

Experimentelle Bestimmung des Füllungsgrades in luftbeaufschlagten Verflüssigern und Verdampfern

Einflussgrößen auf die Kältemittelfüllmenge von Wärmeübertragern

Michael Stalter, Karlsruhe

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. Aber wie weit kann diese Reduzierung gehen? 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.

Mit reduzierten Sammlervolumina ergeben sich folgende Vorteile:

- Kleinerer, kostengünstiger Sammler
- Reduzierung der Kältemittelmenge und der Kosten
- Geringere Kältemittlemissionen im Harvariefall
- 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 sowie den Wärmeübertragerrohrschaltungen abhängig.

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:

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

Messungen

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. Ledig-

Luft Eintrittsvolumenstrom	V_L in m^3/h	1440
Wärmeübertragerrohre	\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

lich die Rohrschaltungen sind unterschiedlich, wie in Bild 1 und Bild 2 dargestellt.

Die Verdampfer waren in einer Kühlzelle installiert; die Verflüssiger wurden im Luftkanal gemessen. Sämtliche Messungen an den Wärmeübertragern wurden mit dem Kältemittel R134a ausgeführt.

Bestimmung des Füllungsgrades

Im Beharrungszustand der Anlage wurde der Wärmeübertrager zeitgleich am Ein- und Austritt abgesperrt; mittels Absaugen und Wägen des Kältemittelinhaltes konnte die gesamte Kältemittelmasse im Wärmeübertrager bestimmt werden. Aus der Kältemittelmasse und den Kältemittelstoffdaten ließ sich der Füllungsgrad errechnen.

zum Autor

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



Bestimmung des Kältemittelmassenstromes

Der Massenstrom wurde in der Flüssigkeitsleitung der Kälteanlage bestimmt.

Als Kontrollverfahren für den Massenstrom diente beim Verdampfer das Kalorimetervorgehen (Summe aller zugeführten

Tabelle 1
Zur Messung verwendete Wärmeübertrager (Verdampfer und Verflüssiger)

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

Ergebnisse

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

Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 18. November 2005 in Würzburg.

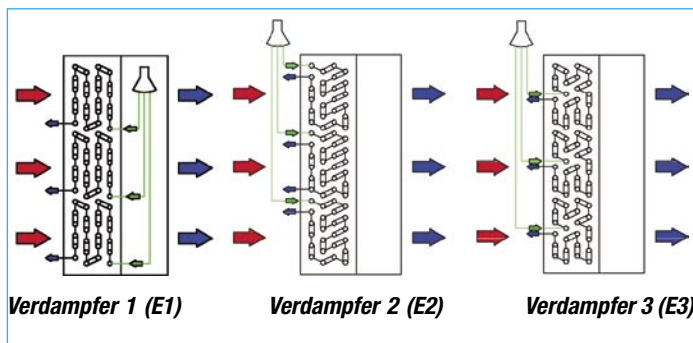


Bild 1 Rohrleitungen der Verdampfer

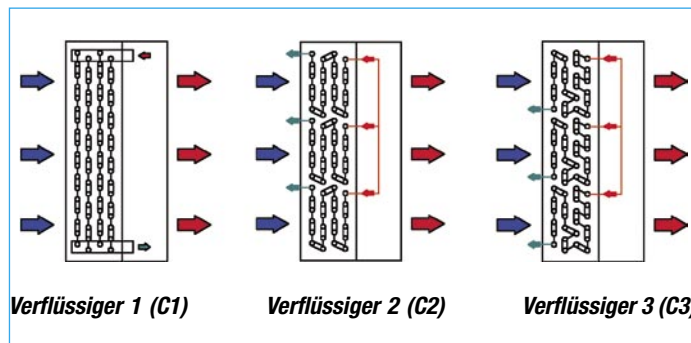


Bild 2 Rohrleitungen der Verflüssiger

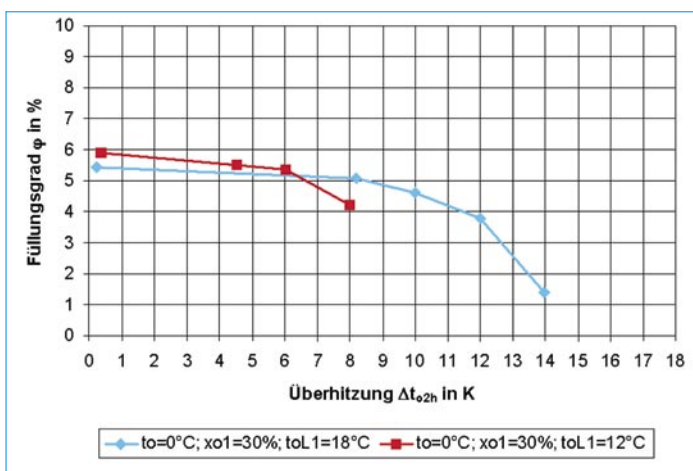


Bild 3 Füllungsgrad über Überhitzung Δt_{o2h} bei unterschiedlichen Lufttemperatur- und Verdampfungstemperatur t_o – Verdampfer E3

