der geringen Wärmeübertragungskoeffizienten des NH<sub>3</sub>-Gases im Vergleich zur 2-Phasen-Wärmeübertragung. Die fehlende Füllmenge zeigt sich dadurch, daß das NH<sub>3</sub> schon vor dem Expansionsventil teilweise gasförmig vorliegt. Die Kälteleistung des Aggregats sinkt in Folge erheblich. Weiterhin saugt der Verdichter mehr NH<sub>3</sub> aus dem Verdampfer ab, als in Form des 2-Phasen-Fluides durch das Expansionsventil in den Verdampfer eintreten kann. Dadurch sinkt der Druck im Verdampfer weiter. Es ergibt sich ein niedrigerer COP, als bei der optimalen Füllmenge.

Ist die Füllmenge zu groß, wird das NH<sub>3</sub> im Verflüssiger unterkühlt, die Kälteleistung steigt zunächst, jedoch vermin-



dert sich auch die Verflüssigerfläche, die Verflüssigungstemperatur und -druck steigen. Der Verdichter muß eine größere Druckdifferenz überwinden, der COP fällt. Außerdem wird durch die Erhöhung der Verflüssigungstemperatur die spezifische Enthalpie bei gleicher Unterkühlung geringer. Dies mindert bei gleichbleibender Verdampfungstemperatur nochmals die Kälteleistung.

Resultierend ergibt sich ein Optimum für die Füllmenge für Kälteleistung und Kälteleistungszahl. Je kleiner dabei die absolute Füllmenge ist, desto größer ist der Einfluß bei geringen Abweichungen von der optimalen Füllmenge auf die Kälteleistung und den COP.

Die durchgeführten Messungen bestätigten diese einfache theoretische Überlegung, welche in Bild 4 grafisch dargestellt sind.

In Bild 4 ist die Kälteleistung auf der linken und der COP auf der rechten Ordinate über der normierten Füllmenge aufgetragen. Deutlich ist der starke Anstieg zu sehen, der sich mit steigender Füllmenge ergibt. Nach Erreichen des Maximums sinkt sowohl die Kälteleistung als auch der COP. Das Maximum der Serien-Flüssigkeitskühlsätze liegt hierbei unter 3000 g NH<sub>3</sub>.

### Anwendungsbereich, Leistungsmessungen und Teillastverhalten

Erst die Vermessung der Leistungsdaten bei variierenden Lastzuständen (Flüssigkeitstemperaturen), als auch bei sich ändernden Temperaturen bei Außenaufstellung des Aggregates geben Aufschluß über die Zuverlässigkeit des Gesamtkonzeptes.

### Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich des Flüssigkeitskühlsatzes wurde im Standardregime (Kühlwasser 6/12 °C; Kaltwasser 26/32 °C) als auch bei abweichendem Regime überprüft, so daß die Leistungsdaten in einem gesamten Kennfeld zur Verfügung stehen (Bild 5). Die vermessenen Daten korrespondieren gut mit dem Kennfeld des Verdichterherstellers.

### Leistungsmessungen

Neben der sorgfältigen Auslegung des Flüssigkeitskühlers ist die Leistungsmessung der realen Leistungsdaten zwingend erforderlich. In Bild 6 sind die ermittelten Leistungsdaten dargestellt.

Im unteren Teil des Diagramms sind die Meßwerte der Verdampfungstemperatu-

ren für verschiedene Verflüssigungstemperaturen über der Flüssigkeitsaustrittstemperatur dargestellt. Es zeigt sich, daß die Soleaustrittstemperatur keinen wesentlichen Einfluß auf die Verdampfungstemperatur und damit die Temperaturspreizung hat, d. h. der kA-Wert bleibt weitgehend konstant, da sich nur die Stoffdaten der Fluide temperaturabhängig ändern. Alle Meßwerte streuen nur leicht um die eingezeichnete Ausgleichskurve. Im oberen Teil des Diagramms ist die Kälteleistung über der Flüssigkeitsaustrittstemperatur aufgetragen. Da sich bei der Veränderung der Verflüssigungstemperatur auch das Druckverhältnis des Verdichters ändert, ist die Kälteleistung nicht abhängig von der Verflüssigungstemperatur, sie fällt mit zunehmendem t<sub>c</sub>.

