

**Über das Strömungsverdampfen von CO<sub>2</sub> im  
glatten und innen berippten Rohr -  
Hydrodynamik, Wärmeübergang, Druckverlust  
- Kurzfassung -**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)**

der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik der  
Universität Fridericiana Karlsruhe (TH)  
vorgelegte

**DISSERTATION**  
(Prüfungsexemplar)

von

Dipl.-Ing. Arndt-Erik Schael  
geboren in Wolfsburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Matthias Kind

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Lothar Oellrich

## 1 Einleitung

Für Kompressionskältemaschinen und Wärmepumpen ist  $\text{CO}_2$  ein wichtiges, umweltfreundliches Arbeitsmedium, das für die unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt wird. In solchen Anlagen ist der Verdampfer ein zentraler Apparat, der großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat. Für die Auslegung des Verdampfers einer solchen Anlage ist es wichtig, dass genaue Berechnungsmethoden für den Wärmeübergang und Druckverlust beim Strömungsverdampfen von  $\text{CO}_2$  in glatten und innen berippten Rohren zur Verfügung stehen. Obwohl zahlreiche Untersuchungen zum Strömungsverdampfen von  $\text{CO}_2$  im glatten Rohr veröffentlicht wurden, fehlen einerseits Messungen bei tiefen Temperaturen, andererseits systematische Untersuchungen über einen breiten Parameterbereich. Zum Strömungsverdampfen von  $\text{CO}_2$  in einem innen berippten Rohr wurde bisher nur eine Untersuchung bei einer Druckstufe veröffentlicht.

Ziel dieser Arbeit war es, den Wärmeübergangskoeffizienten und den Druckverlust beim Strömungsverdampfen von  $\text{CO}_2$  in einem glatten und einem innen berippten horizontalen Rohr zu messen. Die Ergebnisse sollten mit vorhandenen Korrelationen verglichen werden und wo nötig sollten Anpassungen vorgenommen werden. Neuere Korrelationen zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten beim Strömungsverdampfen im horizontalen Rohr berücksichtigen die herrschende Strömungsform, da nur am benetzten Teil des Rohres der Wärmeübergangskoeffizient des Strömungsverdampfens wirksam ist. Daher wurden zusätzlich adiabate Strömungsformenuntersuchungen für das Glattrohr und das Rippenrohr durchgeführt und die Beobachtungen mit Strömungsformenkarten verglichen.

## 2 Experimentelles

Die verwendete Versuchsanlage kann mit einer Glattrohrmessstrecke (Nickel, Innendurchmesser 14 mm) und einer Rippenrohrmessstrecke (Kupfer, Rohrtyp Cuprofin EDX der Firma Wieland, Kernrohrdurchmesser 8,62 mm) betrieben werden. Beide Messstrecken sind über dem Umfang segmentiert, wobei jedes Segment einzeln beheizbar ist und die Temperatur nahe der Rohrwand gemessen wird. So ist es möglich, den Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit vom Benetzungszustand zu messen. Als thermische Randbedingung wurde eine konstante Wandtemperatur gewählt. Die Untersuchungen wurden bei vier Drücken (10 bar, 19,1 bar, 26,4 bar und 39,7 bar, d. h. reduzierte Drücke  $p_r$  von 0,136 – 0,259 – 0,358 – 0,538) und über dem gesamten Bereich der Verdampfung durchgeführt. Zusätzlich wurde der Wärmeübergangskoeffizient im Glattrohr bei 57,3 bar ( $p_r = 0,777$ ) gemessen. Für die Wärmeübergangsmessungen wurden Massenstromdichten von 75, 150 und 300  $\text{kg/m}^2\text{s}$  (Glattrohr) bzw. 75, 250 und 500  $\text{kg/m}^2\text{s}$  (Rippenrohr) eingestellt. Die umfangsgemittelte Wärmestromdichte lag zwischen 1,5 und 80  $\text{kW/m}^2$  (Glattrohr) bzw. 4 und 120  $\text{kW/m}^2$  (Rippenrohr). Bei den Strömungsformenun-

tersuchungen wurden Massenstromdichten bis  $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (Glattrohr) bzw.  $600 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (Rippenrohr) eingestellt.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Strömungsformen