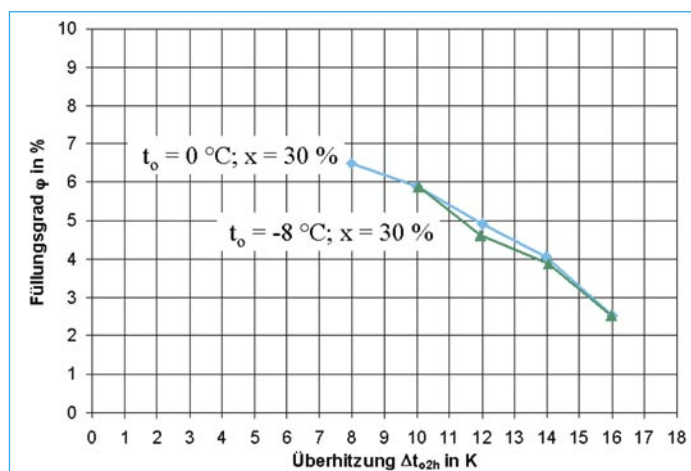


Bild 4 Füllungsgrad über Überhitzung Δt_{o2h} bei unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen t_o und konstantem Eintrittsdampfgehalt x – Verdampfer E1

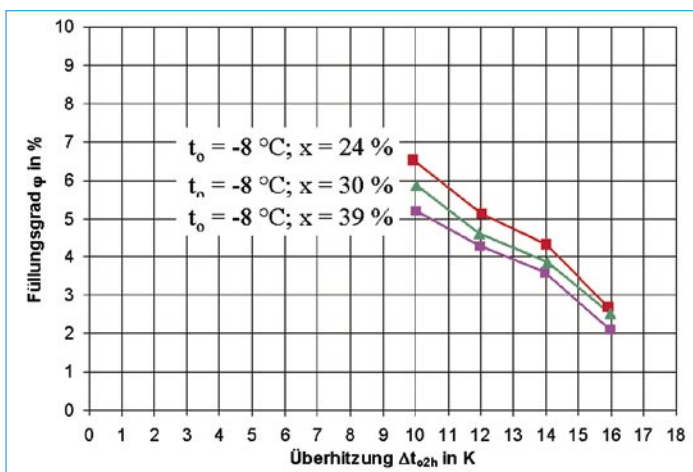


Bild 5 Füllungsgrad über Überhitzung Δt_{o2h} bei unterschiedlichen Eintrittsdampfgehalten x und konstanter Verdampfungstemperatur t_o – Verdampfer E1

Verdampfer

Einfluss der Überhitzung

Bild 3 zeigt die Abhängigkeit des Füllungsgrades von der Verdampferaustrittsüberhitzung. Dass mit steigender Überhitzung der Füllungsgrad abnimmt ist weniger erstaunlich, als die absoluten Füllungsgrade. Bei den gesamten Messungen konnten

keine Füllungsgrade über 10 % ermittelt werden.

Einfluss der Verdampfungstemperatur

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

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.

Einfluss des Überhitzungsverhältnisses und der Massenstromdichte

Werden Verdampfungstemperatur t_o , Überhitzung Δt_{o2h} und Eintrittsdampfgehalt x konstant gehalten und die Lufttemperatur 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 auswirkt

