

Weiterführende Untersuchungen der Kältemittelfüllmengen in Wärmeübertragern

# Möglichkeiten der Füllmengenreduzierung

Michael Stalter, Karlsruhe

Ziel der vorgestellten Untersuchung ist, die verschiedenen Einflüsse auf den Füllungsgrad von Wärmeübertragern experimentell zu ermitteln, um eine praxisnahe Möglichkeit zur Berechnung der Füllmenge und des minimal notwendigen Volumens des Kältemittelsammlers zu erhalten. Die Ergebnisse aus dem Jahr 2005 wurden bereits in der KK 4/06 veröffentlicht.

Die Forderung nach geringeren Kältemittelfüllmengen aus ökonomischer und ökologischer Sicht bedingt eine sorgfältige Betrachtung der Füllmenge bereits in der Planungsphase der Anlage. Eine Füllmengenreduzierung bzw. eine Verringerung der Sammlergröße ist daher anzustreben. Mit reduzierten Sammlervolumina ergeben sich folgende Vorteile:

- Kleinerer, kostengünstiger Sammler
- Reduzierung der Kältemittelmenge und der Kosten
- Geringere Kältemittlemissionen im Havariefall
- Niedrigerer TEWI-Wert der Anlage

Zur Bestimmung der Sammlergröße ist die Kenntnis der minimal notwendigen Füllmenge für eine betriebssichere Funktion der Kälteanlage notwendig. Diese ist unter anderem von den unterschiedlichen Betriebsituationen und den Wärmeübertragern abhängig.

## Definitionen

### Definition des Füllungsgrades

Zur Beschreibung der Kältemittelfüllmengen in den Wärmeübertragern wurde der Füllungsgrad verwendet. Der Füllungsgrad beschreibt, wie viel Volumen die Kältemittelflüssigkeit im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Wärmeübertragers einnimmt.

Es gilt:

$$\varphi = \frac{V_{\text{Flüssigkeit}}}{V_{\text{Wärmeübertrager}}} = \frac{V_L}{V_G}$$

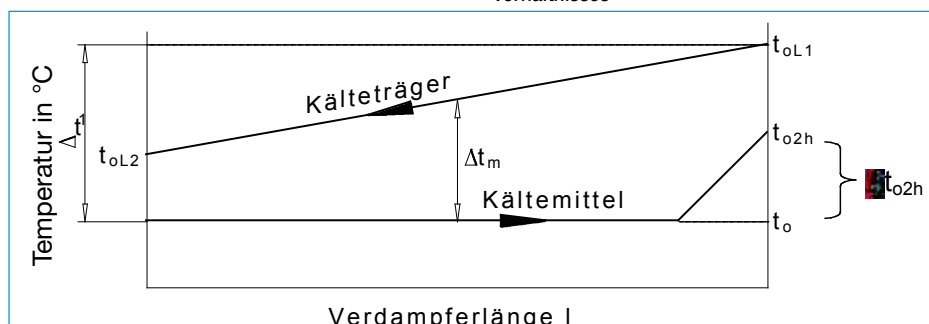
Es bedeutet:

$\varphi$  Füllungsgrad  
 $V_{\text{Flüssigkeit}} \cdot V_L$  Das von der Kältemittelflüssigkeit eingenommene Volumen  
 $V_{\text{Wärmeübertrager}} \cdot V_G$  Gesamtes inneres Volumen des Wärmeübertragers

### Definition des Überhitzungsverhältnisses

Das Überhitzungsverhältnis ist der, für den Füllungsgrad, maßgebliche Faktor. Das Überhitzungsverhältnis  $f$  ist das Verhältnis der Verdampferaustrittsüberhitzung  $\Delta t_{o2h}$  zur Eintrittstemperaturdifferenz  $\Delta t_1$ , wie in Bild 1 zu sehen.

