

# Simulation der Wärmeübertragung und Zweiphasenströmung in Apparaten der Mikroverfahrenstechnik

Martin Wörner <sup>1)</sup>, Achim Wenka <sup>2)</sup>, Anke Halbritter <sup>2)</sup>, Uwe Imke <sup>1)</sup>, Bradut Ghidersa <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Reaktorsicherheit  
<sup>2)</sup> Institut für Mikroverfahrenstechnik

## Zusammenfassung

Die numerische Strömungssimulation etabliert sich zunehmend als Werkzeug zur Untersuchung von Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgängen in technischen Apparaten. Sie stellt gerade für die Mikroverfahrenstechnik eine wertvolle Ergänzung zu experimentellen Untersuchungen dar. Dabei erfordern anwendungsnahe und grundlagenorientierte Fragestellungen Rechenprogramme mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. In diesem Beitrag werden Ergebnisse für einen Mikrowärmeübertrager auf der Basis einer detaillierten und einer vereinfachten Simulation gegenübergestellt und die detaillierte Simulation einer Zweiphasenströmung in einem quadratischen Einzel-Kanal vorgestellt. Der mit den Rechnungen verbundene numerische Aufwand wird diskutiert.

## 1. Einleitung

Apparate der Mikroverfahrenstechnik wie Mikrowärmeübertrager und Mikroreaktoren (siehe z.B. [1]) bestehen häufig aus einer Vielzahl einzelner, paralleler Kanäle. Die Strömung in den einzelnen Kanälen ist hydrodynamisch getrennt, doch besteht bei Wärmeübertragungsvorgängen und Fluiden mit temperaturabhängigen Stoffwerten eine Kopplung aufgrund der Wärmeleitung in der Struktur. Die Apparate-Auslegung und -Optimierung erfordert daher nach Möglichkeit die Kenntnis der Strömungsvorgänge im einzelnen Kanal und der thermischen Kopplung über das Strukturmaterial.

Eine Bestimmung der Strömungsverteilung innerhalb der einzelnen Mikrokanäle sowie die Bestimmung der Temperaturverteilung im Fluid und im Strukturmaterial liegt außerhalb derzeitiger experimenteller Möglichkeiten. Als Alternative bietet sich die numerische Strömungssimulation an (engl.: CFD = computational fluid dynamics). Bei der Entwicklung und Anwendung von Rechenprogrammen werden dazu im Forschungszentrum Karlsruhe zwei sich ergänzende Strategien verfolgt: Eine den Einzel-Kanal und die Struktur fein auflösende aber Rechenzeit-intensive detaillierte Simulation und eine vereinfachte aber schnelle Simulation auf der Basis experimentell qualifizierter empirischer Modelle. Ausgewählte Ergebnisse dieser numerischen Strömungssimulationen für Fragestellungen der Mikroverfahrenstechnik werden nachfolgend vorgestellt und der damit verbundene Rechenzeitbedarf diskutiert. Ergebnisse für einen Mikrowärmeübertrager in Kreuzstrombauweise werden in Abschnitt 2 auf der Basis einer

detaillierten und in Abschnitt 3 auf der Basis einer vereinfachten Simulation vorgestellt. Abschnitt 4 zeigt Ergebnisse von detaillierten Simulationen der Zweiphasenströmung von Luftblasen in Öl in einem quadratischen Minikanal.

## 2. Detaillierte Simulation eines Mikrowärmeübertragers

### 2.1 Apparate-Beschreibung

Abbildung 1 zeigt den Grundkörper eines  $1\text{cm}^3$  Mikrowärmeübertragers [1,2] sowohl als Einzelkomponente als auch im eingebauten Zustand mit Anschlüssen. Der Grundkörper besteht aus 50 kreuzweise übereinander angeordneter Folien von je  $200\ \mu\text{m}$  Dicke. Die Folien haben eine Kantenlänge von  $14\ \text{mm}$  und einen mikrostrukturierten Bereich von  $14\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$  mit 34 parallelen Mikrokanälen des Querschnittes  $200\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ . Durch das kreuzweise Stapeln der Folien resultiert ein würfelförmiges Volumen mit  $10\ \text{mm}$  Kantenlänge, in dem die Kanäle überlappen und der größte Teil der Wärme übertragen wird.

