

**MODELLIERUNG UND SIMULATION DES BLASENSIEDENS
AN EINER KEIMSTELLE**

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

Vorgelegt von
Harald Mandel
aus Leinfelden-Echterdingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. J. Mitrovic
Tag der mündlichen Prüfung: 21. Februar 2003

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart
2003

Kurzfassung

Mandel, Harald:

MODELLIERUNG UND SIMULATION DES BLASENSIEDENS AN EINER KEIMSTELLE

Das Literaturstudium zeigt, dass der Einfluss der Heizwandeigenschaften auf den Wärmeübergang beim Blasensieden lange Zeit vernachlässigt wurde. Für die vollständige Beschreibung des Wärmeübergangs muss neben den Transportvorgängen im Fluid auch der Wärmetransport in der Heizwand berücksichtigt werden.

In einem Teil dieser Arbeit wird die Wärmeleitung in der Heizwand in der Umgebung einer aktiven Keimstelle numerisch untersucht. Der Blasenwachstumsvorgang, das Abreißen der Blase und die Wartezeit bis zur Bildung der nächsten Blase werden mit Hilfe von orts- und zeitabhängigen Randbedingungen an der Oberfläche der Heizwand beschrieben. Die Oberfläche der Heizwand wird in drei Bereiche eingeteilt: einen Bereich unter der wachsenden Blase, einen außerhalb des Einflussgebietes der Blase und in einen dazwischenliegenden Bereich unter der sogenannten „Mikrozone“. Durch die Mikrozone geht entsprechend den verwendeten Modellannahmen ein Großteil der Wärme aus der Heizwand an die Flüssigkeit und die Blase. Die Mikrozone bewegt sich auf der Oberfläche der Heizwand während des Blasenwachstums. Unter ihr kühlt sich die Heizwand kurzfristig ab. Für eine numerische Parameterstudie werden die Stoffwerte der Heizwand sowie das Verhältnis von Blasenbildungs- zur Periodendauer variiert. Die Ergebnisse werden mit Literaturangaben verglichen.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit behandelt den Energie- und Massentransport in der flüssigen und der dampfförmigen Phase. Aus der Literaturrecherche ergibt sich, dass die Volume of Fluid (VOF)-Methode sehr gut geeignet ist, Zweiphasenströmungen mit zusammenwachsenden und sich ablösenden Blasen numerisch zu beschreiben. Beide Phasen zusammen werden dabei als *ein* Kontinuum modelliert. Die Phasenverteilung wird über eine Indikatorfunktion wiedergegeben. Das hier entwickelte Modell lässt unterschiedliche Geschwindigkeiten beiderseits der Phasengrenze zu, wie sie beim Phasenwechsel auftreten. Da mit dem Phasenwechsel gleichzeitig ein Massen- und Enthalpietransport über die Phasengrenze gekoppelt ist, wird die VOF-Methode erweitert, indem die Sprungbedingungen an der Phasengrenze als Quellterme in den Erhaltungsgleichungen berücksichtigt werden. Die physikalischen Grundlagen dazu werden ausführlich dargestellt. Auf die Bilanzierung der Erhaltungsgleichungen an der Phasengrenze wird besonders eingegangen.

Zur Simulation der Transportvorgänge im Fluid in obigem Modell werden sowohl kommerziell erhältliche CFD-Programme verwendet als auch ein im Quellcode verfügbares Programm deutlich erweitert. Bei dem entwickelten Computerprogramm wird zur Lösung des Differentialgleichungssystems, bestehend aus den Erhaltungsgleichungen, die Methode der Finiten Volumen verwendet. Besondere Vorkehrungen werden getroffen, um die scharfe Phasengrenze möglichst exakt abzubilden. Numerische Diffusion und unphysikalische Werte werden dadurch verhindert, dass eine sogenannte „Spender-Empfänger“-Formulierung für den Transport der Indikatorfunktion verwendet wird. Das numerische Modell dieser Formulierung wird ausführlich diskutiert.

An drei Testbeispielen wird die entwickelte Methode validiert.

Abstract

Mandel, Harald:

MODELLING AND SIMULATION IN POOL BOILING ON A SINGLE NUCLEATION SITE

The properties of the heating wall have been neglected so far in literature for modelling of nucleate boiling heat transfer. For a complete description of the heat transfer during nucleate boiling, both the transport processes in the fluid and the heat conduction inside the wall must be considered. For this purpose, heat conduction inside the wall is examined numerically in the vicinity of an active nucleate site.

Bubble growth, bubble departure and the waiting time for the formation of a following bubble are described using space- and time-dependent boundary conditions. The upper surface of the heating wall is divided into three parts: one immediately below the growing bubble, one beyond the zone of bubble-influence, and a zone separating the other two, which is affected by the so-called microzone. According to the model assumptions, a large part of the heat enters the fluid through the microzone. During bubble growth the microzone moves on the surface of the wall. The temperature in the wall decreases briefly under the microzone. In a numerical parameter study, both the properties of the wall and the ratio between bubble growth time and bubble cycle duration are varied. The results are compared to data from the literature.