Bild 1 Definition des Überhitzungsverhältnisses



## zum Autor

Michael Stalter,  
Geschäftsführer  
TWK – Test- und  
Weiterbildungszentrum  
Wärmepumpen  
und Kältetechnik  
gGmbH, Karlsruhe



Es gilt:

$$f = \frac{\text{Überhitzung}}{\text{Eintrittstemperaturdifferenz}} = \frac{\Delta t_{o2h}}{\Delta t_1}$$

Es bedeutet:

$f$  Überhitzungsverhältnis  
 $t_o$  Verdampfungstemperatur  
 $t_{o2h}$  Überhitzungstemperatur  
 $t_{oL1}$  Lufteintrittstemperatur  
 $t_{oL2}$  Luftaustrittstemperatur  
 $\Delta t_{o2h}$  Verdampferaustrittsüberhitzung  
 $\Delta t_1$  Eintrittstemperaturdifferenz  
 $\Delta t_m$  mittlere Temperaturdifferenz

## Messungen

### Verwendete Wärmeübertrager

Für die weiterführenden Untersuchungen wurden sowohl luftbeaufschlagte als auch flüssigkeitsbeaufschlagte Wärmeübertrager verwendet. Der Einfluss der Rohrbeschaffenheit wird mit zwei luftbeaufschlagten Wärmeübertragern untersucht. Dabei wird zwischen Glatrohr und profiliertem Rohr unterschieden. Die weiteren Daten der Verdampfer sind in Tabelle 1 aufgelistet. Beide luftbeaufschlagten Verdampfer haben eine einfache Einspritzung und die gleiche Rohrschaltung wie in Bild 2 zu sehen.

Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 24. November 2006 in Dresden.

Lufteintrittsvolumenstrom	$V_L$ in $m^3/h$	1550
Wärmetauscherrohre	$\phi$ in mm	15 x 0,4
Länge der Rohre	in m	ca. 17
Rohrschaltung	fluchtend, in mm	50 x 50
Lamellenabstand	in mm	5,0
Inneres Volumen des Wärmeübertragers	$V_G$ in $dm^3$	3,00

Tabelle 1 Zur Messung verwendete luftbeaufschlagte Verdampfer (E5 und E6)

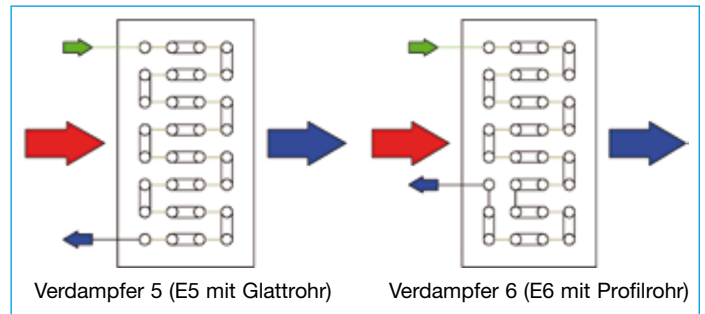


Bild 2 Rohrschaltungen der Verdampfer E5 und E6

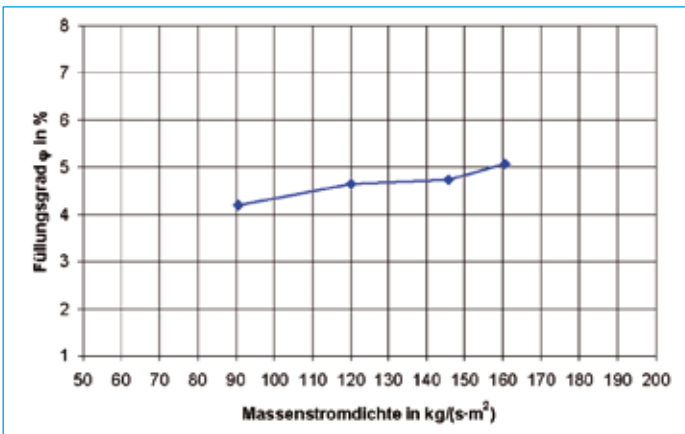


Bild 3 Füllungsgrad über Massenstromdichte bei konstanter Überhitzung  $\Delta t_{o2h} = 8 K$ , konstantem Eintrittsdampfgehalt  $x_{o1} = 30\%$  und konstanter Verdampfungstemperatur  $t_o = 0^\circ C$

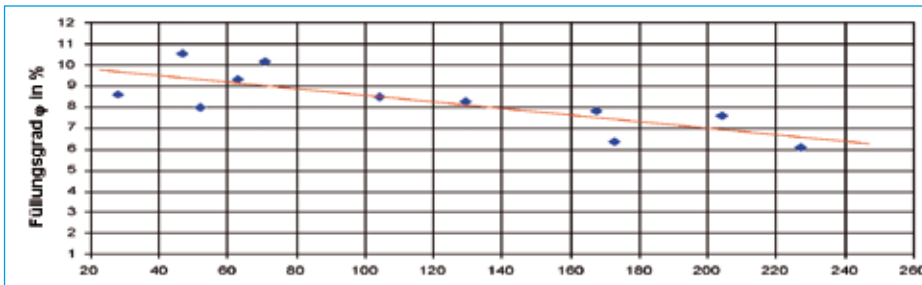


Bild 4 Füllungsgrad über Massenstromdichte bei einfacher Einspritzung mit  $t_o = 0^\circ C$  und R404A für Verdampfer E5

Für die wasserbeaufschlagten Wärmeübertrager wurden ein Koaxialverflüssiger, ein Plattenverflüssiger und ein Plattenverdampfer eingesetzt.