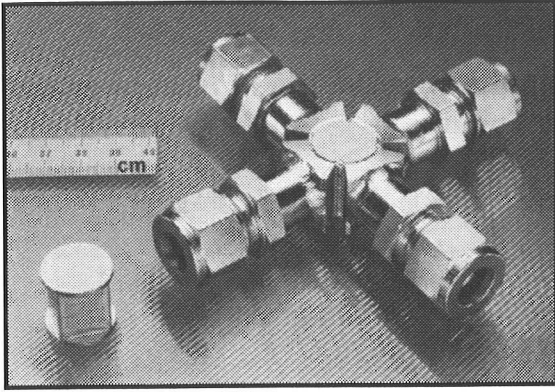


Abb. 1: Grundkörper des  $1\text{cm}^3$ -Wärmeübertragers als Einzelkomponente und im eingebauten Zustand mit Anschlüssen.

Bei der Leistungsmessung und Charakterisierung von Mikrowärmeübertragern wird neben dem Druckverlust und dem Massenstrom durch die Passagen deren Ein- und Austrittstemperatur bestimmt. Diese integralen Daten geben jedoch keine Auskunft über den Temperaturverlauf in den Kanälen. Um darüber Informationen zu erhalten, wurden numerische Berechnungen für symmetrische Wasserdurchsätze im  $1\text{cm}^3$  Mikrowärmeübertrager simuliert und mit Messergebnissen verglichen [3].

## 2.2 Simulationsmodell und Rechenprogramm FLUENT

Geht man davon aus, dass für alle Folien einer Passage identische Strömungsverhältnisse vorliegen, kann man einen Mikrowärmeübertrager als System parallel geschalteter „Kreuzstrommodule“ betrachten. Jedes Kreuzstrommodul besteht aus einer Folie der kalten und einer Folie der warmen Passage. Wird die übertragene Leistung eines Kreuzstrommoduls mit der Anzahl der Folien einer Passage multipliziert, resultiert daraus die Gesamtleistung des Apparats.

Die nachfolgend vorgestellten Rechnungen wurden mit dem kommerziellen CFD Programm FLUENT durchgeführt. Dieses löst die physikalischen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie auf einem unstrukturierten Gitter mit Hilfe einer Finite-Volumen Diskretisierung. Die Rechnungen wurden nicht für den gesamten Mikrowärmeübertrager sondern lediglich für ein Kreuzstrommodul durchgeführt. Der Querschnitt jedes einzelnen der  $2 \times 34$  Mikrokanäle ist dabei mit je  $4 \times 4$  Maschen aufgelöst. Insgesamt sind Fluidbereich und Strukturmaterial mit ca. 500.000 Maschen diskretisiert. Die Berechnung einer stationären Lösung auf einem PC (Pentium Xeon 2 GHz) erfordert ca. 10 Stunden Rechenzeit. Damit wird deutlich, dass die detaillierte Berechnung eines Mikrowärmeübertragers über

dessen gesamten Leistungsbereich zu einem sehr hohen Rechenaufwand führen würde. Hier bietet sich eine vereinfachte Simulation an, siehe Abschnitt 3.

## 2.3 Ergebnisse

Für solch ein Kreuzstrommodul wurde der Wärmeübergang für symmetrische Gesamtdurchsätze von  $25\text{ kg/h}$  und  $400\text{ kg/h}$  simuliert [3]. Symmetrisch bedeutet hier gleiche Wasserdurchsätze für beide Passagen. Die Eintrittstemperatur betrug auf der kalten Seite  $8^\circ\text{C}$  und auf der warmen Seite  $95^\circ\text{C}$ .

