

Weiterführende Untersuchungen der Kältemittelfüllmengen in Wärmeübertragern und Möglichkeiten der Füllmengenreduzierung

Michael Stalter, Markus Grasse, DKV Tagung 2006

1 Einleitung

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, kostengünstigerer 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 Betriebssituationen und den Wärmeübertragern abhängig.

Ziel der vorgestellten Untersuchung ist, die verschiedenen Einflüsse auf den Füllungsgrad von Wärmeübertragern experimentell zu ermitteln und um eine praxisnahe Möglichkeit zur Berechnung der Füllmenge und des minimal notwendigen Volumens des Kältemittelsammlers zu erhalten. Die Ergebnisse des Jahres 2005 sind im Tagungsband des DKV aufgeführt.

2 Zusammenfassung

2.1 Verdampfer

- Die Füllungsgrade für luftbeaufschlagte Verdampfer liegen zwischen 6 – 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 zu dem 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.

2.2 Verflüssiger

- Die Füllungsgrade für luftbeaufschlagte Verflüssiger ergeben sich zu 15 – 25 % im Sammlerbetrieb und einer Eintrittstemperaturdifferenz zwischen 10 – 15 K.
- Für den Betrieb ohne Sammler ergeben sich deutlich höhere Füllungsgrade zwischen 25 – 35 % bei gleichen Eintrittstemperaturdifferenzen zwischen 10 – 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 – 15 K.
- Ohne Sammler ergeben sich für Koaxial- und Plattenverflüssiger nahezu identische Werte von 25 % Füllungsgrad bei einer Eintrittstemperaturdifferenz zwischen 8 – 14 K.

2.3 Kältemittel

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

2.4 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.

3 Definitionen

3.1 Definition des Füllungsgrades

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

Es gilt:

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

Es bedeutet:

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

3.2 Definition des Überhitzungsverhältnisses

Das Überhitzungsverhältnis ist der, für den Füllungsgrad, maßgebliche Faktor. Das Überhitzungsverhältnis f ist das Verhältnis der Verdampferaustrittsüberhitzung Δt_{o2h} zur Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 , wie in Bild 1 zu sehen.

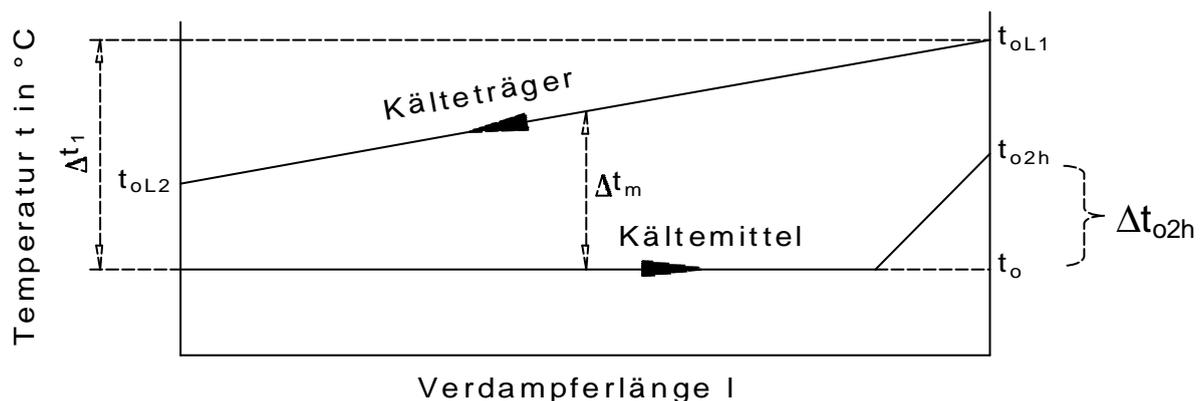


Bild 1. Definition des Überhitzungsverhältnisses.

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}	Luft Eintrittstemperatur
t_{oL2}	Luft Austrittstemperatur
Δt_{o2h}	Verdampferaustrittsüberhitzung
Δt_1	Eintrittstemperaturdifferenz
Δt_m	mittlere Temperaturdifferenz

4 Durchführung der Messungen

4.1 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 Glattrohr 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.

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

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

Luft Eintrittsvolumenstrom	V_L in m^3/h	1550
Wärmetauscherrohre	\varnothing 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

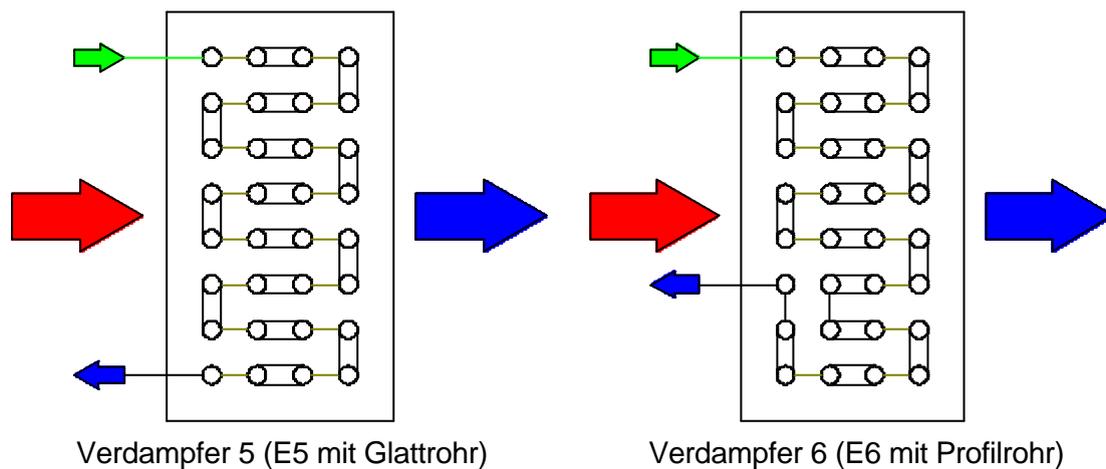


Bild 2. Rohrschaltungen der Verdampfer E5 und E6.

Die Verdampfer sind in einer Kühlzelle installiert worden. Die Messungen an den Wärmeübertragern sind mit dem Kältemittel R-404A durchgeführt worden.

4.2 Bestimmung des Füllungsgrades

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

4.3 Bestimmung des Kältemittelmassenstromes

Der Massenstrom ist in der Flüssigkeitsleitung der Kälteanlage bestimmt worden.

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.

4.4 Kältemittel

Der Einfluss des Kältemittels auf den Füllungsgrad wurde mit luftbeaufschlagten Wärmeübertragern untersucht, sowohl verflüssiger- als auch verdampferseitig. Dabei kamen R-134a und R-404A zum Einsatz.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse luftbeaufschlagte Wärmeübertrager

5.1.1 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 Δt_{o2h} und der Eintrittsdampfgehalt x konstant gehalten. Es ergibt sich mit zunehmender Massenstromdichte ein größer werdender Füllungsgrad.

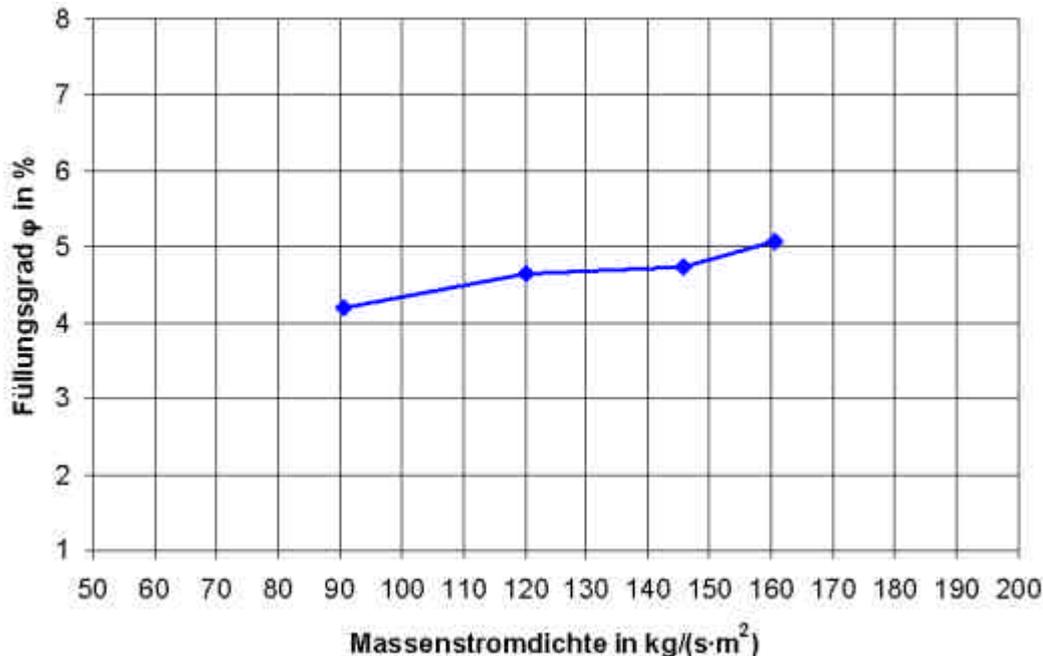


Bild 3. Füllungsgrad über Massenstromdichte bei konstanter Überhitzung $\Delta t_{o2h} = 8 \text{ K}$, konstantem Eintrittsdampfgehalt $x_{o1} = 30 \%$ und konstanter Verdampfungstemperatur $t_o = 0 \text{ °C}$.

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 %.

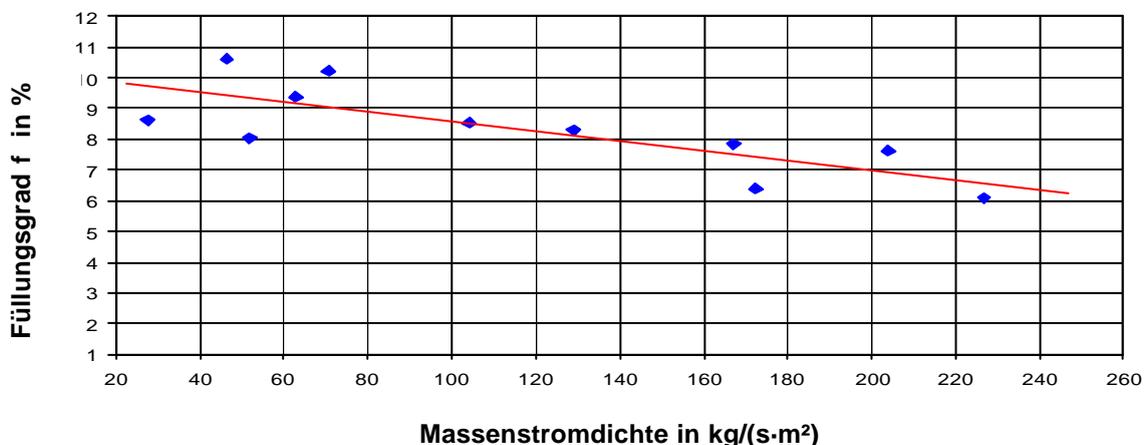


Bild 4. Füllungsgrad über Massenstromdichte bei einfacher Einspritzung mit $t_o = 0 \text{ °C}$ und R-404A für Verdampfer E5.

5.1.2 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. Profilierte Rohre reduzieren bei gleicher Leistung den Füllungsgrad.

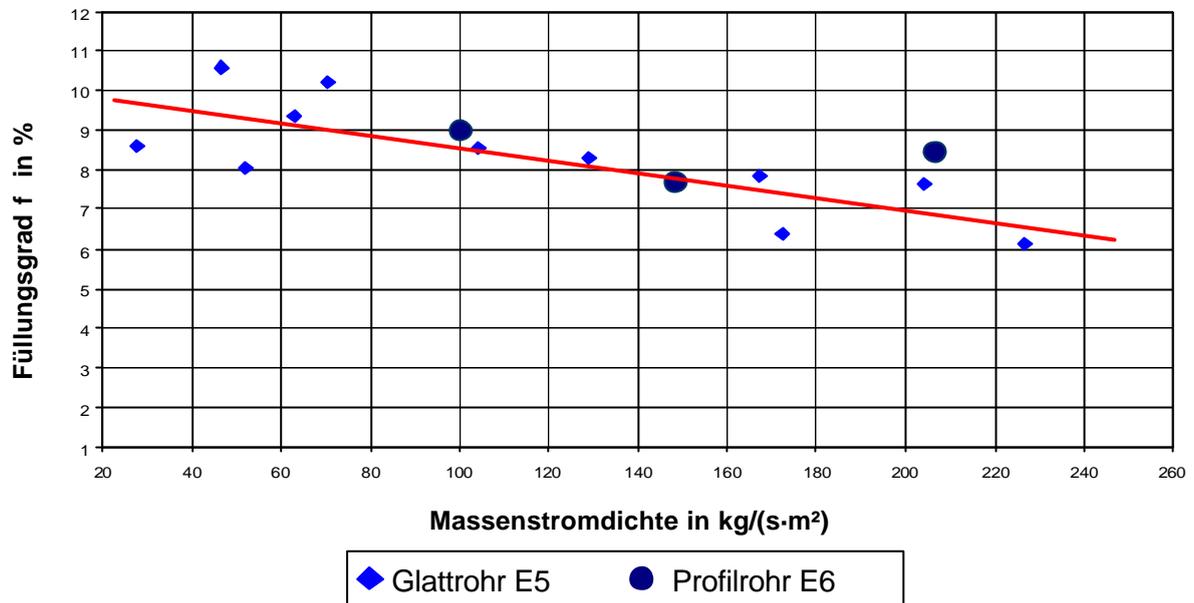


Bild 5. Füllungsgrad über Massenstromdichte bei $t_o = 0 \text{ °C}$ und R-404A für Glattrohr (E5) und Profilrohr (E6).

5.2 Ergebnisse 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 Punkt 5.4 zu sehen.

5.2.1 Plattenverdampfer

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

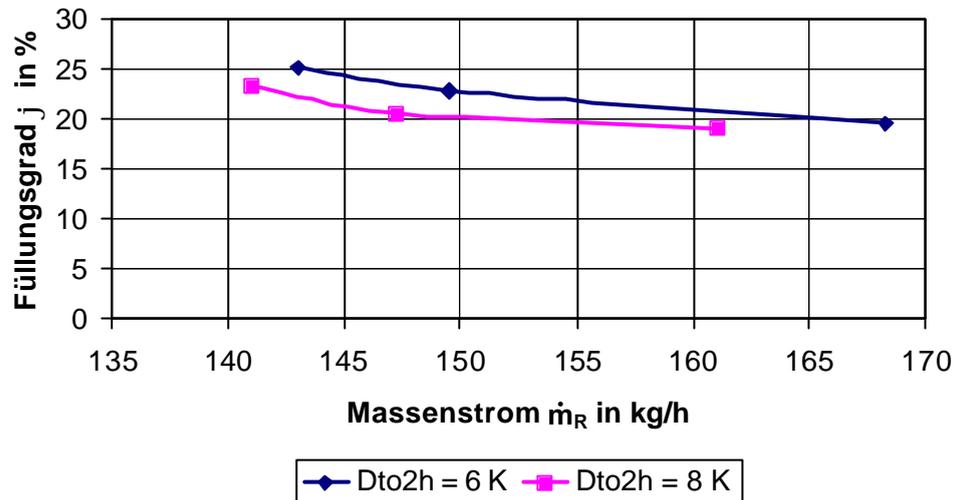


Bild 6. Füllungsgrad über Massenstrom für einen flüssigkeitsbeaufschlagten Plattenverdampfer mit 6 K und 8 K Überhitzung und $t_o = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.3 Einfluss des Kältemittels

Bei den ersten Messungen mit dem Kältemittel R-404A zeigten sich keine gravierenden Veränderungen des Füllungsgrads im Vergleich mit den Messungen zu R-134a, 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.

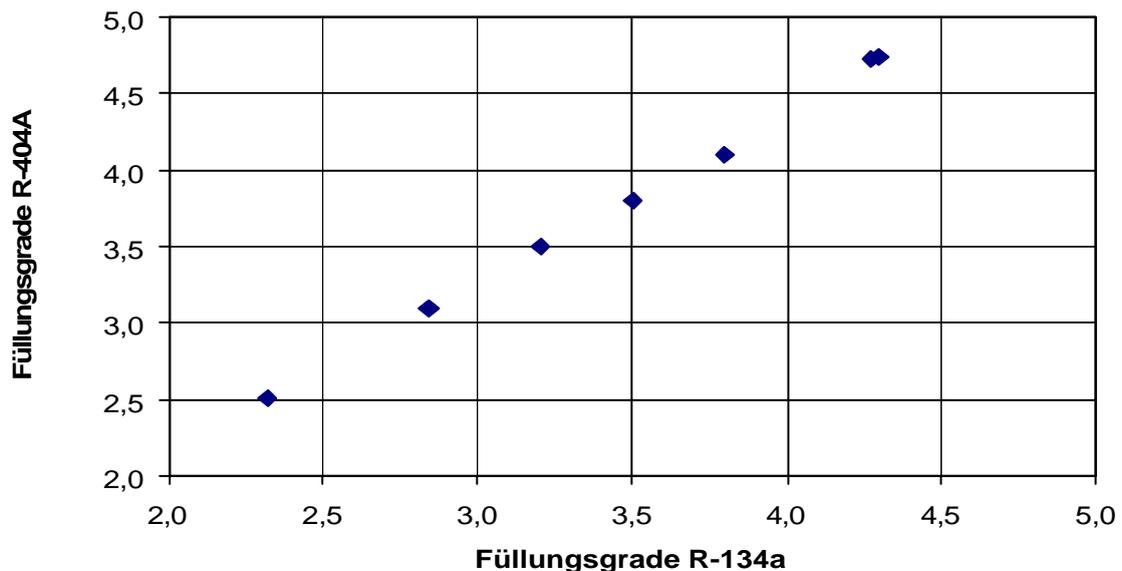


Bild 7. Füllungsgrad R-404A über Füllungsgrad R-134a bei gleichen Betriebsbedingungen und Wärmeübertragern.

5.4 Überblick

Die nachfolgende 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 weniger Füllungsgrad benötigt wird. Aber die flüssigkeitsbeaufschlagten Wärmetauscher haben eine geringere absolute Füllmenge wegen dem geringeren inneren Volumen bei vergleichbarer Leistung. Jedoch kann man hier keine großen Reduzierungen der Füllmenge erwarten. Deshalb wird im nächsten Kapitel der Sammler auf Möglichkeiten der Füllmengenreduzierung untersucht.

Tabelle 2. Ergebnisse der Füllungsgrade in Wärmeübertragern im Überblick.

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

5.5 Sammler

5.6 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.

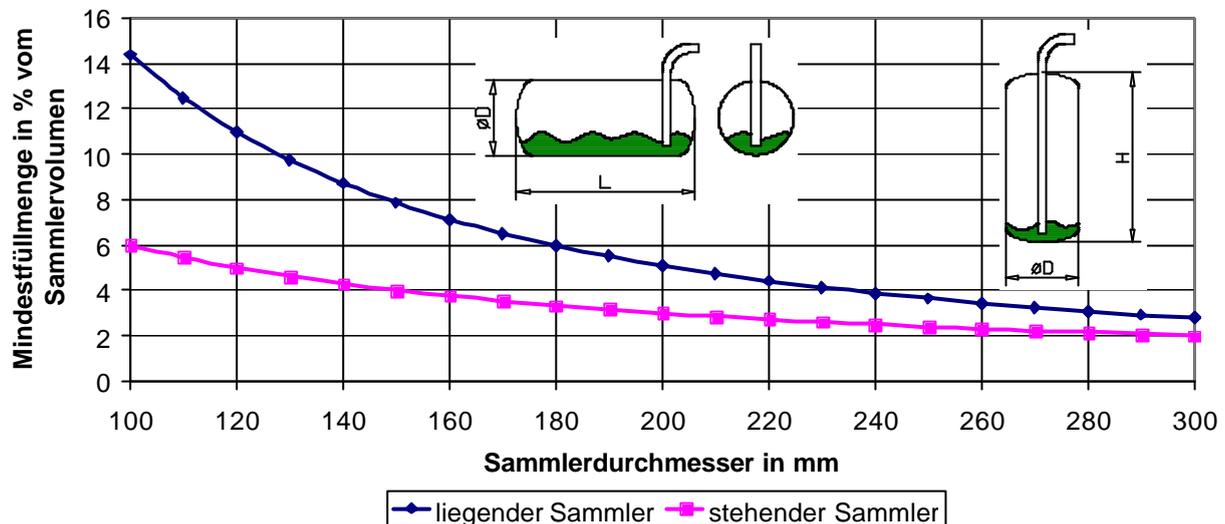


Bild 8. Sammlergrundfüllungen bei einem Durchmesser/Längen- (Höhen-) Verhältnis von 0,3 und einem Abstand zwischen Austrittsrohr und Sammlerboden von 20 mm.

5.7 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 Aufstiegs geschwindigkeit bestimmt, sowie aus experimentellen Beobachtungen. Heute wird zwischen vier grundsätzlichen Formen einer Gasblase unterschieden, wie in Bild 9 gezeigt.

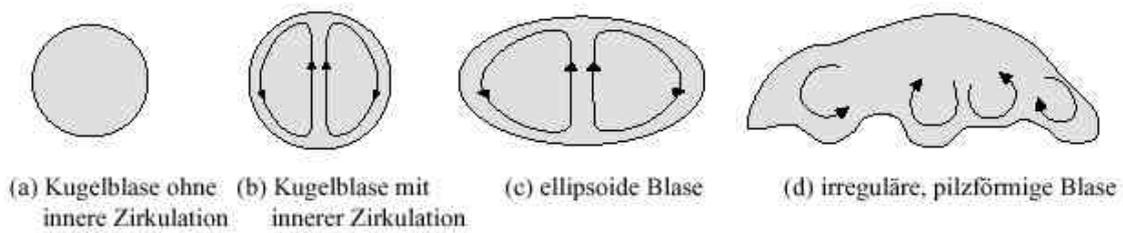


Bild 9. Typische Blasenformen nach Peebles und Garber (1953) (aus Dissertation von Dipl.-Ing. Mario Koebe, Uni Paderborn 2004)

Im Allgemeinen führt ein größerer Blasendurchmesser zu einer stärkeren Auftriebskraft und damit zu einer schnelleren Aufstiegs geschwindigkeit. 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 Aufstiegs geschwindigkeit 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 Aufstiegs geschwindigkeit. 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 ausbildet, die in sich mehrere gegensinnige Wirbel enthält. Die Blasen geschwindigkeit nimmt wieder zu, da sich die Blase nun nicht mehr taumelnd, sondern stockend senkrecht nach oben bewegt.

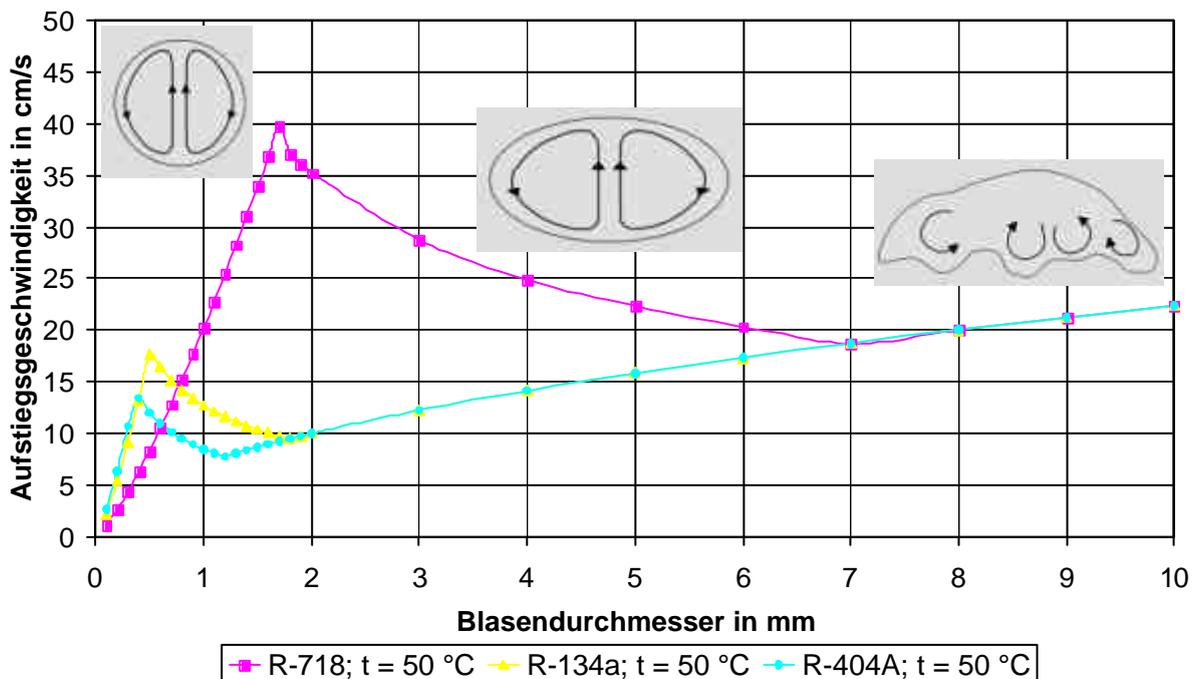


Bild 10. Aufstiegs geschwindigkeit über dem Blasendurchmesser für verschiedene Kältemittel. Berechnungen nach Dissertation von Mario Koebe, Uni Paderborn

5.8 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 Blasen­aufstiegs­geschwindigkeit über dem Blasendurchmesser für R-404A aufgezeichnet für verschiedene Verflüssigungstemperaturen.

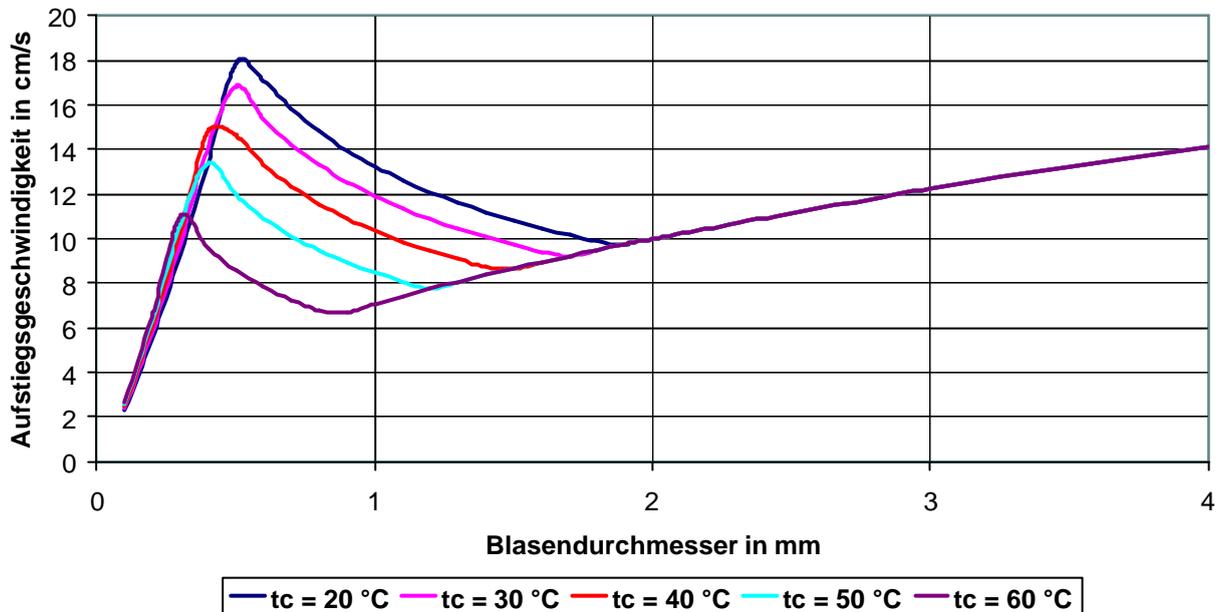


Bild 11. Blasen­aufstiegs­geschwindigkeit über Blasendurchmesser für verschiedene Verflüssigungstemperaturen mit R-404A.