Die Verdampfer waren in einer Kühlzelle installiert; die Messungen an den Wärmeübertragern wurden mit dem Kältemittel R404A durchgeführt.

### Bestimmung des Füllungsgrades

Im Beharrungszustand der Anlage wurde der Wärmeübertrager zeitgleich am Ein- und Austritt abgesperrt. Die gesamte Kältemittelmasse im Wärmeübertrager wurde durch Absaugen und Wiegen des Kältemittelinhaltes bestimmt. Aus der Kältemittelmasse und den Kältemittelstoffdaten ergibt sich der Füllungsgrad.

### Bestimmung des Kältemittelmassenstromes

Der Massenstrom wurde in der Flüssigkeitsleitung der Kälteanlage bestimmt.

Als Kontrollverfahren für den Massenstrom diente beim Verdampfer das Kalorimeterverfahren (Summe aller zugeführten Leistungen). Der Massenstrom ergibt sich aus den ermittelten Leistungen und den Kältemittelstoffdaten.

### Kältemittel

Der Einfluss des Kältemittels auf den Füllungsgrad wurde mit luftbeaufschlagten Wärmeübertragern untersucht, sowohl verflüssiger- als auch verdampferseitig. Dabei kamen R134a und R404A zum Einsatz.

## Ergebnisse

### Luftbeaufschlagte Wärmeübertrager

#### Einfluss der Massenstromdichte

Die Ergebnisse des letzten Jahres haben gezeigt, dass die Massenstromdichte nicht der entscheidende Faktor für den Füllungsgrad ist. In Bild 3 wird die Verdampfungstemperatur  $t_o$ , Überhitzung  $\Delta t_{o2h}$  und der Eintrittsdampfgehalt  $x$  konstant gehalten. Es ergibt sich mit zunehmender Massenstromdichte ein größer werdender Füllungsgrad.

Die Ergebnisse des Verdampfers E5 bestätigen die Aussage, dass die Massenstromdichte nur sekundär Einfluss auf den Füllungsgrad hat. Zwar sinkt in Bild 4 der Füllungsgrad mit steigender Massenstromdichte, aber sie ist nicht der dominierende Parameter. Im Vergleich mit der Mehrfachverteilung ist bei der Einfachen der Füllungsgrad etwas höher, maximal 5–6%.

#### Einfluss des Rohrbeschaffenheit

Wie in Bild 5 zu sehen, ist der Einfluss der Rohrbeschaffenheit auf den Füllungsgrad nicht mit der Massenstromdichte zu erfassen. Die Füllungsgrade entsprechen den Ergebnissen mit dem Glattrohr. Profiliertere Rohre reduzieren bei gleicher Leistung den Füllungsgrad.

### Flüssigkeitsbeaufschlagte Wärmetauscher

Die flüssigkeitsbeaufschlagten Wärmetauscher werden hier nicht im Detail betrachtet. Die Ergebnisse zeigen im Trend, dass die luftbeaufschlagten Wärmetauscher für eine Füllmengenreduzierung besser geeignet sind, wie in Tabelle 2 im Abschnitt „Überblick“ zu sehen.

#### Plattenverdampfer

Der Plattenverdampfer, wie in Bild 6 gezeigt, hat deutlich höhere Füllungsgrade als ein luftbeaufschlagter Verdampfer.