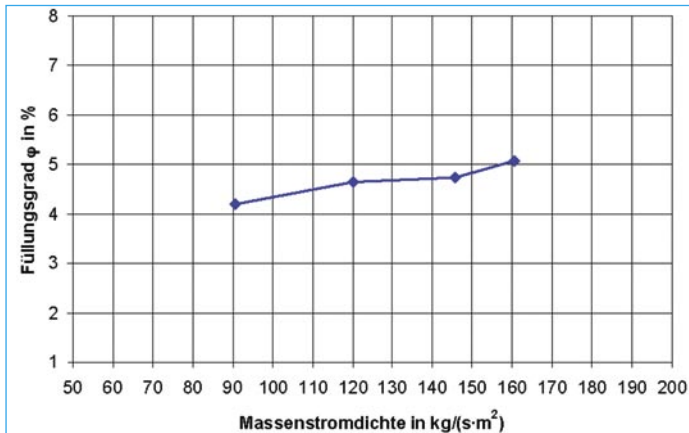


Bild 6 Füllungsgrad über Massenstromdichte bei konstanter Überhitzung Δt_{02h} , konstantem Eintrittsdampfgehalt und konstanter Verdampfungstemperatur t_0

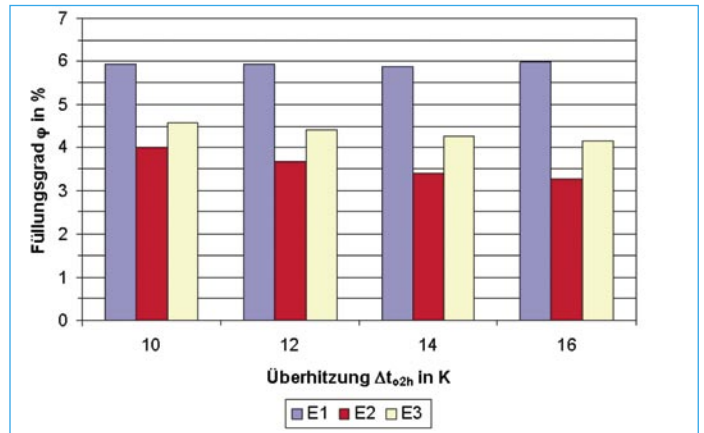


Bild 7 Vergleich der Verdampferfüllungsgrade über Überhitzung Δt_{02h} bei konstantem Überhitzungsverhältnis f und konstanter Verdampfungstemperatur t_0

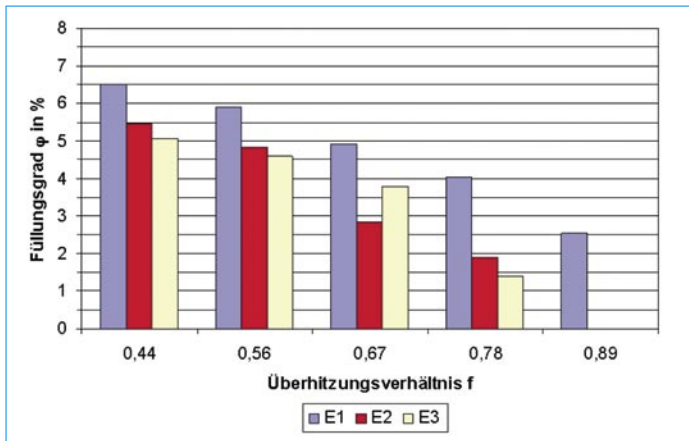


Bild 8 Füllungsgradvergleich der Verdampfer über dem Überhitzungsverhältnis f bei konstanter Lufttemperatur t_{0L1} und konstanter Verdampfungstemperatur t_0

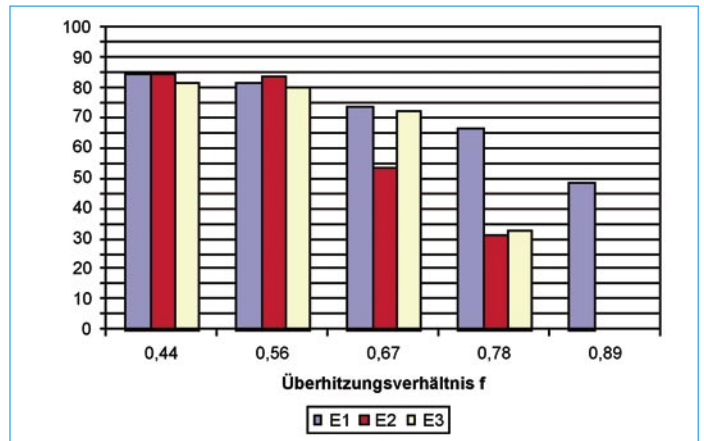


Bild 9 Kälteleistungsvergleich der Verdampferschaltungen über dem Überhitzungsverhältnis f bei konstanter Lufttemperatur t_{0L1} und konstanter Verdampfungstemperatur t_0

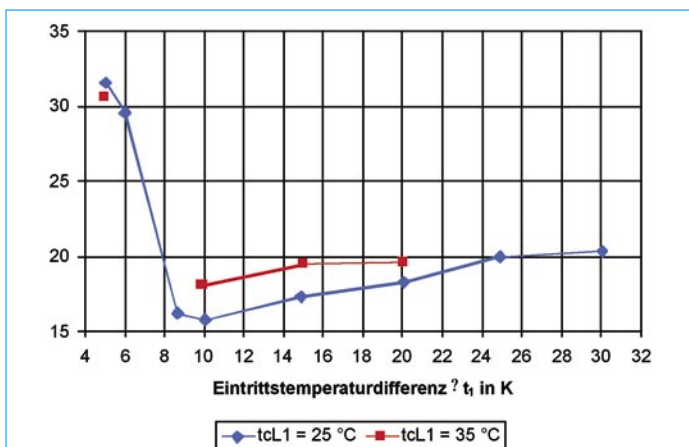


Bild 10 Füllungsgrad über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 , bei verschiedenen Lufttemperaturdifferenzen t_{aL1} , Sammlerbetrieb – Verflüssiger C2

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.

Vergleich der Rohrschaltungen

Bild 8 zeigt die Füllungsgrade der verschiedenen Verdampfer in Abhängigkeit vom Überhitzungsverhältnis. 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 mit betrachtet (Bild 9), so ergeben sich deutliche Vorteile für einen größeren Rohranteil im Gleichstrom.

ken scheint, kann man u. a. in Bild 7 erkennen. Hier wurde die Verdampfungstemperatur t_0 konstant gehalten, während mit größerer Überhitzung Δt_{02h} die Lufttemperatur erhöht wurde, wodurch sich die Massenstromdichte erhöhte und zu-

gleich 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,

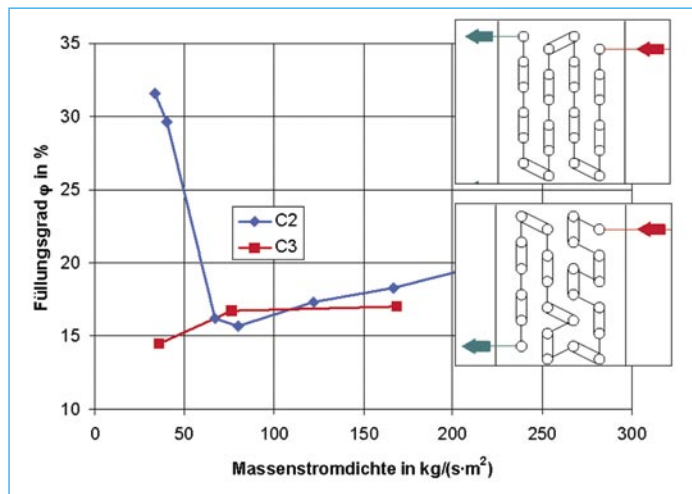


Bild 11 Füllungsgrad über der Massenstromdichte, Sammlerbetrieb

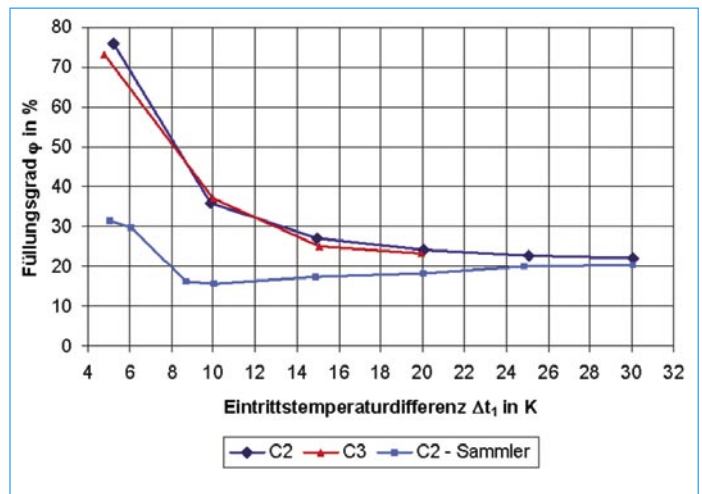


Bild 12 Füllungsgrad über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 und konstanter Lufttemperatur t_{cL1} , ohne Sammler mit $\Delta t_{c2u} = 3 \text{ K}$ - ausgenommen C2 mit Sammler

