

**WÄRMEÜBERGANG BEIM SIEDEN VON KÄLTEMITTEL AN EINZELROHREN,
ZWEIROHRANORDNUNGEN UND ROHRBÜNDELN**

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

vorgelegt von
R o l f W i n d i s c h
aus Ulm

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Stephan
Tag der Einreichung: 30.11.1988
Tag der mündlichen Prüfung: 25.1.1989

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

1 9 8 9

KURZFASSUNG

Der Wärmeübergang beim Sieden von Kältemittel R 11 wird beim Druck $p = 1$ bar an Einzelrohren, an Zweirohranordnungen und an Rohrbündeln in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte untersucht. Die Rohre werden elektrisch beheizt, das Kältemittel verdampft an der Rohraußenseite. Die Versuche mit Einzelrohren und Zweirohranordnungen werden sowohl mit Glattrohren als auch mit Rippenrohren durchgeführt, die Rohrbündelversuche nur mit Glattrohren. Bei den Untersuchungen an Mehrrohranordnungen wird neben der Wärmestromdichte auch der Einfluß des Teilungsverhältnisses s/d (Zweirohr, Rohrbündel), der Rohranordnung (Rohrbündel) und der Anzahl der beheizten Rohrreihen (Rohrbündel) auf den Wärmeübergang bestimmt.

Bei den Einzelrohren ergeben sich für die Rippenrohre bei Wärmestromdichten $\dot{q} > 1000 \text{ W/m}^2$ größere, bei $\dot{q} < 1000 \text{ W/m}^2$ kleinere Wärmeübergangskoeffizienten als für die Glattrohre.

Aus den Versuchen an den Zweirohranordnungen erhält man für alle untersuchten Rohrarten im Übergangsgebiet zwischen Blasensieden und Konvektion eine Erhöhung des Wärmeübergangs am oberen Rohr im Vergleich zum entsprechenden Einzelrohr. Mit kleinerem Teilungsverhältnis verringert sich diese Erhöhung.

Für die Glattrohrbündel wird ebenfalls eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten gegenüber dem Einzelrohr an allen Rohren im Bündel im Übergangsgebiet vom Blasensieden zur Konvektion festgestellt. In diesem Bereich nimmt die Erhöhung des Wärmeübergangs mit abnehmendem Teilungsverhältnis und zunehmender Anzahl beheizter Rohrreihen im Bündel zu. Die Rohranordnung hat keinen eindeutigen Einfluß auf den Wärmeübergang. Für die mittleren Bündelfaktoren wird eine Korrelation angegeben, die den Einfluß der untersuchten Parameter gut wiedergeben kann. Die Meßergebnisse für die Glattrohre (Einzelrohr, Zweirohr, Rohrbündel) werden mit Werten aus Modellrechnungen zum Wärmeübergang verglichen.

ABSTRACT

Boiling heat transfer of refrigerant on single tubes, twin-tube arrangements and tube bundles

Pool boiling heat transfer of R 11 is investigated on single tubes, on twin-tube arrangements and on tube bundles. The refrigerant evaporates at a saturation state of 1 bar on the outside of the electrically heated tubes. The experiments on single tubes and on twin-tube arrangements are performed with plain and with finned tubes, for the tube bundle experiments only plain tubes are used. Besides the influence of heat flux, the effect of tube pitch s/d , tube arrangement and number of heated tube rows on the heat transfer is investigated for multi-tube arrangements.

The heat transfer coefficient on single finned tubes is higher at $\dot{q} > 1000 \text{ W/m}^2$ and is lower at $\dot{q} < 1000 \text{ W/m}^2$ than that on plain tubes.

The results for twin-tube arrangements showed a heat transfer enhancement on the upper tube compared with that on the single tube in the transition region between fully developed boiling and free convection. The enhancement decreases with decreasing tube pitch.

For bundles of plain tubes a heat transfer augmentation is also observed in the transition region. In this region the heat transfer enhancement increases

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
KURZFASSUNG	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
FORMELZEICHEN	6
1 EINLEITUNG	9
2 LITERATURÜBERBLICK	11
2.1 Experimentelle Untersuchungen	11
2.2 Berechnungsverfahren	19
3 AUFGABENSTELLUNG	22
4 VERSUCHSEINRICHTUNGEN	23
4.1 Versuchsanlage	23
4.1.1 Versuchskreislauf	23
4.1.2 Versuchsverdampfer	25
4.1.3 Versuchsrohre	25
4.2 Versuchsfluid	28
4.3 Meßeinrichtungen	29
4.3.1 Temperaturmessung	29
4.3.2 Leistungsmessung	30
4.3.3 Druckmessung	31
4.3.4 Geschwindigkeitsmessungen	31
4.4 Datenerfassung	32
4.5 Versuchsprogramm	34
4.6 Anordnung der Rohre im Verdampfer	35
5 DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHE	37
5.1 Versuchsdurchführung	37
5.1.1 Versuchsvorbereitung	37
5.1.2 Versuchsablauf	38
5.2 Versuchsauswertung	39
5.2.1 Wärmestrom Q	39
5.2.2 Wandtemperatur ϑ_{wa}	40
5.2.3 Sättigungstemperatur ϑ_s	41
5.3 Fehlerbetrachtung	41

	Seite
6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	43
6.1 Einzelrohre	43
6.1.1 Glattrohre	43
6.1.3 Rippenrohre	48
6.1.4 Oberflächenfaktoren	53
6.2 Zweirohranordnungen ohne Kanal	56
6.2.1 Glattrohre	56
6.2.2 Rippenrohre	63
6.2.2.1 Rippenrohre 19 fpi	63
6.2.2.2 Rippenrohre 26 fpi	67
6.2.3 Vergleich der Ergebnisse für Glatt- und Rippenrohre	70
6.3 Zweirohranordnungen im Kanal	71
6.3.1 Glattrohre	71
6.3.2 Rippenrohre	75
6.3.2.1 Rippenrohre 19 fpi	75
6.3.2.2 Rippenrohre 26 fpi	77
6.3.3 Vergleich der Ergebnisse für Glatt- und Rippenrohre	77
6.4 Glattrohrbündel	79
6.4.1 Überprüfung der Meßrohre	79
6.4.2 Wärmeübergang	81
6.4.2.1 Wärmeübergang der Rohre im Bündel	81
6.4.2.2 Mittlerer Wärmeübergang der Bündel	87
6.4.3 Bündelfaktoren	89
6.4.3.1 Bündelfaktoren der Rohre	89
6.4.3.2 Mittlere Bündelfaktoren	94
6.4.3.3 Korrelation der Bündelfaktoren	99
6.4.3.4 Vorschlag zur Erweiterung der Berechnungsmethode nach VDI-Wärmeatlas	103
6.4.4 Anströmgeschwindigkeiten	106
6.4.5 Dynamische Strömungsinstabilitäten	109
7 MODELLE ZUR BERECHNUNG DES WÄRMEÜBERGANGS	112
7.1 Einzelrohre	112
7.2 Zweirohranordnungen	117
7.3 Glattrohrbündel	123
7.3.1 Erweiterung des Zweirohrmodells auf n übereinander angeordnete Rohre	123
7.3.2 Zirkulationsmodell	123
8 ZUSAMMENFASSUNG	141
9 LITERATURVERZEICHNIS	144
10 ANHANG	154