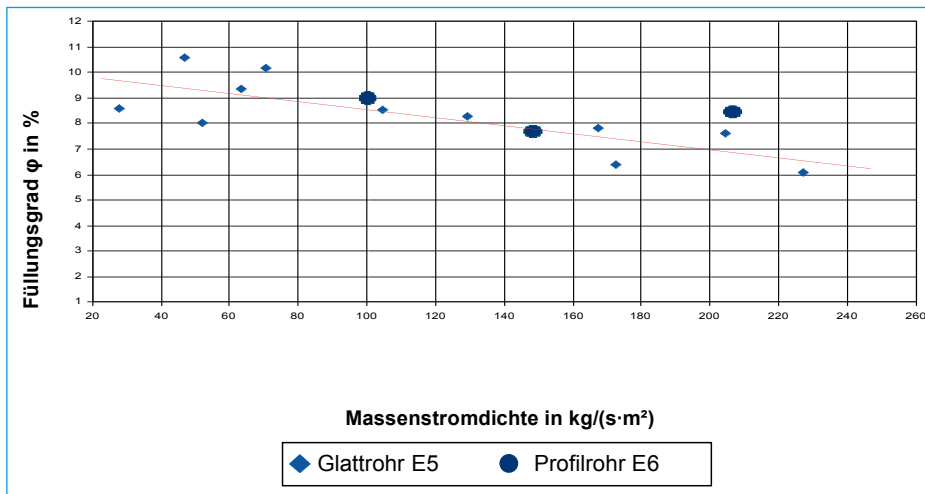


Bild 5 Füllungsgrad über Massenstromdichte bei  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  und R404A für Glattrohr (E5) und Profilrohr (E6)

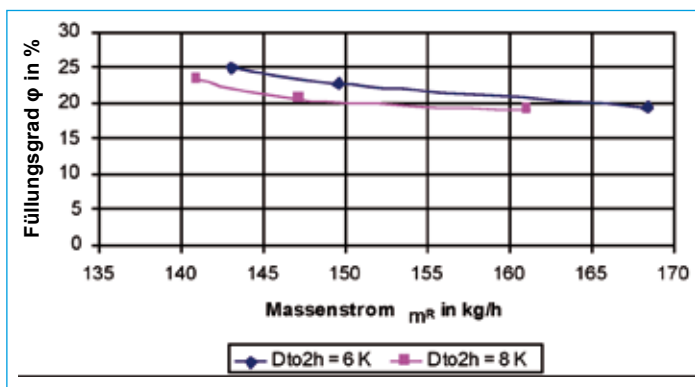


Bild 6 Füllungsgrad über Massenstrom für einen flüssigkeitsbeaufschlagten Plattenverdampfer mit 6 K und 8 K Überhitzung und  $t_0 = 0^\circ\text{C}$

### Einfluss des Kältemittels

Bei den ersten Messungen mit dem Kältemittel R404A zeigten sich keine gravierenden Veränderungen des Füllungsgrads im Vergleich zu den Messungen mit R134a, wie in Bild 7 gezeigt. Die Art des Kältemittels hat auf den Füllungsgrad einen vernachlässigbaren Einfluss. Somit können die Ergebnisse auf andere Kältemittel übertragen werden.

### Überblick

Tabelle 2 zeigt alle Ergebnisse für die Wärmetauscher zusammengefasst. In der Tabelle enthalten sind auch die Ergebnisse des letzten Jahres. Diese zeigen, dass mit luftbeaufschlagten Wärmetauschern ein geringerer Füllungsgrad benötigt wird. Die flüssigkeitsbeaufschlagten Wärmetauscher haben jedoch eine kleinere absolute Füllmenge wegen des geringeren inneren Volumens bei vergleichbarer Leistung. Jedoch kann man hier keine großen Reduzie-

rungen der Füllmenge erwarten. Deshalb wird im nächsten Kapitel der Sammler auf Möglichkeiten der Füllmengenreduzierung untersucht.

### Sammler

#### Sammlergrundfüllmengen

In Bild 8 ist der Vergleich der Sammlergrundfüllmengen aufgetragen. Ein stehender Sammler benötigt weniger Füllmenge als ein vergleichbarer liegender Sammler. Ein Sammler darf nicht zu schmal werden, da sonst die Phasentrennung nicht gewährleistet ist.

#### Prinzip der Phasentrennung im Sammler

Der Sammler dient im Kältemittelkreislauf als Flüssigkeitsvorrat, um vor dem Expansionsventil Gasblasen zu vermeiden. Diese Gasblasen werden vorher im Sammler von der Flüssigkeit getrennt. Damit die Gasblasen nicht mitgerissen werden, darf eine

maximale Geschwindigkeit der Flüssigkeit nicht überschritten werden.