Abbildung 2 zeigt den Temperaturverlauf in den Mikrokanälen des strukturierten Überlappungsbereichs für beide Passagen für den symmetrischen Wasserdurchsatz von  $25\text{ kg/h}$ . Auffallend ist der Einfluss der Wärmeleitung in den unstrukturierten Eckbereichen der Folien auf den ersten Kanal der warmen bzw. letzten Kanal der kalten Passage. In den ersten  $2\text{ mm}$  dieser Kanäle wird das warme Wasser von  $95^\circ\text{C}$  auf ca.  $70^\circ\text{C}$  abgekühlt, die kalte Flüssigkeit von  $8^\circ\text{C}$  auf ca.  $18^\circ\text{C}$  erwärmt. Die Abkühlung des Wassers von  $70^\circ\text{C}$  auf ca.  $15^\circ\text{C}$  im ersten Kanal der warmen Passage ähnelt dem Verlauf einer Hyperbel. Betrachtet man die Abkühlvorgänge in den anderen Kanälen der warmen Passage, so stellt man fest, dass mit steigender Kanalnummer die Austrittstemperatur zunimmt. Die Krümmung der Abkühlkurven nimmt dabei stetig ab, bis sie nahezu in Geraden übergehen. Im letzten Kanal erfährt die Flüssigkeit eine konstant verlaufende Abkühlung von  $95^\circ\text{C}$  auf ca.  $60^\circ\text{C}$ . Für die kalte Passage gilt ähnliches. Es ergibt sich eine hyperbolisch verlaufende Erwärmung des Wassers im letzten Kanal auf ca.  $85^\circ\text{C}$  und eine gleichmäßige Erwärmung des Fluids im ersten Kanal auf ca.  $50^\circ\text{C}$ .

Abbildung 3 zeigt den zu Abb. 2 entsprechenden Temperaturverlauf in der kalten und warmen Passage bei einem Wasserdurchsatz von je  $400\text{ kg/h}$ . Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslaufbereich einer Passage ist wesentlich geringer ist als beim Wasserdurchsatz von  $25\text{ kg/h}$  und die Erwärmung bzw. Abkühlung in fast allen Kanälen erfolgt ziemlich gleichmäßig. Die maximale Temperaturänderung in der warmen Passage erfährt das Wasser im ersten Kanal. Hier wird es von  $95^\circ\text{C}$  auf ca.  $70^\circ\text{C}$  abgekühlt. In den folgenden Kanälen beträgt die Austrittstemperatur der Kanäle ca.  $80^\circ\text{C}$ . Sie bleibt über den größten Teil der Passage konstant. Die letzten Kanäle der warmen Passage werden durch den Auslauf der Kaltwasserpassage beeinflusst, so dass ihre Austrittstemperaturen wieder etwas sinken. Das Wasser der kalten Passage erfährt in fast allen Kanälen eine gleichmäßige Erwärmung von  $8^\circ\text{C}$  auf ca.  $25^\circ\text{C}$ .

Bei den Kanälen in den Außenzonen des strukturierten Bereichs der Folie macht sich der Ein- und Ausströmbereich der Warmwasserpassage bemerkbar. Hier liegen die Austrittstemperaturen der Kanäle etwas höher. Die größte Temperaturerhöhung der kalten Passage von 8°C auf ca. 28°C tritt in Kanal 34 auf.

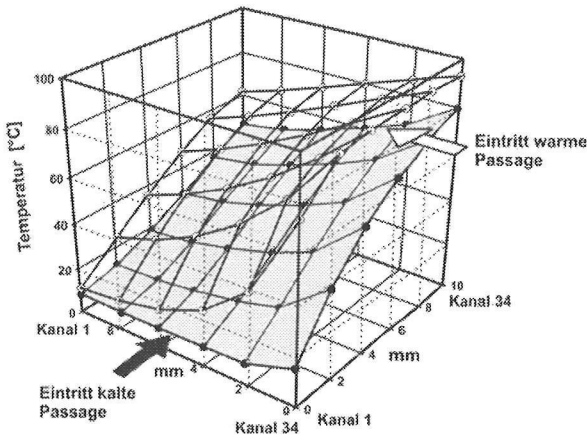


Abb. 2: Temperaturverlauf in den Mikrokanälen der warmen und kalten Passage für den symmetrischen Wasserdurchsatz von 25 kg/h.

