

# Wärmeübergang, Druckverlust und Strömungsformen beim Strömungssieden von Kältemitteln im horizontalen innenstrukturierten Rohr

Der Fakultät für Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur  
Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte  
Abhandlung

Vorgelegt von  
Philipp Rollmann  
aus Fürstentfeldbruck

**Hauptberichter:** Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland H. Müller-Steinhagen  
**1. Mitberichter:** apl. Prof. Dr.-Ing. K. Spindler  
**2. Mitberichter:** Prof. Dr.-Ing. E. Laurien  
**Vorsitzender:** Prof. Tekn. Dr. D. Vogt

**Tag der mündlichen Prüfung:** 21. Dezember 2015

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

2016

## Kurzfassung

Es wurden der Wärmeübergang, der Druckverlust und die Strömungsform beim Strömungssieden im horizontalen, innenstrukturierten Rohr untersucht.

Die Messungen des Wärmeübergangskoeffizienten und des Druckverlusts wurden mit den Kältemitteln R407C und R410A bei Sättigungstemperaturen zwischen  $-30$  und  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Wärmestromdichten zwischen  $1000$  und  $20000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , Massenstromdichten zwischen  $25$  und  $300\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$  und Dampfgehalten zwischen  $0,1$  und  $1,0$  durchgeführt.

Die gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten werden mit berechneten Werten der Korrelationen von Shah, Liu und Winterton, Yun et al., Cavallini et al., Chamra und Mago, Kattan et al. sowie Zhang et al. verglichen. Die mittlere Abweichung beträgt zwischen  $33,0\%$  und  $171,9\%$ . Die Werte streuen stark. Es wird eine neue Nusselt-Korrelation hergeleitet. Die mittlere Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten beträgt  $9,8\%$ . Im Bereich  $\pm 30\%$  liegen  $94,2\%$  der Messwerte.

Die gemessenen Druckverluste werden mit berechneten Werten der Korrelationen von Pierre, Choi et al., Kuo und Wang, dem VDI-Wärmeatlas sowie Müller-Steinhagen und Heck verglichen. Die mittlere Abweichung beträgt zwischen  $20,8\%$  und  $96,7\%$ . Die Korrelationen berechnen nur den Reibungsdruckverlust oder sind in ihrem Gültigkeitsbereich eingeschränkt. Es wird eine neue Korrelation zur Berechnung des Gesamtdruckverlusts hergeleitet. Die mittlere Abweichung beträgt  $18,1\%$ . Im Bereich  $\pm 30\%$  liegen  $83,1\%$  der berechneten Werte.

Die Messungen der Strömungsform wurden mit R134a bei der Sättigungstemperatur  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , der Wärmestromdichte  $10000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , Massenstromdichten zwischen  $15$  und  $300\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$  und Dampfgehalten zwischen  $0,1$  und  $0,9$  durchgeführt. Die Strömungsform wurde mit einem Laser-Wegmesssensor gemessen.

Aufgrund des unterschiedlichen Benetzungsverhaltens sind Strömungsformkarten für Glattrohre nicht zur Bestimmung der Strömungsform in innenstrukturierten Rohren geeignet. Durch die Helixstruktur der Rippen kommt es im innenstrukturierten Rohr zu einer neuen Strömungsform der *Helixströmung*. Dabei strömt die Flüssigphase helixförmig durch das Messrohr. Wegen der großen benetzten Oberfläche steigt dadurch der Wärmeübergangskoeffizient an.

Es werden die Grenzkurven einer neuen Strömungsformkarte für horizontale innenstrukturierte Rohre hergeleitet.

## Abstract

The heat transfer, pressure drop and flow patterns during flow boiling in a horizontal microfin tube have been investigated.

The measurements of the heat transfer coefficient and the pressure drop have been conducted with the refrigerants R407C and R410A at saturation temperatures between  $-30$  and  $+10$  °C, heat fluxes between 1000 and 20000  $\frac{W}{m^2}$ , mass fluxes between 25 and 300  $\frac{kg}{m^2s}$  and vapor qualities between 0.1 and 1.0.

The measured heat transfer coefficients are compared to calculated values of the correlations of Shah, Liu and Winterton, Yun et al., Cavallini et al., Chamra and Mago, Kattan et al. and Zhang et al. The mean deviation is between 33.0% and 171.9%. The values scatter widely. A new correlation for the Nusselt number was derived. The mean deviation of the calculated from the measured values is 9.8%. Within the range of  $\pm 30$ % there are 94.2% of the measured values.

The measured pressure drops are being compared to calculated values of the correlations of Pierre, Choi et al., Kuo and Wang, the VDI Heat Atlas as well as Müller-Steinhagen and Heck. The mean deviation is between 20.8% and 96.7%. The correlations only account for the frictional pressure drop or they are limited in their scope. A new correlation for the total pressure drop was derived. The mean deviation of the calculated from the measured values is 18.1%. Within the range of  $\pm 30$ % there are 83.1% of the measured values.

