

Dipl.-Ing. Martin Fährdrich, München

**Modellierung der
Verdampfungs- und
Strömungsvorgänge
beim Bubble-Jet Prozeß**

Reihe **7**: Strömungstechnik

Nr. **305**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Mikrosystemtechnik und Mikrofluidtechnik	1
1.2	Wirkprinzip des Bubble-Jet Aktors	2
1.3	Simulation als Entwicklungsinstrument	3
1.4	Stand der Technik	5
1.5	Zielsetzung	6
2	Modellkonzept	10
2.1	Physikalische Vorgänge beim Bubble-Jet	10
2.2	Simulationsmethoden der Thermo-Fluidmechanik	12
2.3	Separate Modellierung der Einzelvorgänge	14
2.4	Kopplung zwischen Blasenwachstum und Strömungsbe- wegung	16
3	Modellierung der einzelnen Phasen	19
3.1	Aufheizvorgang	19
3.1.1	Differentialgleichung der Wärmeleitung	19
3.1.2	Näherungsweise eindimensionale Berechnung	21
3.1.3	Thermophysikalische Stoffwerte	22
3.2	Keimbildung bzw. Keimaktivierung	24
3.2.1	Thermodynamische Grenze der Überhitzbarkeit	24
3.2.2	Homogene Keimbildung	27
3.2.3	Heterogene Keimbildung	34
3.2.4	Aktivierung von bestehenden Keimen	39
3.2.5	Keimbildungsmechanismus beim Bubble-Jet Prozeß	43
3.2.6	Keimbildungskriterium für Bubble-Jet Prozesse	45
3.3	Keimwachstum	50
3.3.1	Stationäre und instationäre Siedephänomene	51
3.3.2	Beobachtungen beim Bubble-Jet	52
3.3.3	Keimwachstum beim Bubble-Jet-Prozeß	55
3.3.4	Ausbilden einer Mikroschicht	59
3.3.5	Vollständiges Verdampfen der Mikroschicht	61

3.3.6	Wärmetransport während der Keimwachstumsphase	64
3.4	Filmbildung	66
3.4.1	Vorherrschende Mechanismen bei der Filmausbreitung	66
3.4.2	Empirisches Kriterium für die Filmbildung . . .	67
3.4.3	Wärmetransport während der Filmbildung . . .	70
3.4.4	Anfangszustand des Dampffilms	71
3.5	Strömungsbewegung	72
3.5.1	Gleichungen für die mehrdimensionale Strömung	72
3.5.2	Berücksichtigung mehrerer Phasen	76
3.5.3	Modellierung von Effekten an der Phasengrenze	79
3.5.4	Die gelösten Gleichungen	83
3.5.5	Randbedingungen	83
3.6	Wachstum des Dampffilms	85
3.6.1	Erhaltungssätze	85
3.6.2	Strömungsmechanisches Ersatzmodell	88
3.6.3	Modellierung des Phasenwechsels	94
3.6.4	Die gelösten Transportgleichungen	99
3.6.5	Randbedingungen	100
3.7	Zusammenfassung des Gesamtmodells	101
4	Numerik	103
4.1	Gittergeometrie	103
4.2	Prinzip des Finite-Volumen Verfahrens	104
4.3	Diskretisierung der Transportgleichungen	106
4.3.1	Räumliche Diskretisierung	106
4.3.2	Zeitliche Diskretisierung	107
4.3.3	Die diskretisierten Gleichungen	108
4.4	Diskretisierung an der Phasengrenze beim VOF-Verfahren	108
4.4.1	Problem der numerischen Diffusion	108
4.4.2	Modifizierte Diskretisierung des konvektiven Transports	109
4.4.3	Behandlung der Stoffwerte an der Phasengrenze	111
4.5	Kopplung im SIMPLE-Algorithmus	112
4.6	Lösung des Gleichungssystems	113

5	Anwendungsbeispiele	116
5.1	Simulationsbeispiel	116
5.2	Ausgewählte Vergleiche mit Meßreihen	126
5.3	Prozeßmodulierung	129
5.3.1	Variation der Heizpulsstärke	130
5.3.2	Variation der Heizpulsdauer	132
5.3.3	Variation der Strömungsgeometrie	133
6	Zusammenfassung	137
A	Stoffwert-Ansätze	139
A.1	Dünnschichtmaterialien	139
A.2	Arbeitsfluid Wasser	141
A.2.1	Sättigungslinie	141
A.2.2	Verdampfungsenthalpie	141
A.2.3	Stoffwerte im flüssigen Zustand	142
A.2.4	Stoffwerte im Dampfzustand	142
A.3	Luft der Umgebung	143
B	Homogene Keimbildungstheorie	144
B.1	Herleitung der Keimbildungshäufigkeit aus Gesamtbe- trachtung	144
B.2	Herleitung der Keimbildungshäufigkeit aus Betrachtung von Einzelvorgängen	145
B.3	Herleitung des kritischen Keimradius	146