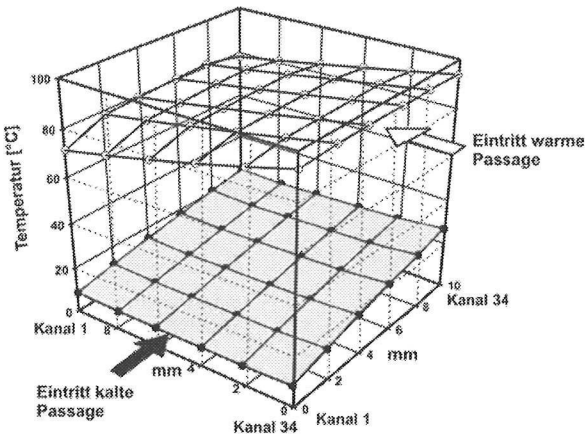


Abb. 3: Temperaturverlauf in den Mikrokanälen der warmen und kalten Passage für den symmetrischen Wasserdurchsatz von 400 kg/h.

Vergleicht man die Ergebnisse der Simulationen für die mittleren Ein- und Austrittstemperaturen mit den Messergebnissen, ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen [3]. Dies belegt auch Abbildung 4, in der die Aufheizung der kalten Passage über dem Durchsatz aufgetragen ist. Die Ergebnisse der Untersuchungen verdeutlichen damit, dass die thermischen Eigenschaften eines Mikrowärmeübertragers sehr gut durch eine 3D Simulation mit entsprechenden Randbedingungen charakterisiert werden.

### 3. Vereinfachte Simulation des Mikrowärmeübertragers

#### 3.1 Grundidee

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert führt die detaillierte Simulation vieler verschiedener Betriebszustände eines Wärmeübertragers mit Auflösung der einzelnen Mikrokanäle mit einem kommerziellen Programm zu einem sehr großen Rechenaufwand. Aus diesem Grund wurde für die vereinfachte Simulation von Apparaten der Mikroverfahrenstechnik das Rechenprogramm TwoPorFlow (Two Phase Porous Flow) entwickelt.

Die Grundidee ist es, die einzelnen feinen Strukturen von Mikrowärmeübertragern nicht durch das Gitter räumlich aufzulösen, sondern stattdessen zu „verschmieren“. Dies bietet den Vorteil, dass deutlich gröbere Maschennetze verwendet werden können, und so die Kennlinie des Apparates mit viel geringerem Aufwand berechnet werden kann. Nachteilig am Konzept der vereinfachten Simulation ist, dass relevante physikalische Vorgänge wie Strömungsdruckverlust und Wärmeübertragung innerhalb der Mikrokanäle durch geeignete empirische Korrelationen modelliert werden müssen.

Ein weiterer Vorteil von TwoPorFlow ist, dass damit, ausgehend von einphasiger Strömung, Siedevorgänge bis zur Produktion von überhitztem Dampf berechnet werden können. Dies ist zur Zeit mit fortschrittlichen kommerziellen CFD-Programmen nicht möglich. Mit ihnen können mehrphasige Strömungen nur in ihrer dispersen Form (Bläschen oder Tröpfchen) numerisch stabil beschrieben werden.

#### 3.2 Rechenprogramm TwoPorFlow

Das Rechenprogramm TwoPorFlow [4] beruht auf dem Modell von zwei Fluiden (Flüssigkeit und Dampf), die sich gegenseitig durchdringen [5]. Die reale Geometrie der Mikrokanalstruktur wird durch einen porösen Körper ersetzt, durch den die Fluide strömen. Für beide Phasen werden die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie numerisch gelöst. Die Wärmeleitungsgleichung für die poröse Struktur ergänzt das Gleichungssystem und sorgt für die thermische Kopplung der Strömung in den verschiedenen Kanälen des Mikrowärmeübertragers. Der Austausch von Masse, Impuls und Energie zwischen den Phasen sowie der Wärmeaustausch zwischen der Struktur und den Fluiden wird durch empirische Korrelationen beschrieben, die für die Strömung in Rohren konventioneller Größe entwickelt wurden. In der Literatur gibt es eine Diskussion, inwieweit die Übertragung dieser Schließungsgleichungen für Druckverlust,

Wärmeübertragung und Verdampfung auf Mikrokanäle zulässig ist [6]. Durch den modularen Aufbau des Programms ist es möglich speziell für Mikrokanäle entwickelte Modelle aufzunehmen.