Die nachfolgenden Berechnungen und Erkenntnisse beruhen auf der Dissertation von Dipl.-Ing. Mario Koebe, Uni Paderborn 2004. Die Wechselwirkungen der Zweiphasenströmung werden in 3 Fällen unterschieden:

- die Wirkung der Flüssigphase auf die Blase
- die Wirkung der Blase auf die Flüssigphase
- die Rolle der Wechselwirkungen der Blasen untereinander

Gasblasen haben bewegliche Phasengrenzflächen. Durch die Widerstandsgesetze lässt sich eine Aussage über die Bewegung der Blasen in der Flüssigkeitsphase machen. Jedoch können Blasen ihre Form und Zirkulation verändern und somit auf ihr eigenes Bewegungsverhalten Einfluss nehmen. Die Blasenform wird durch die physikalischen Eigenschaften der Flüssigphase und der Aufstiegsgeschwindigkeit bestimmt, sowie aus experimentellen Beobachtungen. Heute wird zwischen vier grundsätzlichen Formen einer Gasblase unterschieden, wie in Bild 9 gezeigt.

Im Allgemeinen führt ein größerer Blasendurchmesser zu einer stärkeren Auftriebskraft und damit zu einer schnelleren Aufstiegsgeschwindigkeit. Allerdings verändern Blasen durch die erhöhte Geschwindigkeit ihre Form und Aufstiegsbewegung. Damit sind Blasendurchmesser, Blasengeschwindigkeit und Blasenform direkt miteinander verknüpft.

In Bild 10 ist die Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen bezogen auf den Blasendurchmesser für verschiedene Kältemittel aufgetragen. Die Daten sind berechnet und experimentell bestimmt. Kugelblasen mit innerer Zirkulation haben eine bewegliche Oberfläche und in Folge dessen sinkt der Reibungswiderstand bzw. steigt die Aufstiegsgeschwindigkeit. Die Blasen verändern nach und nach ihre Kugelform zu einer ellipsoiden Form und der ansteigende Strömungsquerschnitt erhöht den Strömungswiderstand der Blase. Strömungsablösungen lassen die Blase taumeln und auf diese Weise verändert sich ihre Blasenbahn. Da die Blasenbahn nicht mehr senkrecht verläuft, nimmt die Geschwindigkeit signifikant ab. Mit zunehmendem Durchmesser verändert sich die Blase weiter, bis sie sich zu einer kappenförmigen bzw. quallenförmigen Blase aus-

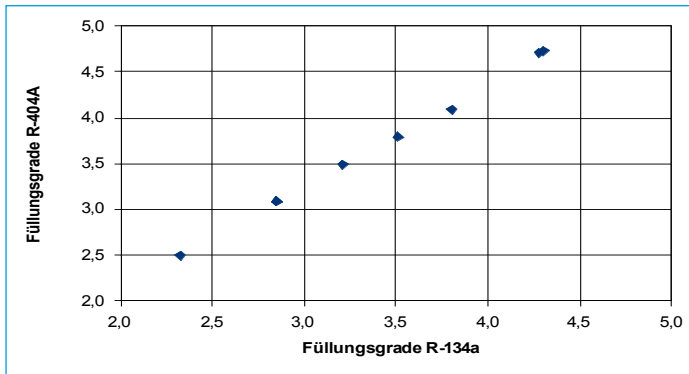
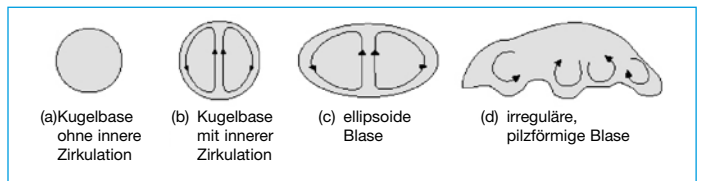
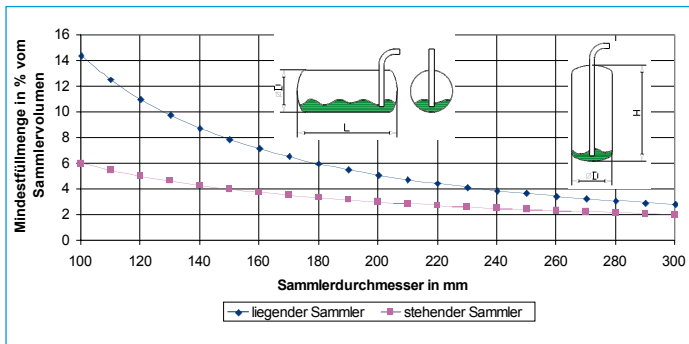