Die beobachteten Strömungsformen wurden in drei Klassen unterteilt: 1. geschichtete Strömungen mit Schichten-, Schichten-Wellen- und Wellenströmung; 2. Schwallströmung und 3. Ringströmungen mit Wellen-Ring-, Schwall-Ring- und Ringströmung. Im Glattrohr passen die beobachteten Strömungsformen im Allgemeinen gut zu den Strömungsformenkarten von Steiner (2002) und von Thome und El Hajal (2003). Abweichungen gibt es vor allem beim Übergang von geschichteten Strömungen zu Schwall- und Ringströmungen, der bei Drücken von 26,4 bar und darüber erst bei z. T. deutlich höheren Massenstromdichten auftritt als vorhergesagt. Anders als in den Strömungsformenkarten verändert sich auch die Massenstromdichte mit zunehmendem Strömungsdampfgehalt kaum, bei der der Übergang zu nicht geschichteten Strömungen beobachtet wurde. In den Strömungsformenkarten sind Grenzkurven für die Grenze „Schwall  $\leftrightarrow$  kein Schwall“ angegeben, die durch die Beobachtungen bestätigt wurden. In Hinblick auf einen guten Wärmeübergang ist jedoch die Grenze „kein Ring  $\leftrightarrow$  Ring“ bedeutender, da eine gleichmäßige Benetzung der Rohrfläche einen besseren Wärmeübergang bewirkt. Für diese Grenze ist in der Literatur ein Kriterium von Lim und Park (2003) bekannt, das die Froude-Zahl der Flüssigkeit in Abhängigkeit vom Strömungsdampfgehalt darstellt. Dieses Kriterium liefert für  $\text{CO}_2$  nur bei 26,4 bar gute Ergebnisse. Bei anderen Drücken ergeben sich deutliche Abweichungen. Ersetzt man jedoch den Strömungsdampfgehalt durch den Martinelli-Parameter, verwendet die mittlere Froude-Zahl der Gasphase  $Fr_{Gm}$  aus der Strömungsformenkarte von Steiner (2002) und passt die Parameter an die Messergebnisse an, wird die Grenze „kein Ring  $\leftrightarrow$  Ring“ bei allen Drücken gut wiedergegeben.

Im Rippenrohr soll der Drallwinkel der Rippen bewirken, dass sich die Flüssigkeit besser über den Rohrumfang verteilt. Folglich wurde bei den Strömungsformenuntersuchungen im Rippenrohr ein deutlich erweiterter Bereich der Ringströmungen beobachtet. Dabei tritt nicht die reine Ringströmung stärker auf, sondern ihre Überlagerung mit Wellen- und Schwallströmung. Reine Wellen- und Schwallströmung tritt weiterhin auf, so dass nicht grundsätzlich von Ringströmung ausgegangen werden kann. Schichtenströmung wurde nicht beobachtet. Bei 39,7 bar wurde eine neue, als Ring-Wellen-Strömung bezeichnete Strömungsform beobachtet. Diese Strömungsform unterscheidet sich von der Wellen-Ring-Strömung dadurch, dass sie in ihrer Grundform eine Wellenströmung darstellt. Sie wird durch einen gleichmäßigen dünnen Flüssigkeitsring überlagert, der durch die Spiralarippen erzeugt wird.

Zwischen den beobachteten Strömungsformen im Rippenrohr und den für das Glattrohr geltenden Strömungsformenkarten von Steiner (2002) und Thome und El Hajal (2003) gibt es einige Abweichungen: Wie schon erwähnt nehmen die Ringströmungen einen größeren Bereich ein als im Glattrohr, so dass der Übergang von der Wellenströmung zur Ring- aber auch zur Schwallströmung bei kleineren Massenstromdichten erfolgt als in den Strömungsformenkarten angegeben. Ähnlich wie im Glattrohr verläuft diese Grenze auch im Rippenrohr für alle Drücke bei nahezu konstanter Massenstromdichte. Die Abweichung zwischen den Strömungsformenkarten und der Beobachtung ist an dieser Stelle bei der Strömungsformenkarte von Steiner (2002) geringer als bei der Strömungsformenkarte von Thome und El Hajal (2003). Eine weitere Abweichung wurde bei der Grenze „Schwall ↔ kein Schwall“ beobachtet: Für Drücke bis einschließlich 26,4 bar und einer Massenstromdichte von ca.  $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  verläuft die Grenze wie angegeben, d. h. bei einem bestimmten Strömungsdampfgehalt bzw. Martinelli-Parameter. Bei höheren Massenstromdichten verschiebt sich die Grenze allerdings mit steigender Massenstromdichte hin zu kleineren Strömungsdampfgehalten, d. h. höheren Martinelli-Parametern. Bei 39,7 bar verläuft diese Grenze insgesamt bei einem kleineren Strömungsdampfgehalt als vorhergesagt.