Die numerische Lösung des gekoppelten Systems von Gleichungen beruht auf der ICE-Methode (Implicit Continuous Eulerian), die besonders für zweiphasige Strömungen mit Verdampfung oder Kondensation geeignet ist [7]. Die transiente Methode benutzt ein strukturiertes kartesisches, versetztes Gitter und verbindet die in nicht konservativer Form geschriebene Differenzgleichung für die Geschwindigkeiten mit den konservativen volumenintegrierten Massen- und Energieerhaltungsgleichungen. Als Ergebnis liefert das Programm die räumliche Verteilung von Druck, Temperaturen, Geschwindigkeiten und Dampfvolumenteil.

Um das Programm anzuwenden, muss zunächst die Geometrie des zu simulierenden Mikrowärmeübertragers abgebildet werden, wobei Symmetriebedingungen und die Vernachlässigung von Randeffekten eine wichtige Rolle spielen. Das vereinfachte Abbild des Apparates, welches in der Regel aus einem porösen Körper und den Eintritts- und Austrittsbereichen besteht, wird dann mit einem groben Maschennetz überzogen, um die Berechnungen für verschiedenen Betriebsbedingungen (Durchflussrate, Temperatur, Druck) durchzuführen.

### 3.3 Ergebnisse

Die in Abschnitt 2.3 vorgestellten detaillierten Simulationen des Mikrowärmeübertragers mit FLUENT wurden für zwei bestimmte Durchflussraten durchgeführt. Mit der vereinfachten Simulationsmethode von TwoPorFlow ist es möglich, den gesamten Bereich an Durchflussraten effizient zu simulieren und damit die „Kennlinie“ des Mikrowärmeübertragers zu berechnen. Für die Simulation des mit FLUENT berechneten Kreuzstrommodules aus Abschnitt 2.2 wird in TwoPorFlow ein Maschennetz von  $2 \times 48 \times 48$  Zellen benutzt. Die Rechenzeit auf einer IBM Workstation mit Power4-Prozessor beträgt etwa eine Stunde. Abbildung 4 zeigt die mit TwoPorFlow berechnete Aufheizung von kaltem Wasser für den in Abb. 1 dargestellten Mikrowärmeübertrager in Abhängigkeit von der Durchflussrate in der kalten und warmen Passage. Die berechnete Kurve gibt die gemessenen Werte sehr gut wieder.

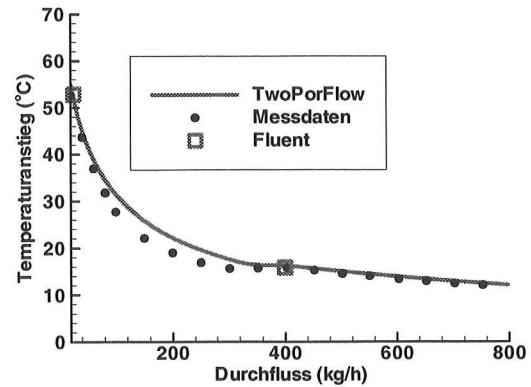


Abb. 4: Mittlere Aufheizung des Wassers in der kalten Passage über der Durchflussrate für den in Abb. 1 dargestellten Mikrowärmeübertrager. Vergleich von Rechnungen und Messungen.

Abbildung 5 zeigt die mit TwoPorFlow berechnete Austrittstemperatur von Wasser bzw. Wasserdampf für einen elektrisch beheizten Mikrowärmeübertrager bzw. Verdampfer (Beschreibung siehe [1]) in Abhängigkeit von der zugeführten Leistung. Die teilweise Überschätzung der Temperatur hat ihre Ursache in Wärmeverlusten an der Oberfläche und den Rohranschlüssen des Gerätes, die in der Rechnung nicht berücksichtigt sind.

