

Inv.-Nr. 17 11 00

**Wärmeübergang bei der Kondensation von strömenden Dämpfen
reiner Stoffe und binärer Gemische**

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

Vorgelegt von
Jochen Kellenbenz
aus Göppingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Stephan
Tag der mündlichen Prüfung: 13.04.1994

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart
1994

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Experimentelle Untersuchungen	3
2.1 Beschreibung der Versuchsanlage	3
2.1.1 Gemischkreislauf	3
2.1.2 Meßstrecke	5
2.2 Meßtechnik	6
2.2.1 Temperatur	6
2.2.2 Druck	7
2.2.3 Differenzdruck	7
2.2.4 Konzentration	7
2.2.5 Massenstrom	7
2.3 Versuchsfluide und Stoffwerte	8
2.4 Versuchsdurchführung	10
2.5 Versuchsparameter	12
3 Auswertung	13
3.1 Druckverlustbeiwert	13
3.2 Definition verschiedener Wärmeübergangskoeffizienten	20
3.3 Phasengrenztemperatur	23
3.4 Weitere Zwischengrößen	26
3.5 Fehlerbetrachtung	29

4	Ergebnisse und Diskussion	35
4.1	Zweiphasen-Ringströmung	35
4.1.1	Struktur der Filmoberfläche	36
4.1.2	Druckverlustbeiwert	42
4.2	Wärmeübergang im Kondensatfilm	51
4.2.1	Theorie des Wärmeübergangs in laminar-welligen Kondensatfilmen	51
4.2.2	Messungen mit Reinstoffen - Empirische Korrelation	59
4.2.2.1	Bestimmung der Korrekturfaktoren f_{well} und f_r	63
4.2.3	Überprüfung der Korrelation	68
4.2.3.1	Vergleich mit eigenen Messungen	68
4.2.3.2	Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren	74
4.2.4	Vergleich mit Berechnungsvorschlägen aus der Literatur	80
4.2.5	Gemische vollständig mischbarer Flüssigkeiten	82
4.3	Wärmeübergang im Dampfraum	84
5	Zusammenfassung	90
	Anhang A	94
	Anhang B	96
	Anhang C	100
	Anhang D	102
	Literaturverzeichnis	105

Abstract

Jochen Kellenbenz:

'Condensation Heat Transfer of Pure Vapours and Binary Vapour Mixtures in Forced Flow'

The main goal of this work is the experimental investigation of film condensation for flowing vapours and binary vapour mixtures. Single-phase resistances for the condensate film and the vapour flow are determined using the temperature measured at the vapour/liquid interface. Apart from the Nusselt numbers describing these two heat transfer resistances the total pressure loss is measured in order to determine the interfacial drag.

The vertical test section consists of two concentric brass tubes (inner diameter $d_i = 31$ mm) with co-current downward flow of vapour, condensate and cooling water. The experimental set-up allows an independent variation of active condenser length, vapour mass flux (inlet), temperature difference between vapour and cooling water (inlet) and vapour composition.

As test fluids the refrigerants R11, R113 and R123 are investigated as pure vapours and binary mixtures with compositions spanning the whole concentration range. The experiments are restricted to laminar and laminar-wavy film flow with film Reynolds numbers of $20 \leq Re_f \leq 450$. The highly turbulent vapour flow with Reynolds numbers of $60000 < Re_{d,o} < 170000$ at the inlet represents an extension of former investigations.

For these flow conditions the heat transfer is affected by the hydrodynamics of the two-phase annular flow. The interaction of vapour and condensate leads to a reduction of both single-phase resistances. Based on the results for the structure of the film surface presented here a new theory of heat transfer in laminar-wavy falling liquid films is established and tested with the experimental data. In addition, the experimental results are represented by means of a correlation that allows the calculation of the film-side heat transfer coefficients using identical dimensionless groups both for pure fluids and fluid mixtures.

Using appropriate correction terms the experimental results of vapour-side heat transfer can be represented by well-known correlations for convective heat transfer in single-phase flow in smooth tubes. These semi-empirical corrections take into account the roughness of the film surface and the coupled processes of momentum, heat and mass transfer.

1 Einleitung

Die Wärmeübertragung durch Kondensation zählt zu den wichtigen Wärmetransportmechanismen in der Energie-, der Kälte- und der Klimatechnik. Kondensatoren sind wesentliche Bauteile in Kraftwerken, Kühlschränken, Wärmepumpen und Klimaanlage. Neben der Aufgabe, möglichst effektiv Wärme zu übertragen, werden Kondensatoren auch zur Trennung oder Umwandlung von Stoffen in der chemischen Industrie verwendet. Dort sind meist Gemische mehrerer Komponenten niederzuschlagen. In Kälte- und Klimaanlage wurden bisher zwar überwiegend Reinstoffe bzw. azeotrope Gemische als Arbeitsmittel eingesetzt, in letzter Zeit wird jedoch zunehmend auch dort die Verwendung nicht azeotroper Gemische vorgeschlagen. Dieser Trend wurde erst in jüngster Vergangenheit durch die FCKW-Ozonproblematik und den damit verbundenen Zwang zur raschen Bereitstellung geeigneter Ersatzstoffe verstärkt.