Bild 7 Füllungsgrad R404A über Füllungsgrad R134a bei gleichen Betriebsbedingungen und Wärmeübertragern

Wärmeübertrager	Füllungsgrad
luftbeaufschlagter Verdampfer ( $f > 0$ )	6–12 %
Plattenverdampfer ( $f > 0$ )	20–25 %
luftbeaufschlagter Verflüssiger (Sammlerbetrieb; $\Delta t_1 = 10 - 15 \text{ K}$ )	15–25 %
luftbeaufschlagter Verflüssiger (Unterkühlung $\Delta t_{c2u} = 3 \text{ K}$ ; $\Delta t_1 = 10 - 15 \text{ K}$ )	25–35 %
Koaxialverflüssiger (Sammlerbetrieb; $\Delta t_1 = 5 - 15 \text{ K}$ )	~ 23 %
Koaxial-/Plattenverflüssiger (Unterkühlung $\Delta t_{c2u} = 3 \text{ K}$ ; $\Delta t_1 = 8 - 14 \text{ K}$ )	~ 25 %

Tabelle 2 Ergebnisse der Füllungsgrade in Wärmeübertragern im Überblick



▲ Bild 9 Typische Blasenformen nach Peebles und Garber (1953) – aus Dissertation von Dipl.-Ing. Mario Koebe, Uni Paderborn 2004

◀ Bild 8 Sammlergrundfüllungen bei einem Durchmesser/Längen- (Höhen-) Verhältnis von 0,3 und einem Abstand zwischen Austrittsrohr und Sammlerboden von 20 mm

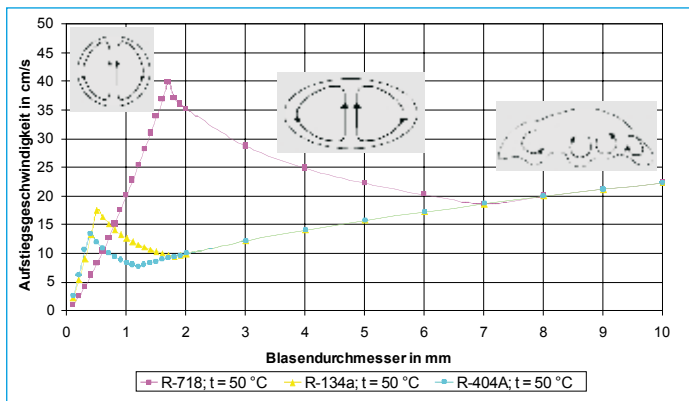


Bild 10 Aufstiegsgeschwindigkeit über dem Blasendurchmesser für verschiedene Kältemittel. Berechnungen nach Dissertation von Mario Koebe, Uni Paderborn

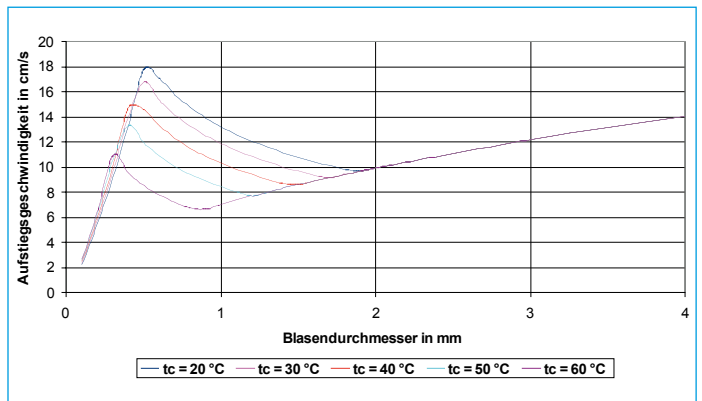


Bild 11 Blasenauftstiegsgeschwindigkeit über Blasendurchmesser für verschiedene Verflüssigungstemperaturen mit R404A

bildet, die in sich mehrere gegensinnige Wirbel enthält. Die Blaugeschwindigkeit nimmt wieder zu, da sich die Blase nun nicht mehr taumelnd, sondern stockend senkrecht nach oben bewegt.

**Bestimmung der Sammlergröße**

Aus den vorherigen Erkenntnissen lässt sich für jedes beliebige Kältemittel die minimale Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen bestimmen. Diese ist für den maximalen Massenstrom im Kältekreislauf maßgeblich, da sonst keine Phasentrennung im Sammler stattfinden kann. In Bild 11 ist die Blasenauftstiegsgeschwindigkeit über dem Blasendurchmesser für R404A

aufgezeichnet für verschiedene Verflüssigungstemperaturen.