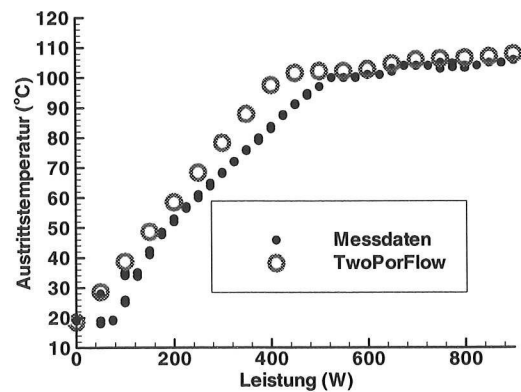


Abb. 5: Mittlere Austrittstemperatur von Wasser bzw. Dampf als Funktion der Leistung für einen elektrisch beheizten Mikrowärmeübertrager und einen Durchsatz von 4,4 kg/h. Vergleich von Rechnungen und Experimenten.

Die Simulationen mit TwoPorFlow zeigen eine - im Hinblick auf die stark vereinfachenden Annahmen - gute Übereinstimmung mit Experimenten. Dies ermöglicht umfangreiche Parameterstudien und somit eine intensive Begleitung von Entwicklung und Anwendung von Apparaten der Mikroverfahrenstechnik. Insbesondere der Einfluss der Mikrokanalgeometrie, der Temperatur und des Massendurchsatzes lassen sich damit effizient analysieren.



## 4. Detaillierte Simulation der Gas-Flüssig-Strömung in einem Minikanal

### 4.1 Motivation

Die Strömung zweier nicht mischbarer Fluide ist für verschiedene Grundoperationen der Verfahrenstechnik von Bedeutung. Dabei bietet der Einsatz von Mikroreaktoren verschiedene Vorteile im Vergleich zu konventionellen chemischen Reaktoren. So lassen sich z.B. in Mikroblasensäulen wesentlich höhere Werte für die Phasengrenzfläche pro Volumeneinheit erzielen [8]. Für die Auslegung, die Optimierung und den zuverlässigen Betrieb von Gas-Flüssig-Mikroreaktoren ist die detaillierte Kenntnis der Hydrodynamik der Zweiphasenströmung im einzelnen Kanal notwendig. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die für Makrokanäle gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne weiteres auf Kanäle mit Abmessungen kleiner etwa 1 mm übertragen lassen.

### 4.2 Rechenprogramm TURBIT-VOF

Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist die detaillierte numerische Berechnung von Gas-Flüssig-Zweiphasenströmungen in Mini- und Mikrokanälen. Hierzu wurde das für Zweiphasenströmungen in Makrokanälen entwickelte Rechenprogramm TURBIT-VOF weiterentwickelt [9]. Dieses basiert auf einer Finite-Volumen-Methode und löst die physikalischen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie beider Phasen auf einem strukturierten kartesischen Gitter und berücksichtigt dabei die Kopplungsbedingungen an der Phasengrenzfläche einschließlich der Oberflächenspannung. Die Berechnung der dynamischen Entwicklung der Phasengrenzfläche erfolgt mit der Volume-of-Fluid Methode (VOF). Dabei wird in jeder Gitterzelle, in der momentan beide Phasen vorliegen, die Phasengrenzfläche lokal durch eine Ebene approximiert. In Strömungsrichtung verwendet das Programm periodische Randbedingungen. Dadurch können nur sich mit einer bestimmten Periodenlänge  $L$  räumlich wiederholende Strömungen berechnet werden. Diese räumliche Periodizität ist für die Strömung nicht mischbarer Fluid in kleinen Kanälen in guter Näherung gegeben.