For a complete description of the phenomena, the processes in the fluid are also simulated.

The literature review shows that the volume-of-fluid-(VOF)-method is very well suited for the numerical description of two-phase flows with merging or detaching of bubbles. The fluids together are thereby modelled as a single continuum. For the fluid properties a jump at the interface is allowed. The phase distribution is given by an indicator function. The model developed here allows different velocities on either side of the interface. This is necessary for a correct description of phase transition. A mass and enthalpy transport across the interface is coupled with the phase transition. For this purpose, the VOF-method is extended by including source terms in the transport equations representing the jump conditions at the interface. The underlying physical concepts, in particular, the energy and mass balance at the interface, are described in detail.

For the simulation of the transport processes in the fluid commercial CFD programmes are used. Also a programme available as source code is extended substantially. The discretisation of the extended programme is based on the finite volume method. Special provisions are made in order to represent the sharp interface as exactly as possible. Numerical diffusion and non-physical values are prevented by using a so-called "donor-acceptor"-formulation for the transport of the indicator function. The numerical implementation of this formulation is discussed in detail.

The developed method is validated using three test examples.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	VIII
Inhaltsverzeichnis	IX
Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Klassifizierung des Siedeprozesses.....	2
1.2 Inhaltsangabe.....	3
2 Literaturübersicht	5
2.1 Modelle zur Wärmeübertragung beim Blasensieden	5
2.2 Keimstellendichte und Blaseneinflussbereich	9
2.3 Blasenbildungs- und Wartezeit.....	13
2.3.1 Blasenfrequenz	14
2.3.2 Wachstumsgesetze und Blasenbildungszeiten.....	15
2.3.3 Wartezeiten	16
2.4 Numerische Untersuchungen zum Blasenwachstum	19
3 Physikalische Grundlagen	23
3.1 Die Transportgleichung für die Indikatorfunktion	26
3.2 Die Erhaltungsgleichung für die Masse	29
3.3 Die Erhaltungsgleichung für den Impuls.....	30
3.3.1 Die Oberflächenspannung.....	31
3.4 Die Erhaltungsgleichung für die Energie	33
3.4.1 Senkenterm in der Energieerhaltungsgleichung	34
3.4.2 Temperatur an der Phasengrenze	35
3.4.3 Die Energiegleichung in der Heizwand	37
4 Das numerische Modell	39
4.1 Methoden zur Beschreibung der Phasengrenze	40
4.2 Diskretisierung / Finite Volumen Methode.....	42
4.2.1 Diskretisierung der Indikatorgleichung.....	43
4.2.2 Diskretisierung der Impuls- und Energieerhaltungsgleichung.....	45
4.2.2.1 Der konvektive Term	45

4.2.2.2	Der diffusive Term.....	46
4.2.2.3	Die Auftriebskraft.....	47
4.2.2.4	Die Oberflächenspannung.....	48
4.2.2.5	Der Senkenterm in der Energieerhaltungsgleichung.....	48
4.2.2.6	Zeitliche Diskretisierung.....	49
4.2.3	Bestimmungsgleichung für den Druck.....	50
4.3	Berechnung des Massenstroms über die Kontrollvolumenoberfläche.....	51
4.3.1	Zusammenfassung des Lösungsalgorithmus der Indikatorgleichung...55	
5	Wärmetransport in der Heizwand.....	57
5.1	Berechnungsgrundlagen.....	58
5.2	Berechnungen mit zeitlich konstanten Randbedingungen.....	68
5.3	Berechnungen mit instationären Randbedingungen.....	72
5.3.1	Ortsfeste Mikrozone.....	72
5.3.2	Wandernde Mikrozone.....	77
5.3.2.1	Ergebnisse mit dem Versuchsstoff R114.....	77
6	Anwendung und Validierung des numerischen Verfahrens.....	85
6.1.	Transport eines quadratischen Objektes in einem schräg zum Gitter verlaufenden Strömungsfeld.....	85
6.2.	Eindimensionale Verdampfung an einer freien Oberfläche.....	88
6.3.	Einfluss der Oberflächenspannung.....	90
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	93
8	Literaturverzeichnis.....	97
	Anhang.....	107
Anhang A	Stationäres Wärmeleitmodell nach Kenning.....	107
Anhang B	Stoffwerte und Parameter für die Berechnungen in Kapitel 5.4.....	108
Anhang C	Analytische Lösung für die eindimensionale Verdampfung.....	109

Das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Computerprogramm ist am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart vorhanden und kann dort eingesehen werden.