Aus der minimalen Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen bestimmt man den maximalen Kältemittelmassenstrom. Mit der Verflüssigungstemperatur, wie in Bild 12 dargestellt, berechnet man die minimale Sammlergröße.

**Sammlerposition in der Kälteanlage**

Der Sammler wird in den Kältekreislauf direkt hinter dem Verflüssiger in die Kondensatleitung eingebaut, siehe Bild 13. Als

Vorratsbehälter für flüssiges Kältemittel stellt dieser den einwandfreien Betrieb des Expansionsventils sicher. Außerdem dient der Sammler zusätzlich als Ausgleichsbehälter bei betrieblichen Schwankungen.

Wenn man den Sammler nicht direkt in die Kondensatleitung einbindet, sondern im Bypass betreibt, siehe Bild 14, erfüllt dieser die gleichen Funktionen wie zuvor dargestellt. Der Sammler braucht im Bypassstrom nahezu keine Mindestfüllmenge mehr. Damit kann auch ein liegender Sammler eingebaut werden und spart so Platz in der Anlage. Die Kondensatleitung vom Verflüssiger ist dann direkt mit dem Expansionsventil verbunden. ■

**Literatur**

- Koebe, Mario: Numerische Simulation aufsteigender Blasen mit und ohne Stoffaustausch mittels der Volume of Fluid (VOF) Methode. In Universität Paderborn, Fakultät Maschinenbau, Dissertationen 2004
- Stalter, Michael; Schweitzer, Matthias: Experimentelle Bestimmung des Kältemittelfüllungsgrades in luftbeaufschlagten Verflüssigern und Verdampfern, DKV Tagungsband 2005

- Stalter, Michael: Einflussgrößen auf die Kältemittelfüllmenge von Wärmeträgern, Die Kälte & Klimatechnik 4/2006, S. 36–43
- Slipcevic, Boris: Kälteanlagen mit Umwälzpumpen. In Die Kälte (Juni 1966), S. 303-310
- Slipcevic, Boris; Haase, Fritz: Bestimmung der erforderlichen Kältemittelfüllung von Kälteanlagen. In Ki Klima - Kälte - Heizung 10/1983 Teil 4.1, S. 438-441
- Linck, Wolfgang; Giebe, Manfred: Bestimmung von Kältemittelfüllmenge und Sammlergröße für Kälteanlagen. In Die Kälte & Klimatechnik 11/1999, S. 64-70

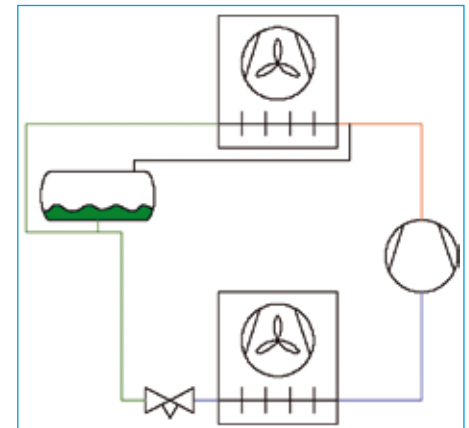


Bild 13 Einfacher Kältekreislauf einer Anlage mit Sammler in der Kondensatleitung hinter dem Verflüssiger