Bei der Kondensation strömender Dämpfe können infolge der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von Dampf und Kondensat beträchtliche Schubspannungen an der Phasengrenze entstehen. Dies führt zur Bildung bzw. Verstärkung von Oberflächenwellen auf dem Kondensatfilm, aus denen dann bei sehr großen Schubspannungen Tröpfchen herausgerissen werden (Entrainment). Insbesondere bei laminarer Filmströmung können die Oberflächenwellen zu einer deutlichen Verbesserung des Wärmetransports im Kondensat führen. Zusätzlich bewirkt die Rauigkeit der Filmoberfläche eine Intensivierung des konvektiven Wärmeübergangs im angrenzenden Dampfraum. Zur Beschreibung des Wärmetransports bei der Kondensation strömender Dämpfe ist folglich die detaillierte Erfassung der vorliegenden Zweiphasenströmung erforderlich. Trotz der großen praktischen Bedeutung der genannten Effekte kann deren Einfluß bis heute nur unbefriedigend beschrieben werden. Insbesondere besteht ein Mangel an Meßdaten bei laminarer Kondensatströmung und nicht zu vernachlässigender Schubspannung.

Während bei der Kondensation reiner gesättigter Dämpfe der gesamte Wärmewiderstand im Film liegt, bildet sich bei der Kondensation von Gemischen ein zusätzlicher Transportwiderstand im Dampfraum aus. Kennt man die Temperatur an der Phasengrenze, so ist die Aufteilung des gesamten Wärmewiderstands in einen dampf- und filmseitigen Anteil möglich. Bei der Ermittlung lokaler Wärmeübergangskoeffizienten, sowohl im Kondensatfilm als auch im Dampfraum, spielt folglich die Bestimmung dieser Temperatur eine zentrale Rolle. In der vorliegenden Arbeit wird die lokale Temperatur der Phasengrenze aus der mittleren Zusammensetzung des Kondensats bestimmt. Zur Beschreibung des dampfseitigen Teilwiderstands muß darüberhinaus die Kopplung von Wärme- und Stofftransport berück-

sichtigt werden. Die Behandlung des Wärmeübergangs bei der Kondensation von Dampfgemischen ist folglich wesentlich komplexer als bei Reinstoffen.

Die vorliegende Arbeit trägt sowohl in Aufbau als auch Zielsetzung den geschilderten Ausführungen Rechnung.

Zunächst erfolgt eine ausführliche Beschreibung der experimentellen Untersuchungen. Bei der Planung der Versuche ist die starke Veränderung der verschiedenen Einflußgrößen entlang der Kondensationsstrecke zu beachten. Die physikalischen Vorgänge können folglich nur mit Hilfe lokaler Größen richtig beschrieben werden. Im Unterschied zu den meisten anderen Arbeiten, bei denen ausschließlich mittlere Größen bestimmt wurden, werden hier lokale Werte gemessen.

Im darauffolgenden Kapitel werden die aus den Meßwerten abgeleiteten Größen und deren Genauigkeit erörtert.

Im zentralen Teil dieser Arbeit wird zunächst die Hydrodynamik der Zweiphasen-Ringströmung untersucht. Da sich nur wenige Arbeiten aus dem Bereich der Kondensation mit dieser Thematik beschäftigen, muß größtenteils auf Ergebnisse zurückgegriffen werden, die an isothermen Zweiphasenströmungen gewonnen wurden.

Erkenntnisse über die Struktur von Rieselfilmen bilden dann die Grundlage für ein einfaches Modell zur Beschreibung des Wärmetransports in laminar-welligen Kondensatfilmen. Außerdem wird durch Korrelation der Meßergebnisse über die Kondensation von Reinstoffen ein Berechnungsschema für den filmseitigen Wärmeübergangskoeffizienten aufgestellt. Die Überprüfung der Korrelation sowohl mit Daten anderer Autoren als auch mit eigenen Versuchsergebnissen bei der Kondensation von Dampfgemischen nimmt anschließend breiten Raum ein.

Der Wärmeübergang bei erzwungener einphasiger Konvektion in turbulenter Strömung bildet die Grundlage für die abschließende Beschreibung des dampfseitigen Wärmeübergangs bei der Kondensation von Gemischen.