Die für das Glattrohr entwickelte Grenzkurve für die Grenze „kein Ring ↔ Ring“ wurde an die Ergebnisse im Rippenrohr angepasst, indem der Exponent des Martinelli-Parameters und der konstante Faktor verändert wurden. Auch hier wird der beobachtete Übergang bei allen Drücken gut durch die neue Grenzkurve wiedergegeben. Es ist anzumerken, dass die gefundene Grenzkurve für die verwendete Rippenrohrgeometrie gilt. Die Übertragbarkeit auf andere Geometrien ist zu prüfen.

### 3.2 Wärmeübergang

Der Wärmeübergangskoeffizient beim Strömungsverdampfen im horizontalen Glattrohr zeigt im Allgemeinen die von Steiner (2002) zusammengestellten Abhängigkeiten. Abweichungen gibt es beim Exponenten  $n(p_r)$  der Wärmestromdichte und beim stoffspezifischen Faktor  $C_F$ . Für letzteren wurde ein Wert für  $\text{CO}_2$  von  $C_F = 1,57$  bestimmt. Der Exponent  $n(p_r)$  liegt bei Drücken bis 39,7 bar dicht bei den Werten für R12 (Niederkrüger 1991) sowie R134a (Wettermann 1999) aber über den berechneten Werten nach Steiner (2002). Bei 57,3 bar liegen die Werte für  $\text{CO}_2$  dagegen deutlich unter der Berechnung nach Steiner (2002). Ein ähnliches Verhalten wurde auch von Niederkrüger (1991) für R846 beobachtet. Daher wurde für die Berechnung des Exponenten  $n(p_r)$  für  $\text{CO}_2$  eine eigene Gleichung aufgestellt, die diesen besser wiedergibt. Eine Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Strömungsform im Bereich des Strömungssiedens konnte nicht beobachtet werden. Es ist daher keine Korrektur erforderlich.

Die Messwerte lassen sich recht gut mit allgemeinen Korrelationen wiedergeben. Am besten eignen sich die Korrelationen von Steiner (2002) und von Liu und Winterton (1991), mit

denen die Messwerte mit einem mittleren relativen Fehler von 23 % bzw. 25 % wiedergegeben werden. Mit den zuvor beschriebenen Anpassungen für CO<sub>2</sub> reduziert sich der mittlere relative Fehler der Korrelation von Steiner (2002) auf 13,5 %. Andere, speziell für CO<sub>2</sub> entwickelte Korrelationen aus der Literatur weisen zum Teil sehr große Fehler auf, so dass sie zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten beim Strömungsverdampfen von CO<sub>2</sub> nicht zu empfehlen sind.

Beim Strömungsverdampfen im innen berippten Rohr konnten die Bereiche konvektives Verdampfen und Strömungssieden auch für CO<sub>2</sub> bestätigt werden. Außerdem wurde bei hohen Wärmestromdichten Siedekrise beobachtet, die sich bei genauerer Betrachtung nur auf einen Teil des Rohrumfanges beschränkt, nämlich auf den Rohrscheitel und die absteigenden Seite der Drallströmung. Bei der kleinsten Massenstromdichte wurde zwar bei Drücken von 19,1 bar und darüber in der Sichtstrecke Wellenströmung beobachtet, anhand der Wärmeübergangsmessungen wurde aber deutlich, dass Flüssigkeit in den Rillen bis zum Rohrscheitel transportiert wird. Mit steigender Wärmestromdichte trocknet dieser Flüssigkeitsfilm zunehmend aus. Aus diesem Grund verläuft hier die Siedekurve nicht streng exponentiell. Die lokalen Werte des Wärmeübergangskoeffizienten zeigen auch, dass die Wellenströmung nicht horizontal im Rohr liegt, sondern sich die Flüssigkeit mit der Drallrichtung der Rippen an der Rohrwand hochzieht.

