

Wärmetransport in binären Fallfilmen mit Flüssig/Flüssig-Phasenumwandlung

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (DR.-ING.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Olga Sellmann, geb. Smirnova
aus Novyj Byt, Russland

Tag des Kolloquiums: 29. Mai 2007

Referent: Prof. Dr.-Ing. Reiner Numrich

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Manfred H. Pahl

Schriftenreihe der Verfahrenstechnik Universität Paderborn

Band 35

Olga Sellmann

**Wärmetransport in binären Fallfilmen
mit Flüssig/Flüssig-Phasenumwandlung**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8686-6

ISSN 1435-1137

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Mutter.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Energie- und Verfahrenstechnik an der Universität Paderborn.

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Manfred H. Pahl bedanken, der mich an seinem Lehrstuhl aufgenommen und meine Forschungstätigkeit wohlwollend verfolgt und gefördert hat. Ferner danke ich ihm für die Übernahme des Korreferats. Dem Dekan der Fakultät für Maschinenbau, Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, danke ich für sein stetes Interesse am Fortgang und die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Professor Dr.-Ing. Reiner Numrich, der durch kritische Hinweise und Ratschläge wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kollegen des Instituts für das ausgezeichnete und motivierende Arbeitsklima. Speziell geht mein Dank an meine lieben Kollegen Sonja und Hannu Sieber, Falko Hartmann, Tobias Wehry, Dr. Henning Raach, Boban Maletic, Ulrike Herrmann und Christiane Müller. Sie hatten immer ein offenes Ohr sowohl für fachliche als auch persönliche Belange. Dr. Gerhard Herres danke ich für die wertvollen fachlichen Diskussionen. Besonders möchte ich mich bei den Kollegen der Werkstatt Klaus-Dieter Beckmann und Norbert Temborius für ihre stets tatkräftige Unterstützung beim Aufbau der Experimente bedanken.

Abschließend bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Mutter für ihre unermüdete Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung. Meinem Mann danke ich von Herzen dafür, dass er in allen schwierigen Situationen für mich da war und mir immer einen festen Rückhalt gegeben hat.

Providence, Vereinigte Staaten, im Oktober 2007

Olga Sellmann

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	III
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Grundlagen der Flüssig/Flüssig-Phasenumwandlung	3
2.1 Partielle Löslichkeit	3
2.2 Modellvorstellungen zu Phasenumwandlungen	5
2.2.1 Keimbildung	6
2.2.2 Spinodalenzerfall	10
3 Hydrodynamik und Wärmeübergang in Fallfilmen	13
3.1 Einleitung und Definition der Kenngrößen	13
3.2 Hydrodynamik von Fallfilmen	14
3.3 Wärmeübergang in einphasigen Fallfilmen	20
3.4 Wärmeübergang in zweiphasigen Fallfilmen	25
4 Versuchsanlage, Testflüssigkeit, Versuchsdurchführung- und Auswertung	29
4.1 Aufbau der Versuchsanlage	29
4.2 Messverfahren und Messtechnik	34
4.2.1 Temperaturmessung	35
4.2.2 Massenstrommessung	38
4.3 Wahl der Testflüssigkeit	38
4.3.1 Phasendiagramm der Testflüssigkeit	39
4.3.2 Bestimmung von Zusammensetzungen der Phasen in Abhängigkeit von der Temperatur	41
4.3.3 Stoffwerte der Testflüssigkeit	43
4.4 Versuchsplanung	44
4.5 Versuchsdurchführung	48
4.6 Verarbeitung der Messdaten	49
4.7 Fehlerbetrachtung	51

5	Ergebnisse	53
5.1	Variation der Kühllänge und des Massenstroms der Testflüssigkeit . . .	53
5.2	Einfluss der Intensität der Kühlung	59
5.3	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	66
6	Zusammenfassung	73
	Literaturverzeichnis	75
A	Messergebnisse	81
B	Ermittlung der Messunsicherheiten	99
C	Gleichgewichtsdaten der Testflüssigkeit	103
D	Stoffwerte	115
E	Ergebnisse der Kalibrierung	127

Nomenklatur

Formelzeichen:

Lateinische Zeichen

A	Oberfläche
a	Temperaturleitfähigkeit
C	Konstante
c_p	spezifische Wärmekapazität
d	Durchmesser
G	Gibbs-Energie
g	Erdbeschleunigung
J	Keimbildungsrate
KP	kritischer Punkt
k	Wärmedurchgangskoeffizient
k_B	Boltzmann-Konstante
l	Länge
$\tilde{M}$	Molmasse
$\dot{M}$	Massenstrom
$\dot{m}$	Massenstromdichte
N	Anzahl der Keime
p	Druck
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
R	molare Gaskonstante
T	Temperatur
t	Zeit
U	Spannung
u	Geschwindigkeit
W	Bildungsenergie
x	Molanteil
x	Koordinate in Strömungsrichtung
y	Koordinate quer zur Strömung

Griechische Zeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient
δ	Filmdicke
η	dynamische Viskosität
λ	Wärmeleitfähigkeit
ν	kinematische Viskosität
Θ	Kontaktwinkel
ρ	Dichte
ξ	Massenanteil

Indizes:

A	Austritt
a	außen
E	Eintritt
het	heterogen
hom	homogen
i	innen
KF	Kühlflüssigkeit
kr	kritisch
L	Flüssigkeit
lam	laminar
o	obere
R	Rohr
S	Sättigung
sp	Spinodale
T	Tropfen
TF	Testflüssigkeit
$turb$	turbulent
u	untere
W	Wand
1	Komponente 1 ($C_4H_4N_2$)
11	Komponente 1, Phase 1
12	Komponente 1, Phase 2
2	Komponente 2 (H_2O)

Dimensionslose Kennzahlen:

$Nu = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{\nu^2}{g} \right)^{1/3}$	Nusselt-Zahl
$Ka = \frac{\rho \sigma^3}{g \eta^4}$	Kapitza-Zahl (Filmkennzahl)
$Pr = \frac{\nu}{a}$	Prandtl-Zahl
$Re = \frac{\dot{m}}{\eta} = \frac{\dot{M}}{\pi d \eta}$	Reynolds-Zahl