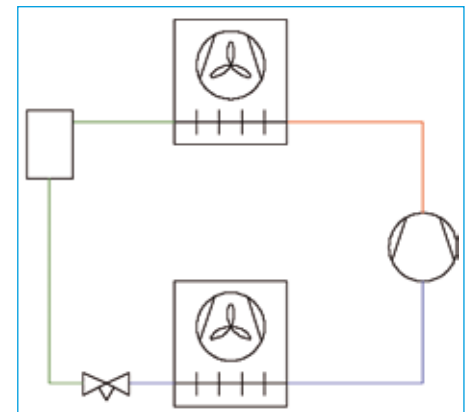


Bild 14 Kältekreislauf einer einfachen Anlage mit Sammler im Bypass

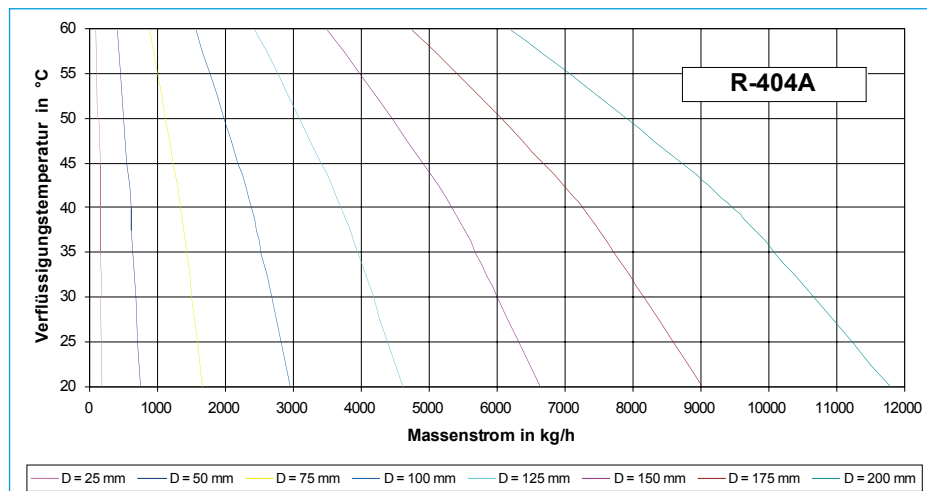


Bild 12 Bestimmung des Sammlerdurchmessers mit dem Kältemittelmassenstrom und der Verflüssigungstemperatur

**Die Ergebnisse im Überblick**

**Verdampfer:**

- Die Füllungsgrade für luftbeaufschlagte Verdampfer liegen zwischen 6 und 12%.
- Für Plattenverdampfer ergeben sich hingegen 20–25% Füllungsgrad.
- Das Überhitzungsverhältnis scheint der, für den Füllungsgrad bei Trockenexpansionsverdampfern, dominierende Parameter zu sein.
- Die Verdampfungstemperatur, der Eintrittsdampfgehalt und die Massenstromdichte nehmen im Vergleich zum Überhitzungsverhältnis nur einen geringen Einfluss auf den Füllungsgrad.
- Die Rohrschaltungen zeigen, je nach Betriebssituation, erhebliche Unterschiede in den Füllungsgraden.
- Profilierte Rohre reduzieren bei vergleichbarer Leistung den Füllungsgrad.
- Eine Mehrfachverteilung reduziert gegenüber der einfachen Einspritzung den Füllungsgrad.

- Luftbeaufschlagte Verdampfer haben geringere Füllungsgrade als vergleichbare flüssigkeitsbeaufschlagte. Wobei die absolute Füllmenge bei flüssigkeitsbeaufschlagten Verdampfern geringer ist aufgrund des geringeren inneren Volumens bei vergleichbarer Leistung.

**Verflüssiger:**

- Die Füllungsgrade für luftbeaufschlagte Verflüssiger ergeben sich zu 15–25% im Sammlerbetrieb und einer Eintrittstemperaturdifferenz zwischen 10 und 15 K.
- Für den Betrieb ohne Sammler ergeben sich deutlich höhere Füllungsgrade zwischen 25 und 35% bei gleichen Eintrittstemperaturdifferenzen zwischen 10 und 15 K.
- Die Rohrschaltungen zeigen, je nach Betriebssituation, erhebliche Unterschiede in den Füllungsgraden.
- Die Füllungsgrade für Koaxialverflüssiger im Sammlerbetrieb sind ungefähr 23% bei einer Eintrittstemperaturdifferenz zwischen 5 und 15 K.

- Ohne Sammler ergeben sich für Koaxial- und Plattenverflüssiger nahezu identische Werte von 25% Füllungsgrad bei einer Eintrittstemperaturdifferenz zwischen 8 und 14 K.

**Kältemittel:**

- Das Kältemittel hat bei gleichen Bedingungen und Komponenten einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Füllungsgrad.

**Sammler:**

- Ein stehender Sammler benötigt eine geringere Mindestfüllmenge als ein liegender Sammler.
- Ein Sammler im Bypassstrom benötigt nahezu keine Mindestfüllmenge.
- Der Sammler kann, um eine vollständige Phasentrennung zu gewährleisten, nicht beliebig klein werden. Dazu muss bei einem definierten Sammlerdurchmesser ein maximaler Massenstrom eingehalten werden, damit die Gasblasen im Sammler aufsteigen können und eine Phasentrennung stattfindet.