### 4.3 Simulationsparameter

Zur Validierung von TURBIT-VOF wurde die Strömung von regelmäßig aufeinander folgenden Luftblasen in viskosem Öl in einem vertikalen Kanal mit quadratischem Querschnitt von 2 mm Seitenlänge berechnet [10]. Es wurden zwei Fälle (Fall A und B) miteinander verglichen,

bei denen der Gasvolumenanteil jeweils 33% beträgt, aber die Viskosität des Öls im Fall B um einen Faktor 10 geringer ist als im Fall A. Zusätzlich wird ein unterschiedlicher axialer Druckverlust vorgegeben, so dass sich unterschiedliche Durchsätze beider Phasen einstellen. Die Simulationen erfolgen zeitabhängig und voll dreidimensional. In den zunächst betrachteten Fällen ist das Rechengebiet kubisch und mit  $64^3$  Maschen diskretisiert. Im Fall B wurden dabei mehr als 50.000 Zeitschritte berechnet. Eine solche Simulation erfordert auf einem Prozessor des Vektor-Parallel-Rechners Fujitsu VPP5000 eine Rechenzeit von mehreren hundert Stunden.

### 4.4 Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt die berechnete Blasenform im Kanal für Fall A und B. In Fall A ist die Blase lang gestreckt. In Fall B weicht die Blase weniger stark von der Kugelform ab. Die zusätzliche Darstellung von Partikelbahnen in der Flüssigkeit verdeutlicht, dass in Fall B im Nachlauf der Blase ein Wirbel vorliegt, was in Fall A nicht der Fall ist.

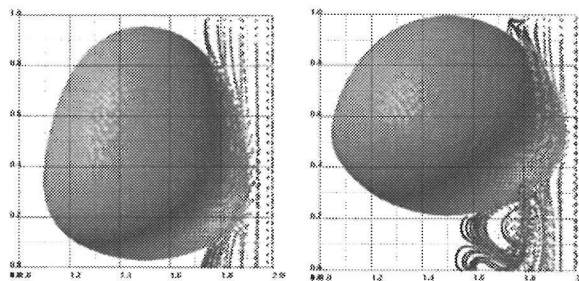


Abb. 6: Seitenansicht der berechneten stationären Blasenform für Fall A (links) und B (rechts). Die Strömung in der Flüssigkeit ist durch die Bahnen masseloser Partikel im sich mit der Blase bewegendem Bezugssystem dargestellt.

Beim Vergleich der Rechenergebnisse mit integralen experimentellen Daten aus der Literatur zeigt sich für die Blaugeschwindigkeit und die Relativgeschwindigkeit von Gas und Flüssigkeit eine gute Übereinstimmung [9]. Der Durchmesser der Blase im größten Querschnitt wurde um ca. 5% unterschätzt, was für die Filmdicke zwischen Blase und Wand von Bedeutung ist.

Um die Ursache für diese Abweichung zu untersuchen, wurden für Fall A weitere Simulationen mit  $48 \times 48$  Maschen im Querschnitt durchgeführt, in denen die Periodenlänge  $L$  vergrößert wurde und alle weiteren Parameter beibehalten wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Auf den ersten Blick bleibt die Blasenform unverändert, doch zeigt eine detaillierte Analyse, dass der Blasendurchmesser mit Zunahme von  $L$  ebenfalls zunimmt und damit besser mit experimentellen Werten übereinstimmt.

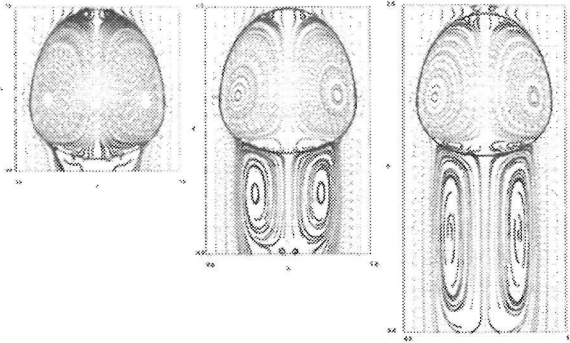


Abb. 7: Blasenform und Strömungsstruktur für Fall A und drei unterschiedliche Periodenlängen ( $L = 2 \text{ mm}$ ,  $L = 3 \text{ mm}$  und  $L = 4 \text{ mm}$ ).

