

# **Der Wärmeübergang beim Sieden an Rippenrohren und Rippenrohrbündeln**

Von der Fakultät Energietechnik der  
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
**Qiurong Chen**  
aus Zhejiang/VR China

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne  
Mitberichter: Prof. Dr. techn. R. Doležal  
Tag der mündlichen Prüfung: 10.6.1991

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
der Universität Stuttgart

## KURZFASSUNG

Chen, Qiurong:

### **Der Wärmeübergang beim Sieden an Rippenrohren und Rippenrohrbündeln**

Aufbauend auf der Blasendynamik und der Hydrodynamik wird eine Theorie erstellt, um den Wärmeübergang beim Sieden an Einzelrohren, an einer senkrechten Rohrreihe und an Rohrbündeln zu berechnen. Die Theorie, mit der der Einfluß verschiedener Parameter untersucht werden kann, gilt sowohl für Rippenrohre als auch für Glattrohre. Ein Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Wärmeübergangskoeffizienten für Einzelrohre, Zweirohranordnungen sowie Glattrohrbündel und Rippenrohrbündel zeigt eine gute Übereinstimmung.

Der Wärmeübergang beim Sieden an einzelnen Rippenrohren und Rippenrohrbündeln wird experimentell untersucht. Dabei werden die Rippenrohre 26 fpi (fins per inch) eingesetzt. Die Messungen werden mit Kältemittel R11 beim Druck  $p_g = 1$  bar durchgeführt. Das Kältemittel verdampft an der Außenseite der elektrisch beheizten Versuchsrohre. Bei Untersuchungen an Rippenrohrbündeln werden das Teilungsverhältnis (zwischen 1,6 und 1,05), die Rohranordnung (fluchtend und versetzt) und die Anzahl beheizter Rohrreihen (von 1 bis 6) variiert.

Für ein einzelnes Rippenrohr ist der Wärmeübergang im Bereich der freien Konvektion schlechter als für ein Glattrohr. Im Bereich des Blasensiedens ist der Wärmeübergangskoeffizient für Rippenrohre höher als für Glattrohre. Die maximale Verbesserung des Wärmeübergangs an Rippenrohren im Vergleich zu Glattrohren liegt im Übergangsbereich zwischen dem volla ausgebildeten Blasensieden und der freien Konvektion.

Für Rippenrohrbündel wird der Wärmeübergang aufgrund der von den aufsteigenden Dampfblasen induzierten Zweiphasenströmung im Übergangsbereich zwischen dem volla ausgebildeten Blasensieden und der freien Konvektion gegenüber einem einzelnen Rippenrohr verbessert. In diesem Bereich nimmt der lokale Wärmeübergang im Bündel von der untersten zur obersten Rohrreihe zu. Der mittlere Wärmeübergang des Bündels wird mit abnehmendem Teilungsverhältnis und zunehmender Anzahl beheizter Rohrreihen größer. Zwischen fluchtender und versetzter Rohranordnung besteht bei größeren Teilungsverhältnissen nur ein kleiner Unterschied hinsichtlich des Wärmeübergangs. Bei kleineren Teilungsverhältnissen weist die versetzte Rohranordnung höhere Wärmeübergangskoeffizienten auf als die fluchtende.

Die Anströmgeschwindigkeiten der Flüssigkeit unterhalb des Bündels und die Dampfgehaltsverteilungen in Bündeln werden bestimmt. Dynamische Strömungsinstabilitäten werden in Bündeln bei kleinen Teilungsverhältnissen und hohen Wärmestromdichten beobachtet.

Ein Vergleich zwischen Rippen- und Glattrohrbündeln ergibt, daß im Übergangsbereich das Bündel mit weiter berippten Rohren (19 fpi) gegenüber dem mit enger berippten Rohren (26 fpi) größere Wärmeübergangskoeffizienten liefert. Die

## **ABSTRACT**

Chen, Qirong:

### **Boiling Heat Transfer on Finned Tubes and Finned Tube Bundles**

Based on bubble dynamics and hydrodynamics, a theory is developed to calculate the boiling heat transfer coefficients on single tubes, on a vertical row of tubes and on tube bundles. The new theory considers the influence of various parameters and is valid for both finned tubes and plain tubes. Comparison between the measured and the calculated heat transfer coefficients for single tubes, twin-tube arrangements as well as plain and finned tube bundles shows good agreement.

The boiling heat transfer on single finned tubes and finned tube bundles is investigated experimentally. Finned tubes with 26 fpi (fins per inch) are used. The measurements are performed with refrigerant R11 at pressure  $p_s = 1$  bar. The refrigerant evaporates at the outside of the electrically heated tubes. For finned tube bundles the influence of the tube pitch ratio (between 1.6 and 1.05), of the tube arrangement (in-line or staggered) and of the number of heated tube rows (from 1 to 6) is investigated.