Mit Hilfe dieses Diagramms kann sehr schnell die Flüssigkeitsaustrittstemperatur und die Kälteleistung des Flüssigkeitskühlsatzes ermittelt werden.

### Untersuchung des Teillastverhalten

Die Leistungsregelung im Teillastbereich erfolgt über das Ab- bzw. Zuschalten von Zylindern des Kolbenverdichters. Entspre-

chende Untersuchungen zum Betriebsverhalten wurden auch bei Teillast durchgeführt, ebenso der Start/Stop-Betrieb überprüft. Das Teillastverhalten wurde aufgrund der Verwendung des löslichen Öls detailliert untersucht.

Zahlreiche Modifikationen der Einbauten in Kombination mit der Variation der Position des Temperaturfühlers zur Messung der Überhitzung als auch die Anpassung der Regelparameter des pulsbreitenmodulierten Expansionsventils haben abschließend zu einem Konzept geführt, welches auch bei Teillastbetrieb von 33% (bei einem 6-Zylinder-Verdichter) zu einem sicheren Ölrücktransport führt.

### Bauraumoptimierung

Um die Möglichkeit einer Außenaufstellung realisieren zu können, wurden die gesamten kältetechnischen Komponenten auf ein stabiles Stahlgerüst aufgebaut. Dabei befindet sich der offene NH<sub>3</sub>-Verdichter zusammen mit dem Motor auf der Grundplatte. Auf einer darüberliegenden Ebene sind der Plattenverdampfer und -verflüssiger montiert. Dieser Aufbau ermöglicht eine sehr geringe Baubreite des Aggregats, die auch einen Transport durch Türen ermöglicht. Dieser Aufbau hat wei-

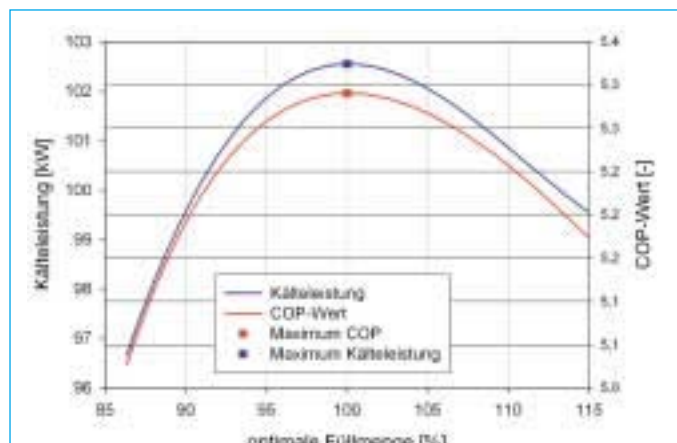


Bild 4 Verlauf der Kälteleistung und COP als Funktion der Füllmenge

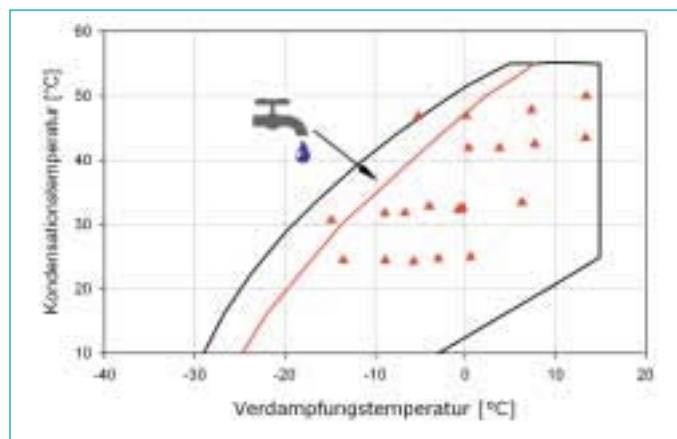


Bild 5 Einsatzbereich des Flüssigkeitskühlsatzes mit eingezeichneten Meßwerten zur Überprüfung der Leistungsdaten