Der Exponent  $n(p_r)$  der Wärmestromdichte ist kleiner als im Glattrohr und hängt im Unterschied zum Glattrohr im untersuchten Druckbereich nicht vom Druck ab. Außerdem ist er aufgrund von lokalen Austrocknungseffekten bei Wellenströmung kleiner als bei Schwall- und Ringströmung.

Insgesamt konnte ein stärkerer Einfluss der Strömung auf den Wärmeübergangskoeffizienten beobachtet werden. So konnte bis zu einem Druck von einschließlich 26,4 bar für den Bereich Strömungssieden ein Zusammenhang zwischen dem Verhalten des Wärmeübergangskoeffizienten mit zunehmendem Strömungsdampfgehalt und der Strömungsform festgestellt werden: Der Wärmeübergangskoeffizient nimmt bei Schwall- und Schwall-Ring-Strömung mit steigendem Strömungsdampfgehalt ab, erreicht ungefähr an der Grenze zur Ringströmung ein Minimum und nimmt innerhalb der Ringströmung wieder zu. Die Zunahme der Konvektion bei Ringströmung durch den steigenden Gasanteil (Strömungsdampfgehalt) bewirkt hier offensichtlich eine Zunahme des Wärmeübergangs. Bei Wellenströmung fällt der Wärmeübergangskoeffizient mit steigendem Strömungsdampfgehalt stetig ab. Dies ist auf eine Austrocknung und damit Verkleinerung der Wärmeaustauschenden Fläche bei hohen Wärmestromdichten zurückzuführen. Bei 39,7 bar generell und im Bereich des konvektiven Verdampfens wurde dagegen das im Glattrohr bekannte Verhalten beobachtet.

Der Einfluss der Strömung macht sich auch bei dem Einfluss der Massenstromdichte bemerkbar: Bei kleinen und mittleren Massenstromdichten ist die Abhängigkeit identisch mit der im Glattrohr ( $\alpha \sim \dot{m}^{0,25}$ ). Ab einer kritischen Massenstromdichte, die bei 26,4 bar zwi-

schen  $250 \text{ kg/m}^2\text{s}$  und  $330 \text{ kg/m}^2\text{s}$  liegt, fällt der Wärmeübergangskoeffizient aber ab und bleibt bei einer weiteren Zunahme der Massenstromdichte annähernd konstant. Es existiert also eine Grenze, ab der die für das Glattrohr bekannte Abhängigkeit nicht mehr gilt. Dies gilt sowohl für hohe als auch für niedrige Wärmestromdichten. Die Ursache und die diesem Abfall zugrunde liegenden Mechanismen sind noch unklar. Es könnte sich um einen laminar – turbulenten Umschlag in der Unterschicht, also in den Rillen handeln, der die Blasenbildung behindert.

Der Vergleich der Messwerte mit bekannten Korrelationen zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten im innen berippten Rohr hat gezeigt, dass die Korrelation von Cavallini et al. (1999) sehr gut geeignet ist, die Messwerte wiederzugeben. Vier weitere Korrelationen weisen dagegen erhebliche Abweichungen zu den Messwerten auf. Der Vergleich mit der in dieser Arbeit für  $\text{CO}_2$  angepassten Korrelation von Steiner (2002) zeigt, dass der Wärmeübergangskoeffizient im Rippenrohr ungefähr 65% größer ist als im Glattrohr. Setzt man allerdings den für das Rippenrohr ermittelten Exponenten  $n$  ein, überträgt die Methode von Gorenflo (2002) für das Behältersieden an Rippenrohren auf das Strömungsverdampfen und beachtet die diskutierte Grenze bei der Massenstromdichte, lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient mit der Korrelation von Steiner (2002) mit einem mittleren Fehler von 3,7 % berechnen. Die Messwerte werden damit ebenso gut wiedergegeben wie mit der Rippenrohrkorrelation von Cavallini et al. (1999).