For a single finned tube the heat transfer coefficient in the free convection regime is smaller than that for a plain tube. In the nucleate boiling regime the heat transfer coefficients for finned tubes are greater than those for plain tubes. The maximum enhancement of heat transfer from finned tubes in comparison with plain tubes is found in the transition region between fully developed nucleate boiling and free convection.

For finned tube bundles the heat transfer is enhanced as compared with a single finned tube in the transition region between fully developed nucleate boiling and free convection due to the two-phase flow induced by the rising vapour bubbles. In this region the local heat transfer in the bundle increases from the lowest to the uppermost tube row. The mean heat transfer coefficient of the bundle increases with decreasing tube pitch ratio and increasing number of heated tube rows. Between the in-line and the staggered tube arrangement there is only a small difference in heat transfer at large tube pitch ratios. At small tube pitch ratios the staggered tube arrangement has greater heat transfer coefficients than the in-line tube arrangement.

The velocities of the liquid under the bundle and the void fraction distributions within the bundle are measured. Dynamic flow instabilities are observed in the bundles with small tube pitch ratios and at the high heat fluxes.

A comparison between finned and plain tube bundles shows that the bundle with wider finned tubes (19 fpi) has greater heat transfer coefficients in the transition region than the bundle with narrower finned tubes (26 fpi). The results for twin-tube arrangements are only restrictedly transferable to larger tube

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
KURZFASSUNG	5
INHALTSVERZEICHNIS	6
FORMELZEICHEN	8
1 EINLEITUNG	11
2 LITERATURÜBERSICHT	13
2.1 Experimentelle Untersuchungen	13
2.1.1 Wärmeübergang an einzelnen Rippenrohren	13
2.1.2 Wärmeübergang an Rippenrohrbündeln	15
2.2 Theoretische Untersuchungen	18
2.2.1 Berechnungsverfahren durch dimensionslose Kennzahlen	18
2.2.2 Berechnungsverfahren durch Bündelfaktoren	20
2.2.3 Berechnungsverfahren aufgrund von Einzelmechanismen	22
3 PROBLEMSTELLUNG	26
4 THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN	27
4.1 Einzelrohre	28
4.2 Eine senkrechte Rohrreihe	36
4.2.1 Zweirohranordnungen	36
4.2.2 Eine senkrechte Reihe mit n übereinanderliegenden Rohren	45
4.3 Rohrbündel	48
4.3.1 Wärmeübergang	48
4.3.2 Zirkulationsmodell	53
4.3.2.1 Strömungsmodell	54
4.3.2.2 Druckbilanz	55
4.3.2.3 Energiebilanz	59
4.3.3 Überprüfung der Theorie	59
4.4 Folgerung	67
5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	71
5.1 Versuchsanlage	71
5.2 Versuchsrohre und Anordnungen	71
5.3 Versuchsfluid	75
5.4 Meßeinrichtungen	76
5.4.1 Temperaturmessung	76
5.4.2 Leistungsmessung	76
5.4.3 Druckmessung	77

---

5.5	Versuchsauswertung	78
5.5.1	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$	78
5.5.2	Wärmestromdichte $q$	78
5.5.3	Wandtemperatur $\theta_w$	79
5.5.4	Sättigungstemperatur $\theta_s$	79
5.6	Fehlerabschätzung	79
5.7	Versuchsdurchführung	81
6	VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	83
6.1	Wärmeübergang an einzelnen Rippenrohren	83
6.1.1	Wärmeübergang	83
6.1.2	Oberflächenfaktoren	89
6.1.3	Hysterese	92
6.2	Wärmeübergang an Rippenrohrbündeln	93
6.2.1	Wärmeübergang an waagrechten Rohrreihen	93
6.2.1.1	Wärmeübergangskoeffizienten	93
6.2.1.2	Bündelfaktoren	99
6.2.2	Mittlerer Wärmeübergang	103
6.2.2.1	Einfluß des Teilungsverhältnisses	104
6.2.2.2	Einfluß der Rohranordnung	106
6.2.2.3	Einfluß der Anzahl beheizter Rohrreihen	108
6.2.2.4	Korrelation mittlerer Bündelfaktoren	114
6.2.2.5	Vergleich mit der Literatur	114
6.3	Zweiphasenströmung in Bündeln	118
6.3.1	Anströmgeschwindigkeiten	118
6.3.2	Dampfgehaltsverteilungen	121
6.3.3	Dynamische Instabilitäten	128
7	VERGLEICH DER ERGEBNISSE	130
7.1	Rippen- und Glattrohrbündel	130
7.2	Zweirohranordnungen und Rohrbündel	134
7.3	Theorie und Experiment	136
8	ZUSAMMENFASSUNG	144
9	LITERATURVERZEICHNIS	148