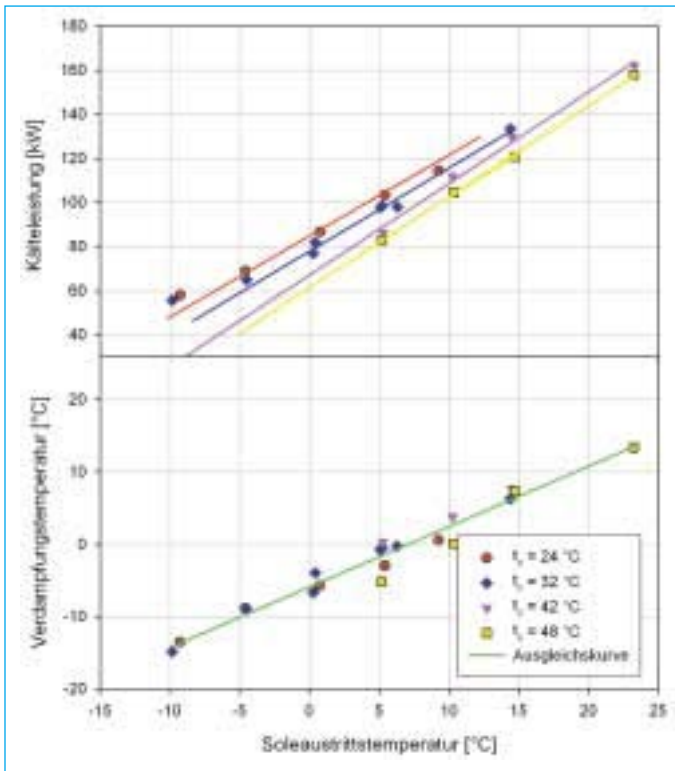


Bild 6 Kälteleistung des Flüssigkeitskühlsatzes und Verdampfungstemperatur bei variabler Flüssigkeitseintrittstemperatur und Verflüssigungstemperaturen

terhin den Vorteil, daß die Rohrverbindungen zwischen den Komponenten sehr kurz sind und damit die NH<sub>3</sub>-Füllmenge eine minimale Größe annimmt. Die Komponenten werden mittels wetterfesten und schallisolierten Abdeckplatten vor Korrosion geschützt und verhindern unerlaubten Zugriff.

## Zusammenfassung und Ausblick

Erstmals wurde ein NH<sub>3</sub>-Flüssigkeitskühlsatz entwickelt, der eine kleinere spezifische Kältemittelfüllmenge als 28 g NH<sub>3</sub>/kW Kälteleistung aufweist. Bei Kühlung von Kaltwasser (12/6 °C) wird eine Kälteleistung von ca. 100 kW mit weniger als 3 kg NH<sub>3</sub> erreicht.

Die sehr kompakte Bauweise wurde ermöglicht durch Plattenwärmetauscher und Direktexpansion. **Das gesamte Konzept ist für ein Marktsegment optimiert worden, in dem heute noch H-FKW-Kältemittel aufgrund von Kostenvorteilen dominierend sind.** Es wird jedoch zukünftig erwartet, daß bei zunehmenden Regulierungen von H-FKW der Marktanteil von NH<sub>3</sub>-Flüssigkeitskühlern gerade im Bereich 100 kW ansteigt. □

### Literatur

- [1] FRIGOBOXTM, NH<sub>3</sub>-Flüssigkeitskühlsatz für Kälteleistungen bis 100 kW, Technische Mitteilung Axima Refrigeration GmbH, 2003.
- [2] Europäische Verordnung, 30. April 2001 (EC) No. 2037/2000 of the European Parliament and of the Council on substances that deplete the ozone layer.
- [3] Lahl, U.: Eckpunktepapier des Bundesministeriums für Umwelt und Reaktorsicherheit, Die Kälte- und Klimatechnik, Januar 2003.
- [4] Österreichisches Bundesgesetzblatt 447: Verbote und Beschränkungen teilfluorierter und vollfluorierter Kohlenwasserstoffe sowie von Schwefelhexafluorid (H-FKW-FKW-SF6-V), 10. Dezember 2002.
- [5] Axima Refrigeration GmbH, Liquid chilling units configured to your needs, Lindau, 2002.
- [6] EN 378:2000: Refrigerating systems and heat pumps Safety and environmental requirements, Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria.