

Experimentelle Bestimmung des Kältemittelfüllungsgrades in luftbeaufschlagten Verflüssigern und Verdampfern

Michael Stalter, Matthias Schweitzer, DKV Tagung 2005

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 sowie den Wärmeübertragerrohrschaltungen abhängig.

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.

2 Zusammenfassung

Verdampfer:

- Es ergaben sich für die Füllungsgrade unerwartet kleine Werte, die unterhalb von 10 % liegen.
- Die Verdampfungstemperatur und der Eintrittsdampfgehalt nehmen nur geringen Einfluss auf den Füllungsgrad.
- Bei konstantem Überhitzungsverhältnis bleibt der Füllungsgrad nahezu konstant.
- Mit sinkendem Überhitzungsverhältnis steigt, trotz steigender Massenstromdichte, der Füllungsgrad.
- Das Überhitzungsverhältnis scheint der für den Füllungsgrad bei Trockenexpansionsverdampfern dominierende Parameter zu sein.
- Hinsichtlich der Rohrschaltungen ergeben sich, abhängig der Betriebssituationen, erhebliche Unterschiede in den Füllungsgraden.

Verflüssiger:

- Die Messungen ergaben mit Sammlerbetrieb und einer Eintrittstemperaturdifferenz zwischen 10 ÷ 15 K einen Füllungsgrad unterhalb 25 %.
- Bei steigender Austrittsleitung des Verflüssigers ist bei Sammlerbetrieb eine minimale Massenstromdichte von etwa 80 kg/(s · m²) einzuhalten, um ein Fluten des Verflüssigers zu vermeiden.
- Für den störungsfreien Betrieb ohne Sammler sind bei den bisher untersuchten Verflüssigern erheblich größere Füllungsgrade notwendig.

Sammler:

- Der Sammler kann, um eine vollständige Phasentrennung zu gewährleisten, nicht beliebig klein werden. Die Messungen zeigen für R-134a eine maximale Massenstromdichte von etwa 86 kg/(s · m²) und 55 kg/(s · m²) für das Kältemittel R-404A.

3 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:

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

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

4 Durchführung der Messungen

4.1 Verwendete Wärmeübertrager

Um den Einfluss der Rohrschaltung auf den Füllungsgrad zu untersuchen, wurden luftbeaufschlagte Wärmeübertrager gleicher Größe, Oberflächen und -eigenschaft, gleichen Lamellenabstandes etc., für Verflüssiger und Verdampfer verwendet. Die Details sind Tabelle 1 zu entnehmen. Lediglich die Rohrschaltungen sind unterschiedlich, wie in Bild 1 und Bild 2 dargestellt.

Tabelle 1. Zur Messung verwendete Wärmeübertrager (Verdampfer und Verflüssiger)

Luft Eintrittsvolumenstrom	V_L in m^3/h	1440
Wärmetauscherrohre	\varnothing in mm	10,4 x 0,5
Länge der Rohre	in m	ca. 35
Rohrschaltung	versetzt, in mm	25 x 21,65
Lamellenabstand	in mm	2,0
Inneres Volumen des Wärmeübertragers	V_G in dm^3	3,15

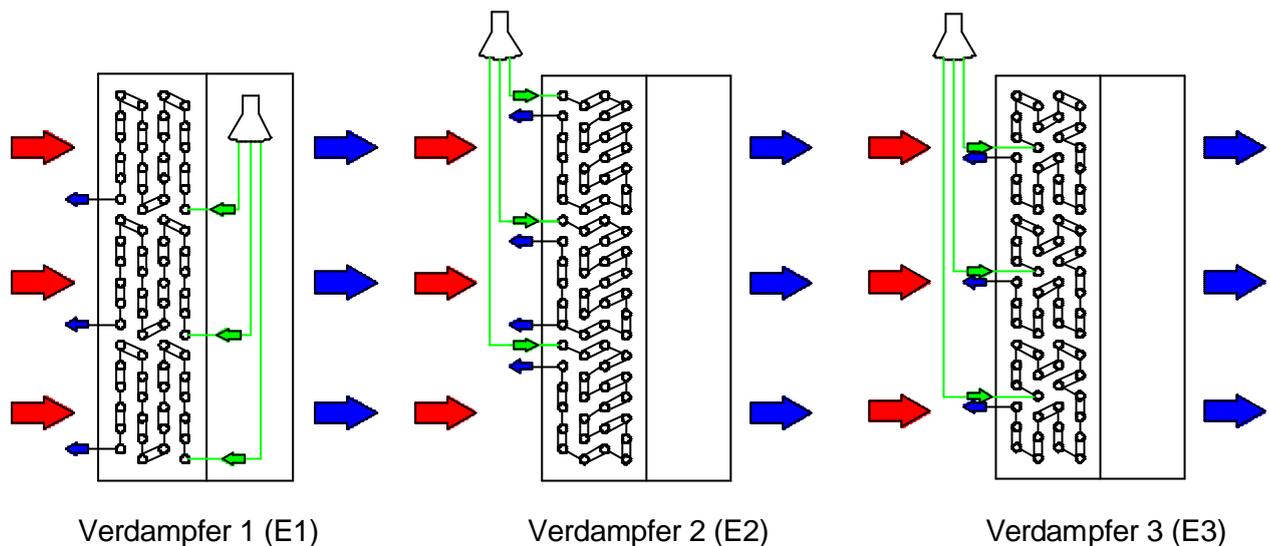


Bild 1. Rohrleitungen der Verdampfer

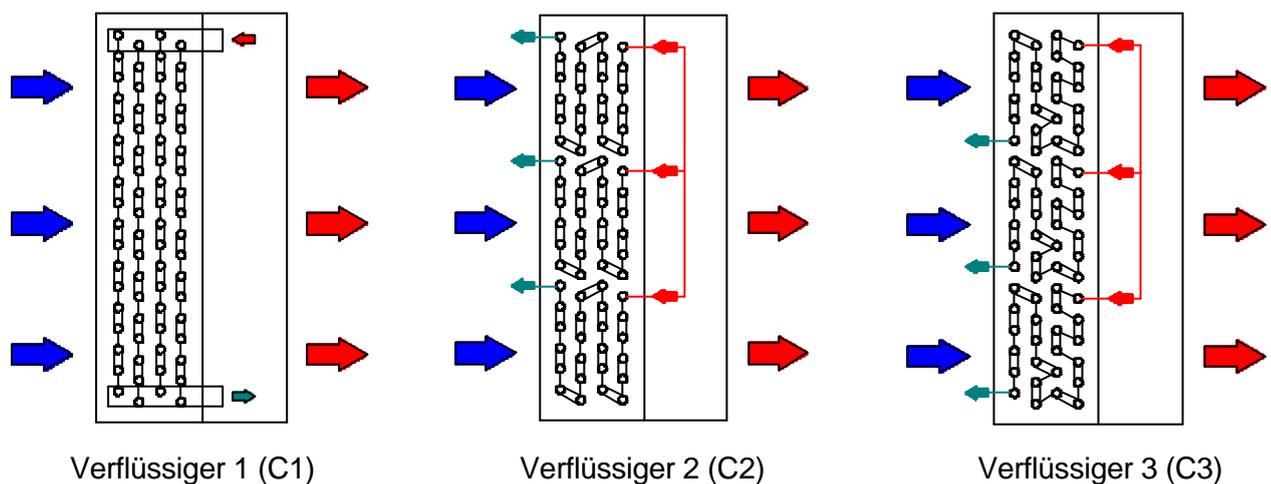


Bild 2. Rohrleitungen der Verflüssiger

Die Verdampfer sind in einer Kühlzelle installiert worden. Die Verflüssiger wurden im Luftkanal gemessen. Die Messungen an den Wärmeübertragern sind mit dem Kältemittel R-134a durchgeführt worden.

4.2 Bestimmung des Füllungsgrades

Im Beharrungszustand der Anlage ist der Wärmeübertrager zeitgleich am Ein- und Austritt abgesperrt und mittels Absaugen und Wägen des Kältemittelinhaltes die gesamte Kältemittelmasse im Wärmeübertrager bestimmt worden. Aus der Kältemittelmasse und den Kältemittelstoffdaten ist der Füllungsgrad errechnet worden.

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). Beim Verflüssiger ist die Übertragungsleistung über die Luftseite bilanziert worden. Der Massenstrom ergibt sich aus den ermittelten Leistungen und den Kältemittelstoffdaten.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden für Verdampfer und Verflüssiger getrennt betrachtet. Zeigten sich in den Messergebnissen keine Unterschiede zwischen den Rohrstellungen, so sind hier nur die Ergebnisse eines Wärmeübertragers repräsentativ dargestellt.

5.1 Verdampfer

5.1.1 Einfluss der Überhitzung

Bild 3 zeigt die Abhängigkeit des Füllungsgrades von der Verdampferaustrittsüberhitzung. Das mit steigender Überhitzung der Füllungsgrad abnimmt ist weniger erstaunlich, als die absoluten Füllungsgrade. Während den gesamten Messungen konnten keine Füllungsgrade über 10 % ermittelt werden.

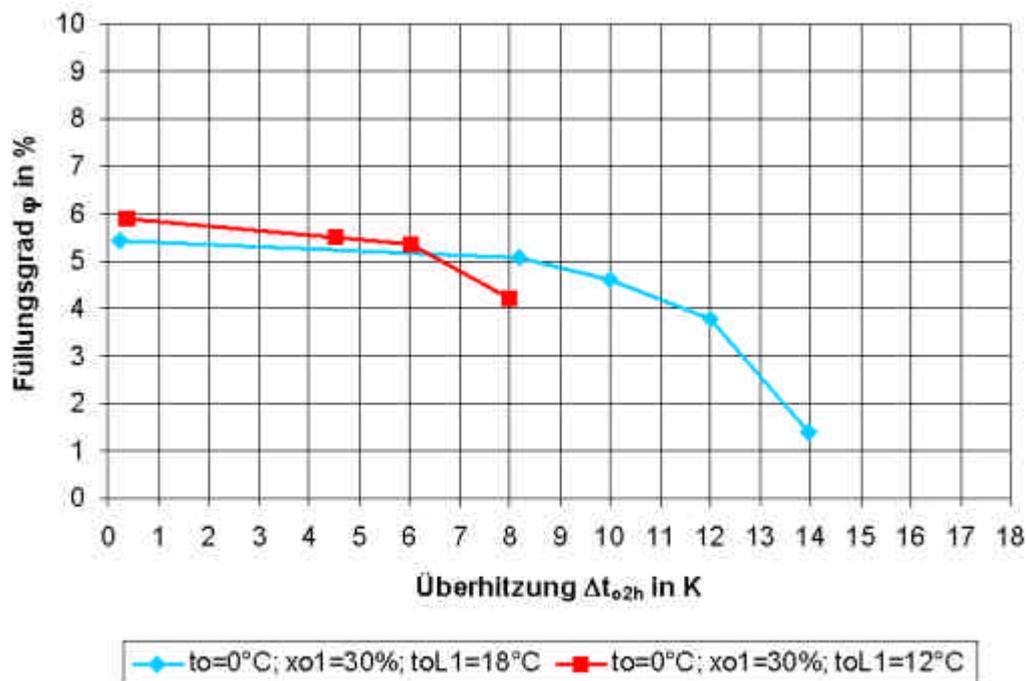


Bild 3. Füllungsgrad über Überhitzung $\Delta t_{0,2h}$ bei konstanten Luft Eintrittstemperaturen t_{0L1} und unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen t_0 - Verdampfer E3

5.1.2 Einfluss der Verdampfungstemperatur

Bei konstantem Eintrittsdampfgehalt nimmt die Verdampfungstemperatur praktisch keinen Einfluss auf den Füllungsgrad, siehe hierzu Bild 4.

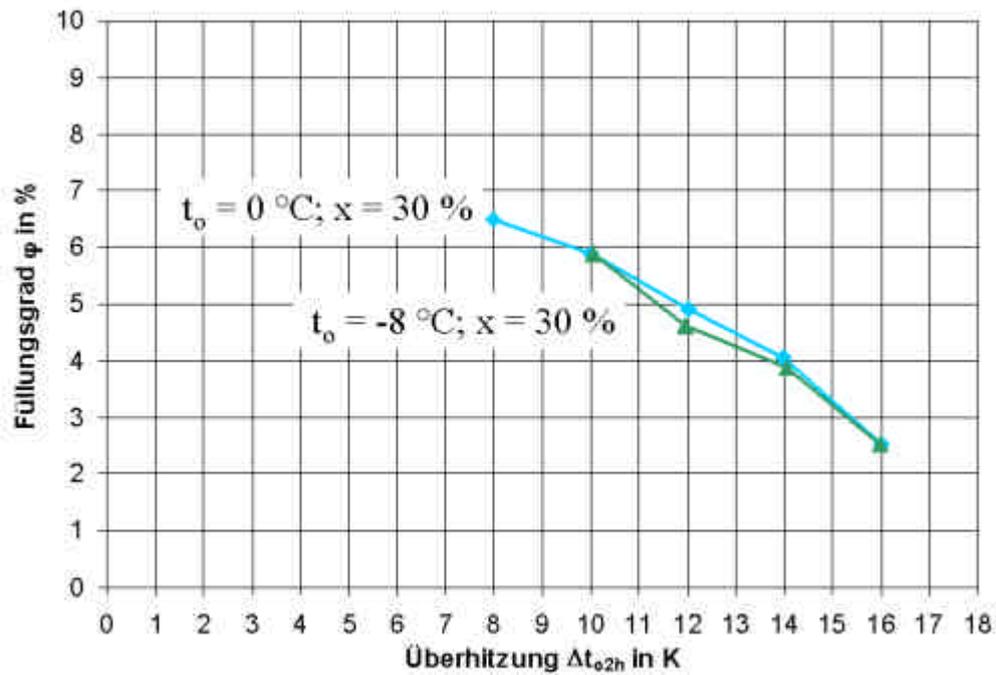


Bild 4. Füllungsgrad über Überhitzung Δt_{o2h} bei unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen t_o und konstantem Eintrittsdampfgehalt x - Verdampfer E1

5.1.3 Einfluss des Eintrittsdampfgehaltes

Wie Bild 5 zeigt, ist ein Einfluss des Dampfgehaltes messbar. Jedoch wirken sich unterschiedliche Überhitzungen im Vergleich zum Eintrittsdampfgehalt erheblich stärker aus.

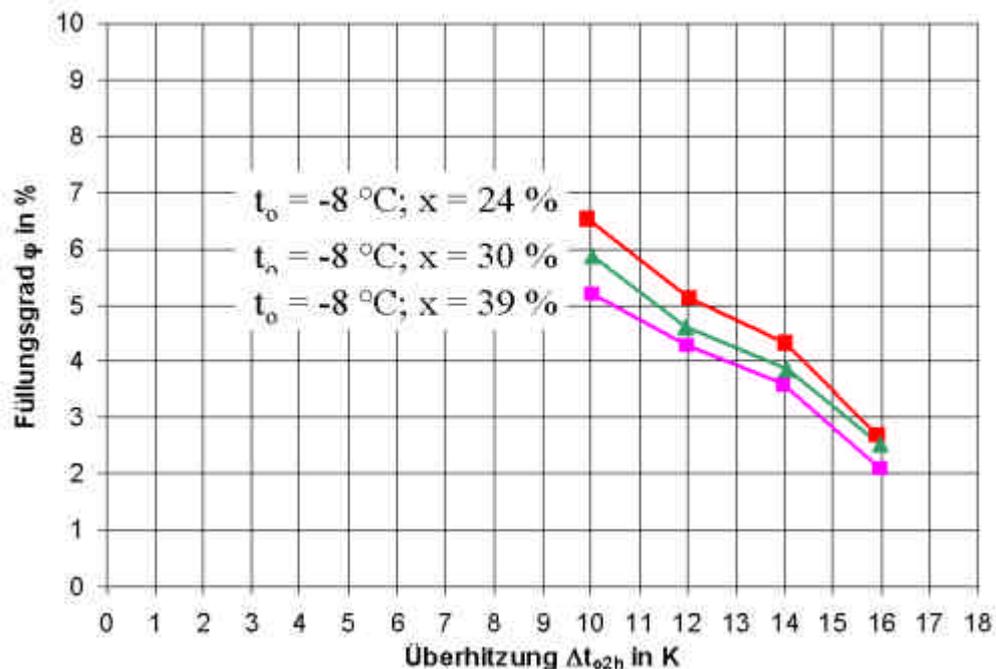


Bild 5. Füllungsgrad über Überhitzung Δt_{o2h} bei unterschiedlichen Eintrittsdampfgehalten x und konstanter Verdampfungstemperatur t_o - Verdampfer E1

5.1.4 Einfluss des Überhitzungsverhältnisses und der Massenstromdichte

Wird die Verdampfungstemperatur t_b , Überhitzung Δt_{o2h} und Eintrittsdampfgehalt x konstant gehalten und die Lufteintrittstemperatur am Verdampfer erhöht, wie in Bild 6 dargestellt, ergibt sich mit zunehmender Massenstromdichte ein größer werdender Füllungsgrad. Da der Füllungsgrad sowohl hier, als auch bereits in Bild 3 mit kleinerem Überhitzungsverhältnis gestiegen ist, scheint es nahe zu liegen, dass der Füllungsgrad um ein Vielfaches mehr vom Überhitzungsverhältnis als von der Verdampfungstemperatur, dem Eintrittsdampfgehalt oder der Massenstromdichte abhängt.

Dass sich die Massenstromdichte im Vergleich zum Überhitzungsverhältnis auf den Füllungsgrad nur sekundär auszuwirken scheint, kann man u. a. in Bild 7 erkennen. Hier wurde die Verdampfungstemperatur t_b konstantgehalten, während mit größerer Überhitzung Δt_{o2h} die Lufteintrittstemperatur erhöht wurde, wodurch sich die Massenstromdichte erhöhte und zugleich das Überhitzungsverhältnis f konstant blieb.

Das Ergebnis für Verdampfer E1 scheint diesen Zusammenhang praktisch zu belegen. Zwar trifft dies nicht eindeutig für die beiden anderen Verdampfer (E2 und E3) zu, da hier die Füllungsgrade mit steigender Überhitzung, bzw. Massenstromdichte kleiner werden, aber die Abnahmen sind mit 1,7 % bei E2 und 0,4 % bei E3 relativ gering.

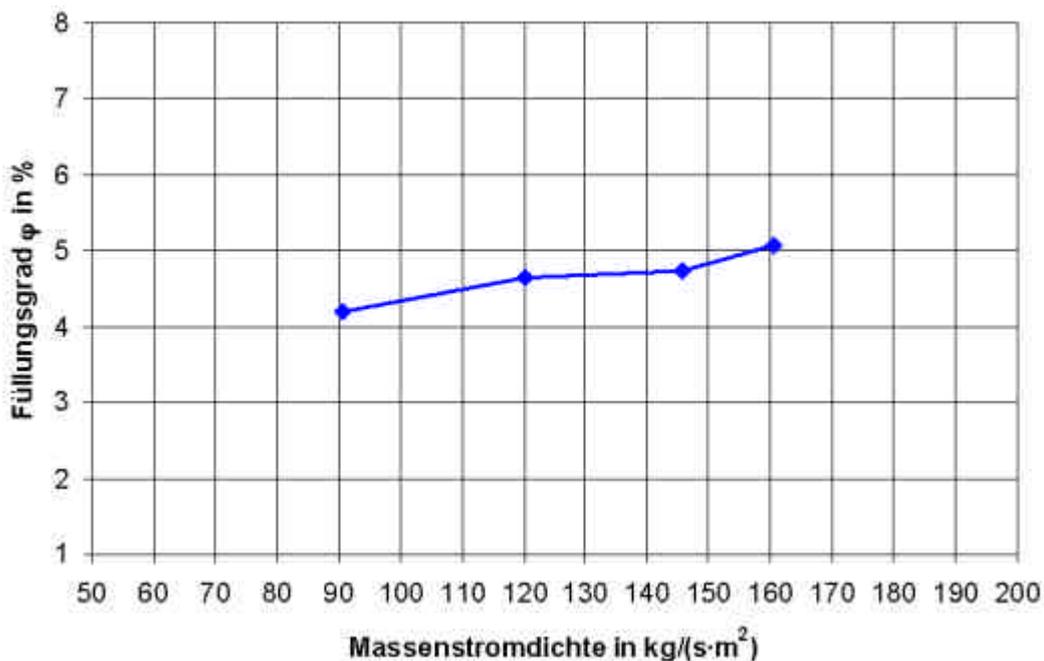


Bild 6. Füllungsgrad über Massenstromdichte bei konstanter Überhitzung Δt_{o2h} , konstantem Eintrittsdampfgehalt und konstanter Verdampfungstemperatur t_b

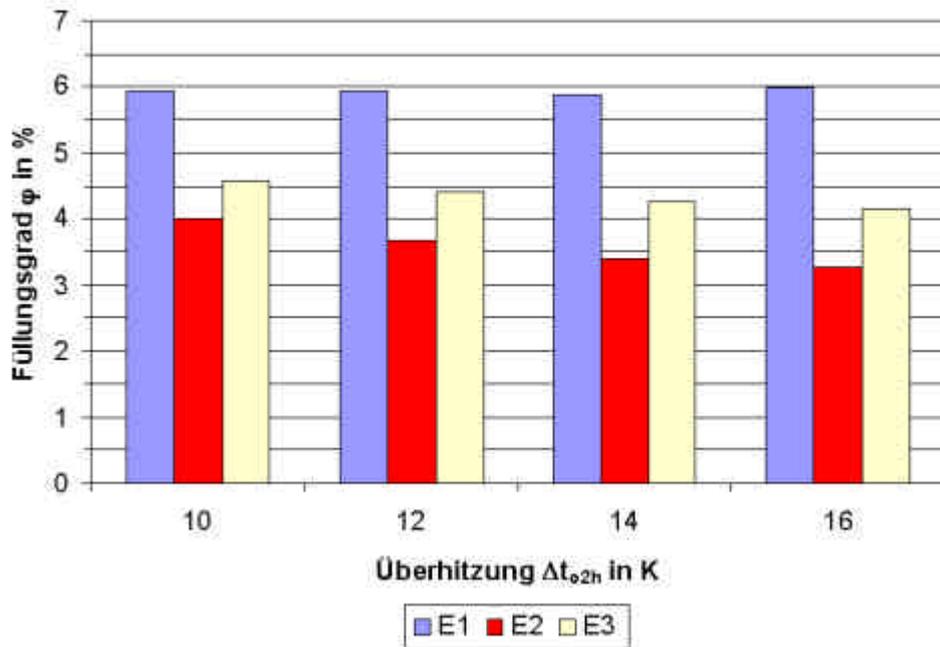


Bild 7. Vergleich der Verdampferfüllungsgrade über Überhitzung Δt_{o2h} bei konstantem Überhitzungsverhältnis f und konstanter Verdampfungstemperatur t_o

5.1.5 Vergleich der Rohrschaltungen

Bild 8 zeigt die Füllungsgrade der verschiedenen Verdampfer in Abhängigkeit des Überhitzungsverhältnisses. Der reine Gegenstromverdampfer (E1) mit fallender Überhitzungsstrecke zeigt höhere Füllungsgrade im Vergleich zu einer Kombination aus Gegen- und Gleichstromverdampfer (E2 und E3) mit steigender Überhitzungsstrecke. Isoliert für den Füllungsgrad betrachtet, ist eine Schaltung mit geringem Rohranteil im Gleichstrom und steigender Überhitzungsstrecke am günstigsten. Werden hingegen die Übertragungsleistungen der Verdampfer mitbetrachtet (Bild 9), so ergeben sich deutliche Vorteile für einen größeren Rohranteil im Gleichstrom.

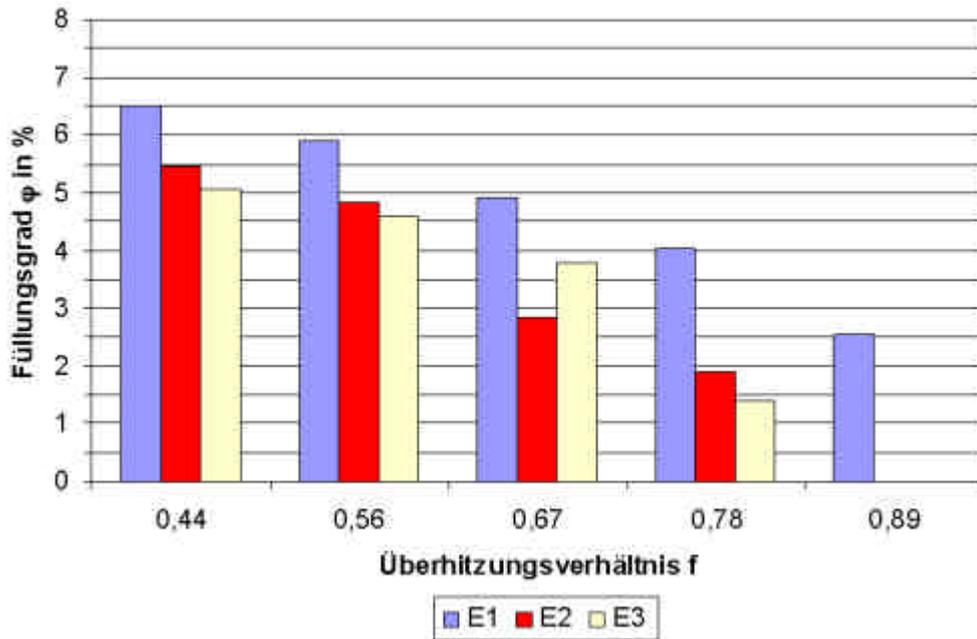


Bild 8. Füllungsgradvergleich der Verdampfer über dem Überheizungsverhältnis f bei konstanter Luft Eintrittstemperatur t_{oL1} und konstanter Verdampfungstemperatur t_o

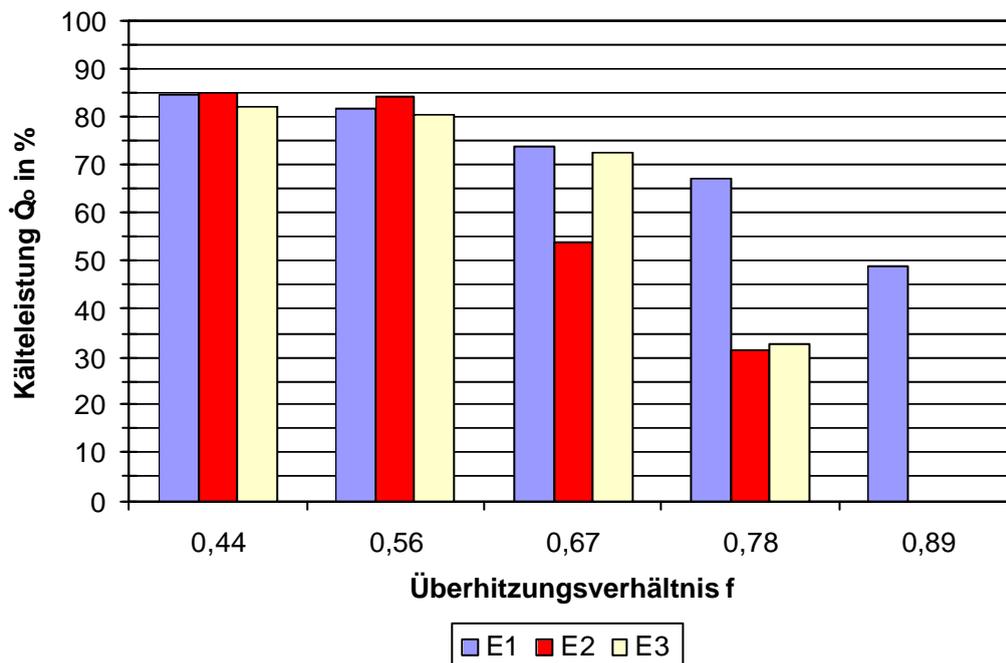


Bild 9. Kälteleistungsvergleich der Verdampferschaltungen über dem Überheizungsverhältnis f bei konstanter Luft Eintrittstemperatur t_{oL1} und konstanter Verdampfungstemperatur t_o

5.2 Ergebnisse Verflüssiger

5.2.1 Einfluss der Eintrittstemperaturdifferenz

Bild 10 zeigt, dass mit steigender Eintrittstemperaturdifferenz (steigender Leistung und Massenstromdichte) der Füllungsgrad zunimmt. Während die Übertragungsleistung nahezu unabhängig der absoluten Lage der Eintrittstemperaturdifferenz ist, so ist mit höheren Luft Eintrittstemperaturen der Füllungsgrad größer. Diese Messreihen sind mit einem dem Wärmeübertrager nachfolgend angeordneten Sammler durchgeführt worden.

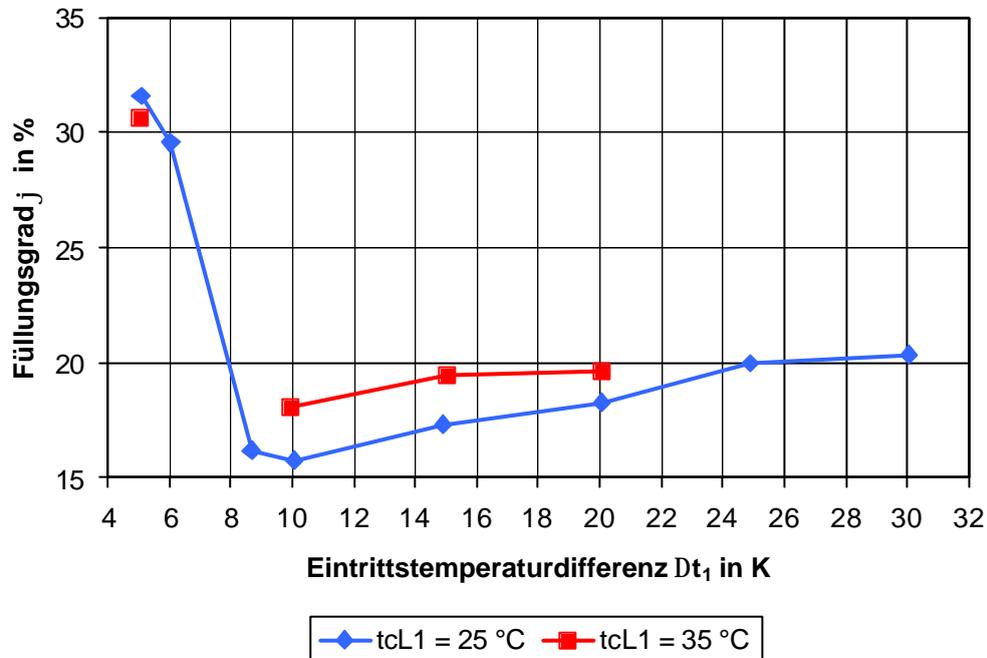


Bild 10. Füllungsgrad über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 , bei verschiedenen Luft eintrittstemperaturen t_{cL1} , Sammlerbetrieb - Verflüssiger C2

Der stark ansteigende Füllungsgrad bei Eintrittstemperaturdifferenzen unterhalb von 10 K ist auf die Rohrschaltung mit einer Steigleitung am Austritt (siehe Bild 11, obere Rohrschaltung) zurückzuführen. Die Verflüssigerrohrschaltung mit fallender Unterkühlungsstrecke (siehe Bild 11, untere Rohrschaltung) zeigt dieses Verhalten nicht. Mit geringer werdender Massenstromdichte wird die Flüssigkeit nur noch unzureichend durch das steigende Rohr gefördert. Bei diesen Messungen ergab sich eine minimale Massenstromdichte von etwa $80\text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, bei der die Flüssigkeit gerade noch ausreichend befördert wird.

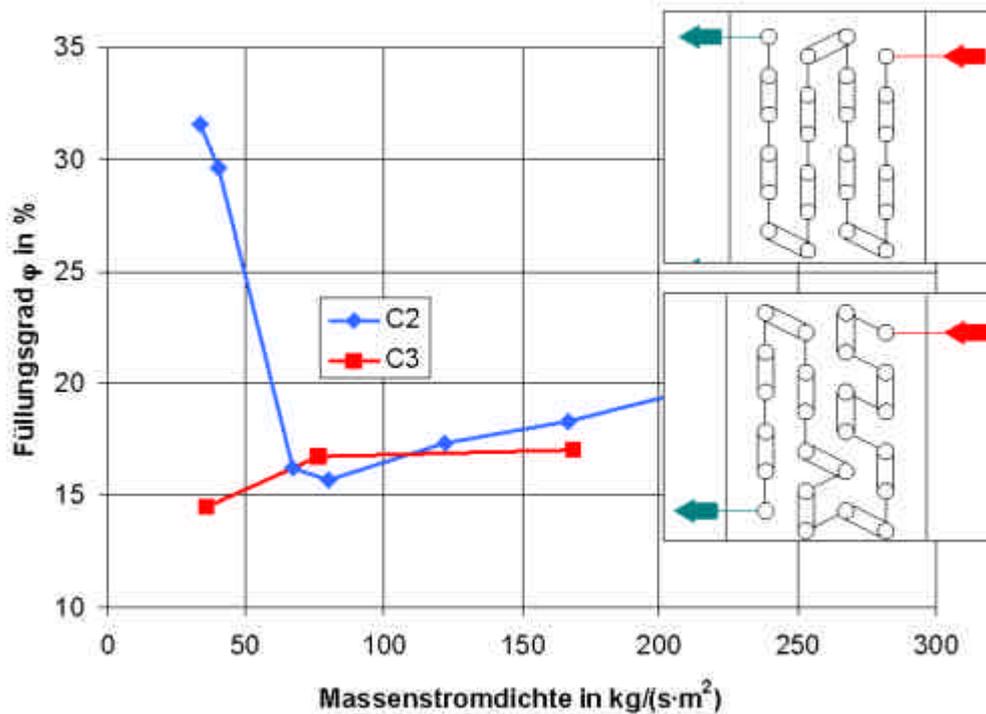


Bild 11. Füllungsgrad über der Massenstromdichte, Sammlerbetrieb

5.2.2 Einfluss der Unterkühlung

Wird hingegen der Kältemittelkreislauf ohne Sammler und mit einer konstanten Unterkühlung am Verflüssigeraustritt von ca. 3 K betrieben, nimmt die Rohrschaltung praktisch keinen Einfluss mehr auf den Füllungsgrad, wie in Bild 12 zu sehen ist.

Bei sehr hohen Massenstromdichten scheint der Füllungsgrad unabhängig von der Rohrschaltung und unabhängig des Betriebes mit oder ohne Sammler zu sein. Bei kleineren Massenstromdichten hingegen, im üblichen Einsatzbereich des Verflüssigers bei Eintrittstemperaturdifferenzen von 10 ÷ 15 K, zeigt der Einsatz des Sammlers bezüglich des Füllungsgrades deutliche Vorteile.

Mit steigenden Unterkühlungswerten steigt erwartungsgemäß der Füllungsgrad, siehe hierzu Bild 13.

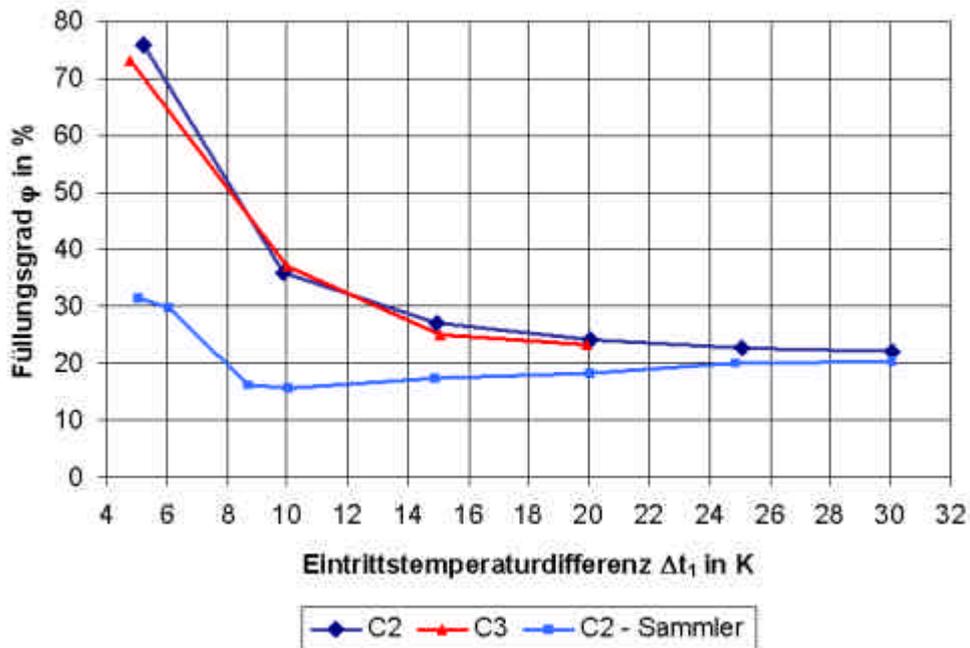


Bild 12. Füllungsgrad über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 und konstanter Lufteintrittstemperatur t_{cL1} , ohne Sammler mit $\Delta t_{c2u} = 3$ K - ausgenommen C2 mit Sammler

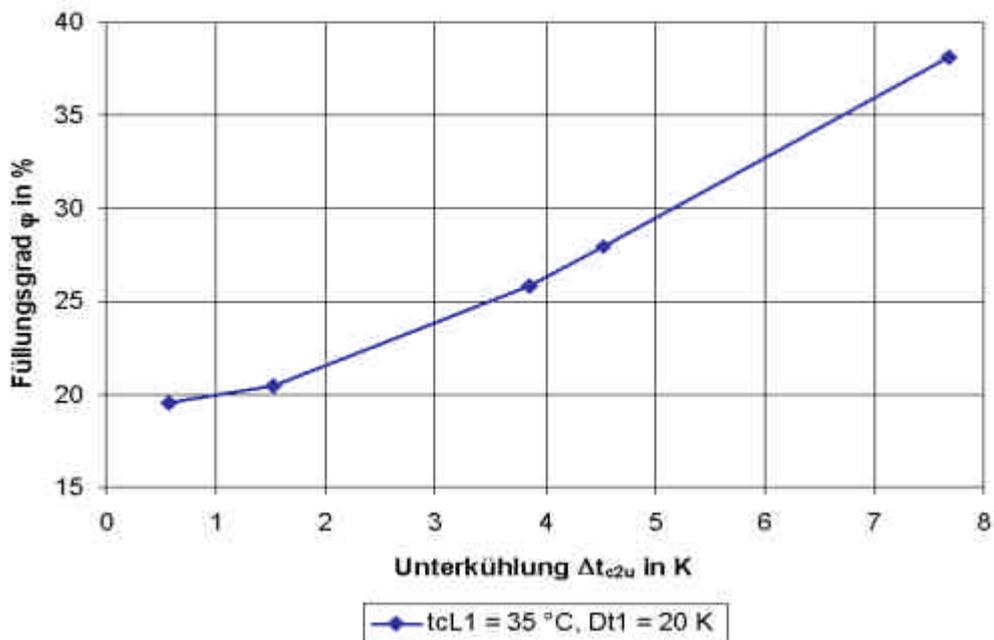


Bild 13. Füllungsgrad über der Unterkühlung Δt_{c2u} bei konstanter Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 und konstanter Lufteintrittstemperatur t_{cL1} - Verflüssiger C2

5.2.3 Vergleich der Rohrschaltungen

Im Vergleich der Rohrschaltungen ergaben sich signifikante Unterschiede hinsichtlich des Füllungsgrades (Bild 14). Die fallende Unterkühlungsstrecke (Verflüssiger C3) erweist sich bei sehr geringen Eintrittstemperaturdifferenzen (< 10 K) als die Günstigste. Oberhalb 10 K Eintrittstemperaturdifferenz sind sich die Schaltungen C2 und C3 nahezu ebenbürtig. Vorteile bei der Übertragungsleistung bei Verflüssiger C2 ergeben jedoch etwas höhere Füllungsgrade.

Schaltung C1 ist hinsichtlich Übertragungsleistung und des Füllungsgrades, unabhängig der Betriebssituation, ungünstig.

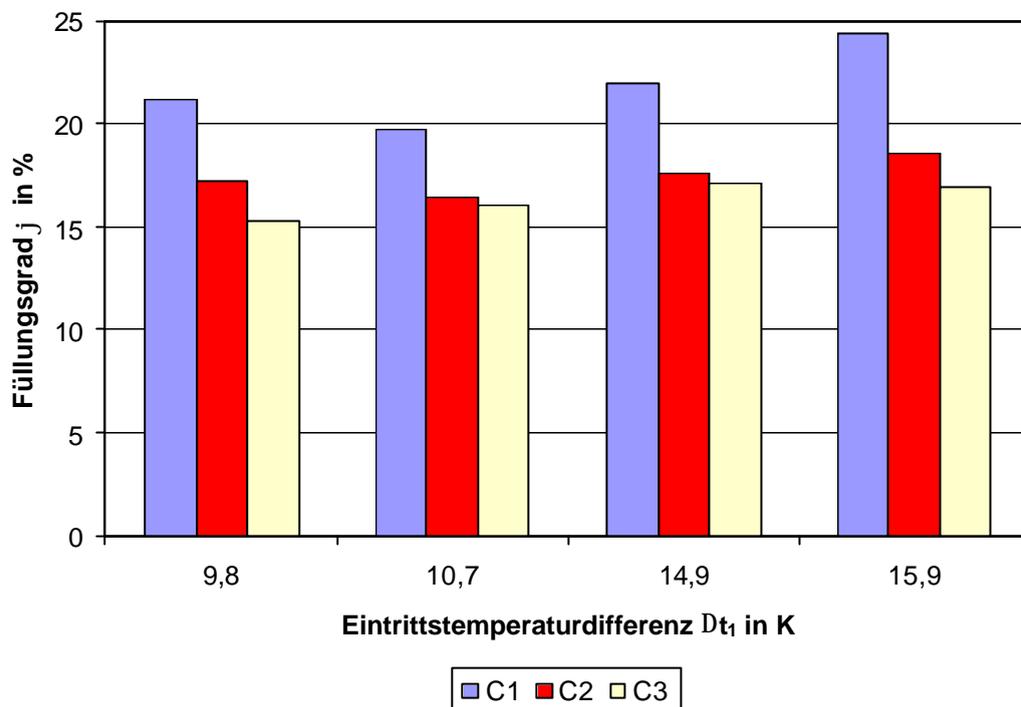


Bild 14. Füllungsgrad der verschiedenen Verflüssiger über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1

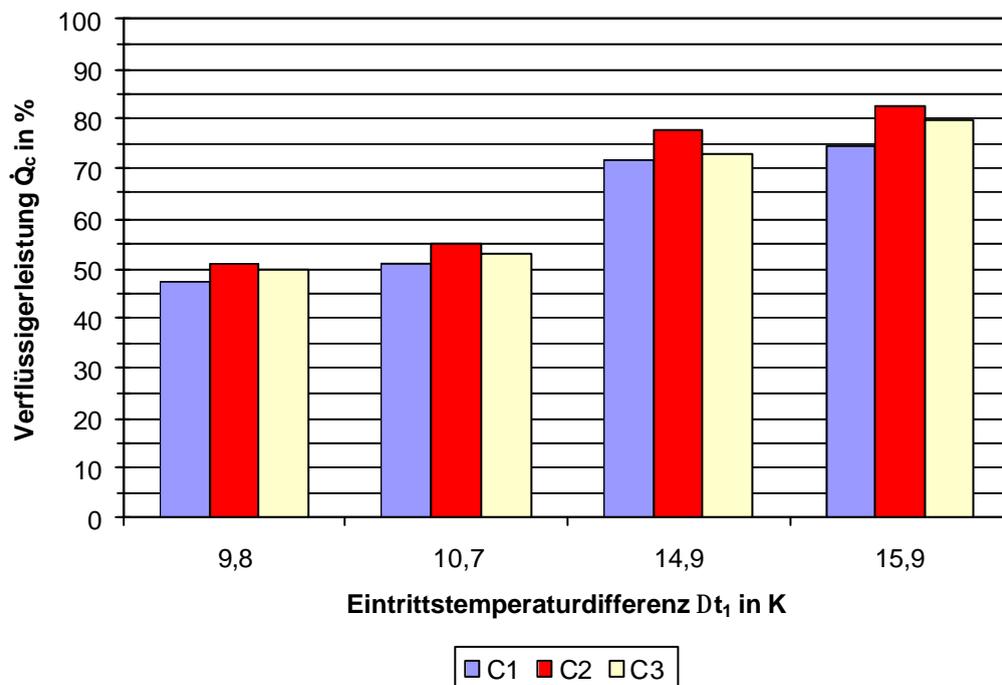


Bild 15. Leistungsvergleich der Verflüssiger über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1

5.3 Sammler

Bei den bisherigen Untersuchungen am Sammler ist, unter konstanten Betriebsbedingungen, die Massenstromdichte im Sammler soweit erhöht worden, bis die Dampfblasen aus der Kondensatleitung im Sammler nicht mehr aufsteigen konnten und in die Flüssigkeitsleitung mitgerissen wurden.

Die Ergebnisse für die maximale Massenstromdichte sind:

Kältemittel R-134a:	86 kg/(s · m ²)
Kältemittel R-404A:	55 kg/(s · m ²)

6 Ausblicke und offene Fragen

- Welchen Einfluss nimmt das Kältemittel auf den Füllungsgrad?
- Sind die Ergebnisse allgemein auf andere Rohr-Lamellenapparate anwendbar?
- Ist der Füllungsgrad bei gleichen Betriebsbedingungen nur noch von der Massenstromdichte abhängig?
- Wie verhalten sich flüssigkeitsbeaufschlagte Wärmeübertrager?

Die Messungen sind am TWK noch nicht abgeschlossen, so dass obige Fragen noch beantwortet werden.