### 3.3 Druckverlust

Der Druckverlust beim Strömungsverdampfen setzt sich aus einem Reibungs- und einem Beschleunigungsanteil zusammen. Im Glattrohr zeigen sich für den Reibungsdruckverlust die bekannten Abhängigkeiten von Strömungsdampfgehalt, Massenstromdichte und Druck. Beim Beschleunigungsdruckverlust zeigen sich allerdings Abweichungen: So verläuft er nicht linear, sondern zeigt bei kleinen Wärmestromdichten einen starken Anstieg, der mit zunehmender Wärmestromdichte geringer wird und in den bekannten linearen Verlauf übergeht. Ferner wird er sowohl mit dem homogenen als auch mit dem heterogenen Modell zu klein berechnet. Für die Berechnung des Gesamtdruckverlustes im Glattrohr eignet sich am besten die Korrelation von Storek und Brauer (1980) und die Korrelation von Müller-Steinhagen und Heck (1986), die auch den Reibungsdruckverlust am besten wiedergeben.

Im Rippenrohr verhält sich der Reibungsdruckverlust bezüglich Strömungsdampfgehalt, Massenstromdichte und Druck ähnlich wie im Glattrohr und lässt sich gut mit den Glattrohrkorrelationen von Storek und Brauer (1980) und von Müller-Steinhagen und Heck (1986) berechnen, wenn man sie mit einem Faktor an die Messwerte anpasst. Dieser liegt für die Korrelation von Müller-Steinhagen und Heck (1986) bei 1,63. Der Faktor für die Korrelation von Storek und Brauer (1980) ist linear abhängig vom Strömungsdampfgehalt

und weist einen Mittelwert von 1,8 auf. Da diese Korrelation im Glattrohr bezüglich des Reibungsdruckverlust einen mittleren Fehler von null aufweist, liegt somit der Reibungsdruckverlust im Rippenrohr im Mittel um den Faktor 1,8 über dem im Glattrohr. Der Beschleunigungsdruckverlust verläuft anders als im Glattrohr linear und wird sehr gut mit dem homogenen Modell wiedergegeben. Das heterogene Modell berechnet bei kleinen und mittleren Strömungsdampfgehalten den Beschleunigungsanteil zu klein. Der Gesamtdruckverlust im Rippenrohr lässt sich ebenfalls am besten mit den angepassten Glattrohrkorrelationen von Storek und Brauer (1980) und von Müller-Steinhagen und Heck (1986) berechnen. Der Gesamtdruckverlust im Rippenrohr liegt im Mittel um den Faktor 1,6 über dem in Glattrohr.

### **3.4 Einsatzbereich Rippenrohr**

Aufgrund des unterschiedlichen Durchmessers der Glattrohr- und Rippenrohrmessstrecke war ein direkter Vergleich der Messwerte nicht möglich. Für eine eingehende Analyse des Wärmeübergangskoeffizienten wurden daher die Messwerte im Rippenrohr mit der für CO<sub>2</sub> angepassten Korrelation von Steiner (2002) verglichen und ein „Enhancement Faktor“ gebildet. Dieser stellt den Quotienten aus dem gemessenen Wärmeübergangskoeffizient im Rippenrohr und dem für das Glattrohr berechneten dar. Der Reibungsdruckverlust liegt im Rippenrohr konstant um den Faktor 1,8 höher als im Glattrohr. Dieser Wert wurde für eine konservative Abschätzung für den Einsatzbereich des Rippenrohres verwendet und sollte vom „Enhancement Faktor“ überschritten werden, damit bei gleicher Rohranzahl der höhere Druckverlust durch weniger benötigte Fläche, also weniger Rohrlänge kompensiert wird. Hohe Enhancement Faktoren treten gemäß der vorliegenden Ergebnisse bei folgenden Bedingungen auf: Massenstromdichten bis 250 kg/m<sup>2</sup>s, Wärmestromdichten bis ca. 15 kW/m<sup>2</sup> und Drücke bis 26,4 bar.