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

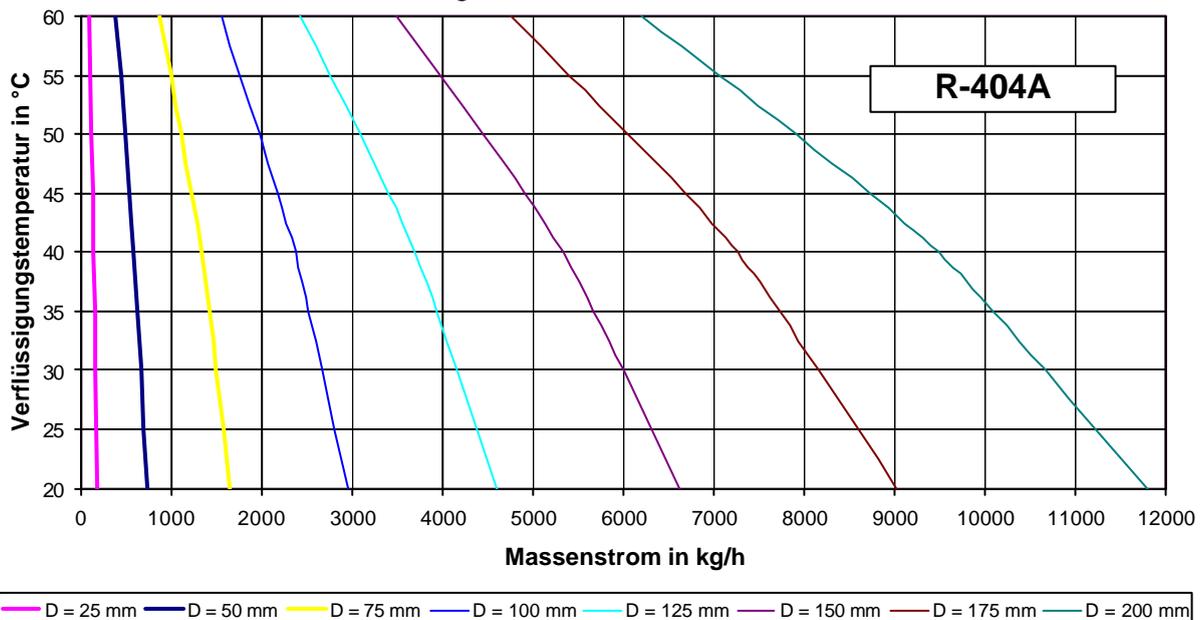


Bild 12. Bestimmung des Sammlerdurchmessers mit dem Kältemittelmassenstrom und der Verflüssigungstemperatur.

5.9 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 sicheren Betrieb des Expansionsventils sicher. Außerdem dient der Sammler zusätzlich als Ausgleichsbehälter bei betrieblichen Schwankungen.

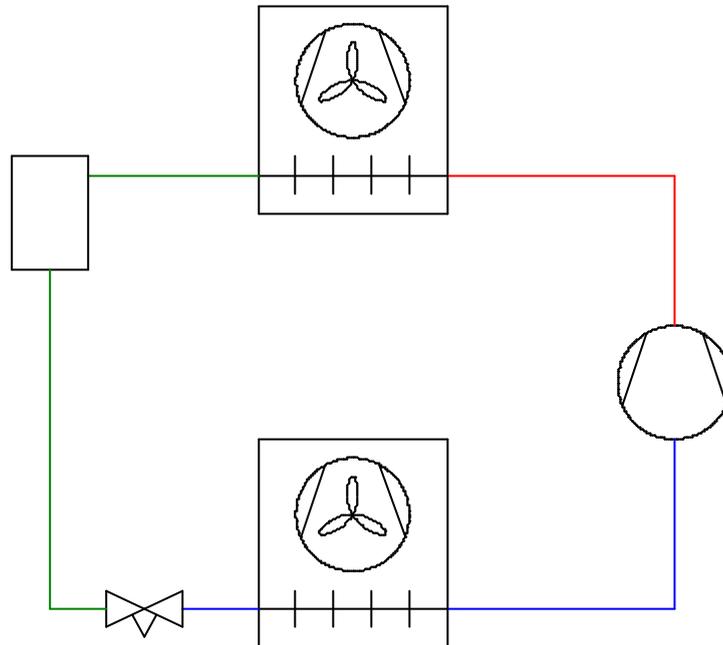


Bild 13. Einfacher Kältekreislauf einer Anlage mit Sammler in der Kondensatleitung hinter dem Verflüssiger.

Wenn man den Sammler nicht direkt in die Kondensatleitung einbindet, sondern im Bypass betreibt, dargestellt in 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.

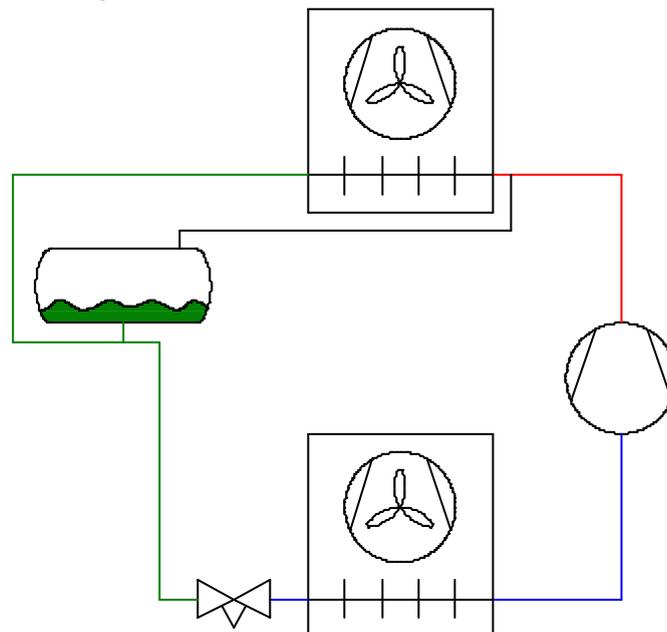


Bild 14. Kältekreislauf einer einfachen Anlage mit Sammler im Bypass.

6. Literaturverzeichnis

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. In DKV Tagungsband 2005.