The measurements of the flow patterns have been performed with R134a at a saturation temperature of  $+10$  °C, a heat flux of 10000  $\frac{W}{m^2}$ , mass fluxes between 15 and 300  $\frac{kg}{m^2s}$  and vapor qualities between 0.1 and 0.9. The flow patterns have been measured with a laser displacement meter.

Because of the different wetting behavior flow pattern maps for smooth tubes are not suitable for determining the flow patterns in microfin tubes. Due to the helical structure of the fins there is a new flow pattern, the *helix flow*, where the liquid phase flows helically through the microfin tube. Because of the large wetted surface this leads to an increase of the heat transfer coefficient.

The transition curves for a new flow pattern map for microfin tubes have been derived.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Versuchsanlage und Datenerfassung</b>	<b>3</b>
2.1 Versuchsanlage . . . . .	3
2.1.1 Umwälzpumpe . . . . .	5
2.1.2 Thermostate . . . . .	5
2.1.3 Vorverdampfer . . . . .	5
2.1.4 Messstrecke . . . . .	6
2.1.5 Kältemittel . . . . .	8
2.2 Messtechnik und Datenerfassung . . . . .	9
2.2.1 Temperaturmessung . . . . .	9
2.2.2 Absolut- und Differenzdruckmessung . . . . .	9
2.2.3 Massenstrommessung . . . . .	10
2.2.4 Messung des zugeführten Wärmestroms . . . . .	10
2.2.5 Messung der Strömungsform . . . . .	10
2.3 Berechnungsgrundlagen . . . . .	14
2.4 Versuchsparameter . . . . .	17
2.5 Versuchsdurchführung . . . . .	17
<b>3 Wärmeübergang und Druckverlust</b>	<b>19</b>
3.1 Einfluss der Sättigungstemperatur . . . . .	19
3.2 Einfluss der Massenstromdichte . . . . .	21
3.3 Einfluss des Dampfgehalts . . . . .	24
3.4 Einfluss des Kältemittels . . . . .	27
3.5 Vergleich der Messwerte mit Korrelationen aus der Literatur . . . . .	29

3.5.1	Korrelationen für den Wärmeübergang	29
3.5.1.1	Korrelation von Shah	30
3.5.1.2	Korrelation von Liu und Winterton	33
3.5.1.3	Korrelation von Yun, Kim, Seo und Kim	37
3.5.1.4	Korrelation von Cavallini et al.	38
3.5.1.5	Korrelation von Chamra und Mago	42
3.5.1.6	Korrelation von Kattan, Thome und Favrat	45
3.5.1.7	Korrelation von Zhang, Ji und Yuan	47
3.5.2	Korrelationen für den Druckverlust	49
3.5.2.1	Korrelation von Pierre	49
3.5.2.2	Korrelation von Choi et al.	52
3.5.2.3	Korrelation von Kuo und Wang	54
3.5.2.4	Korrelation aus dem VDI-Wärmeatlas	55
3.5.2.5	Korrelation von Müller-Steinhagen und Heck	59
3.6	Neue Korrelationen für Wärmeübergang und Druckverlust	62
3.6.1	Wärmeübergang	62
3.6.1.1	Diskussion	71
3.6.1.2	Vergleich mit Werten aus der Literatur	72
3.6.2	Druckverlust	75
3.6.2.1	Diskussion	77
3.6.2.2	Vergleich mit Werten aus der Literatur	78
<b>4</b>	<b>Strömungsformen</b>	<b>81</b>
4.1	Neue Strömungsformkarte für innenstrukturierte Rohre	82
4.2	Grenzkurven der Strömungsformkarte für innenstrukturierte Rohre	86
4.2.1	Übergang von Schichtenströmung zu Wellenströmung	86
4.2.2	Übergang von Schwallströmung zu Wellenströmung	87
4.2.3	Übergang von Wellenströmung zu Helixströmung	89
4.2.4	Übergang von Schwall-Helix-Strömung zu Helixströmung	90
4.2.5	Übergang von Helixströmung zu Ringströmung	91
4.3	Erstellung der neuen Strömungsformkarte für innenstrukturierte Rohre	91
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>93</b>
5.1	Wärmeübergang	93

## *Inhaltsverzeichnis*

---

5.2	Druckverlust	94
5.3	Strömungsformen	95
5.4	Anwendbarkeit der neuen Korrelationen und der neuen Strömungsformkarte bei anderen Rohrgeometrien und Kältemitteln	95
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
A	<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>102</b>
B	<b>Explizite Darstellung der impliziten Colebrook-White-Gleichung</b>	<b>108</b>
C	<b>Vergleich der Messwerte mit Korrelationen aus der Literatur für R410A</b>	<b>115</b>
C.1	Wärmeübergangskoeffizient	116
C.2	Druckverlust	126