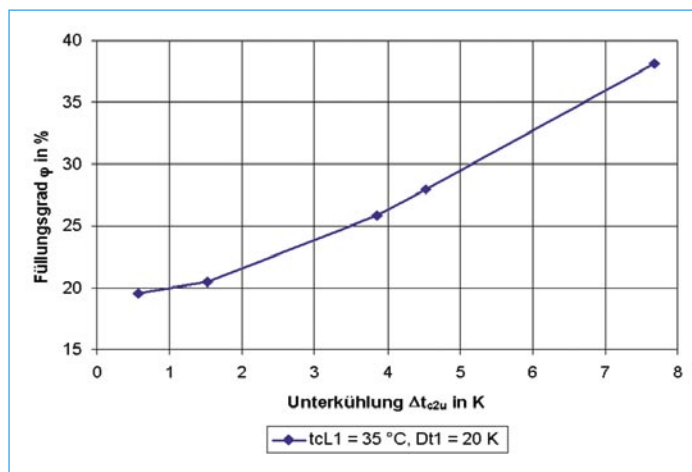


Bild 13 Füllungsgrad über der Unterkühlung Δt_{c2u} bei konstanter Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 und konstanter Lufttemperatur t_{cL1} - Verflüssiger C2

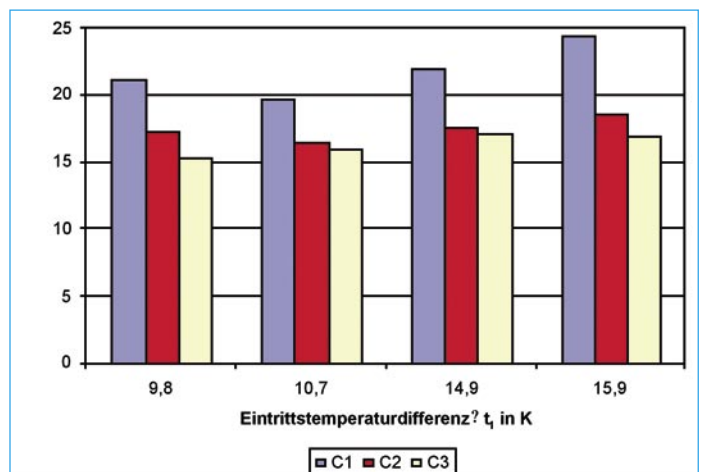


Bild 14 Füllungsgrad der verschiedenen Verflüssiger über der Eintrittstemperaturdifferenz Δt_1 (Sammlerbetrieb)

Verflüssiger

Einfluss der Eintrittstemperaturdifferenz

Bild 10 zeigt, dass mit steigender Eintrittstemperaturdifferenz (steigender Leistung und Massenstromdichte) der Füllungsgrad zunimmt. Während die Übertragungsleistung nahezu unabhängig von der absoluten Lage der Eintrittstemperaturdifferenz ist, so ist mit höheren Lufttemperaturdifferenzen der Füllungsgrad größer. Diese Messreihen wurden mit einem dem Wärmeübertrager nachgeschalteten Sammler ausgeführt.

Der stark ansteigende Füllungsgrad bei Eintrittstemperaturdifferenzen unterhalb von 10 K ist auf die Rohrleitung mit einer Steigleitung am Austritt (siehe Bild 11, obere Rohrleitung) zurückzuführen. Die Verflüssigerrohrleitung mit fallender Unterkühlungsstrecke (siehe Bild 11, untere

Rehrschaltung) 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.

Einfluss der Unterkühlung

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

Bei sehr hohen Massenstromdichten scheint der Füllungsgrad unabhängig von der Rohrleitung und unabhängig vom Betrieb mit oder ohne Sammler zu sein. Bei kleineren Massenstromdichten hingegen, im üblichen

Einsatzbereich des Verflüssigers bei Eintrittstemperaturdifferenzen von 10 bis 15 K, zeigt der Einsatz des Sammlers bezüglich des Füllungsgrades deutliche Vorteile.

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

Vergleich der Rohrleitungen

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

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

Sammler

Bei den bisherigen Untersuchungen am Sammler wurde, unter konstanten Betriebsbedingungen, die Massenstromdichte im Sammler soweit erhöht, 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 R134a: $86 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$

Kältemittel R404A: $55 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$

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 und 15 K einen Füllungsgrad unterhalb 25%.
- Bei steigender Austrittsleitung des Verflüssigers ist bei Sammlerbetrieb eine minimale Massenstromdichte von etwa $80 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 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.

Ausblick 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 diese Fragen noch beantwortet werden. ■