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In dem Beitrag wurden Ergebnisse für einen Mikrowärmeübertrager auf Basis einer detaillierten Simulation mit FLUENT und einer vereinfachten Simulation mit TwoPorFlow vorgestellt. Die gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen zeigt, dass die numerische Strömungssimulation eine äußerst wertvolle Ergän-

zung zu experimentellen Untersuchungen darstellt und einen wesentlichen Beitrag zur Analyse, Weiterentwicklung und Design von Apparaten der Mikroverfahrenstechnik leisten kann. Die detaillierte Simulation einer zweiphasigen Strömung in einem Minikanal mit TURBIT-VOF liefert Informationen über alle Strömungsgrößen mit hoher räumlich-zeitlicher Auflösung und in einem Detail, das weit über die experimentellen Möglichkeiten hinausgeht. Derartige Simulationen bieten damit die Möglichkeit zu einem vertieften physikalischen Verständnis dieser Strömungsvorgänge zu gelangen.

Hinsichtlich der Weiterentwicklung von TwoPorFlow ist es wünschenswert den Code so zu erweitern, dass er nicht nur auf ein Kreuzstrommodul sondern auf den kompletten Mikrowärmeübertrager angewendet werden kann. Auch eine Implementierung von Modulen und Modellen aus TwoPorFlow in FLUENT auf der Basis von Benutzereigenen Unterprogrammen erscheint möglich. Das Rechenprogramm TURBIT-VOF wird aktuell für zweiphasige Strömungen mit Stoffübertragung und chemischer Reaktion weiterentwickelt.

## Literatur

- [1] Schubert K., Brandner J., Fichtner M., Linder G., Schygulla U., Wenka A., „Microstructure devices for applications in thermal and chemical engineering“, *Microscale Thermophysical Engineering* 5 (2001) 17-39.
- [2] Schubert K., Bier W., Brandner J., Fichtner M., Franz C., Linder G., „Realization and testing of microstructure reactor, micro heat exchanger and micromixers for industrial applications in chemical engineering“, *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology*, March 9-12, 1998, New Orleans, LA, USA, pp. 88-95.
- [3] Wenka A., Fichtner M., Schubert K., „Investigation of the thermal properties of a micro heat exchanger by 3D fluid dynamics simulation“, *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology*, March 5-9, 2000, Atlanta, GA, USA, pp. 256-263.
- [4] Imke U., „Porous media simplified simulation of single and two phase flow heat transfer in micro channel heat exchangers“, accepted for publication in *Chem. Eng. Journal*.
- [5] Stewart H.B., Wendroff B.B., „Review – two-phase flow: models and methods“, *J. Comput. Phys.* 56 (1984) 363-409.
- [6] Obot N., „Towards a better understanding of friction and heat/mass transfer in microchannels - a literature review“, Celata G.P., et al. (Eds.), *Proc. Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, Banff, Canada, October 15-20, 2000, Begell House Publ., New York, 2000, pp. 72 -79.
- [7] Harlow F.A., Amsden A., „A numerical fluid dynamics calculation method for all flow speeds“, *J. Comput. Phys.* 8 (1971) 197-213.
- [8] Haverkamp V., Emig G., Hessel V., Liauw M.A., Löwe H., „Characterization of a gas/liquid microreactor, the micro bubble column: determination of specific interfacial area“, in Matlosz M., Ehrfeld W., Baselt J.P. (Eds.): *Microreaction Technology, IMRET-5: Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology*, Springer 2002, pp. 203-214.
- [9] Ghidersa B.E., „Finite Volume-based Volume-of-Fluid Method for the simulation of two-phase flows in small rectangular channels“, *Dissertation Universität Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6889*, 2003.
- [10] Ghidersa B.E., Wörner M., Cacuci D.G., „Exploring the flow of immiscible fluids in a square vertical mini-channel by direct numerical simulation“, accepted for publication in *Chem. Eng. Journal*.

**Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6990

**5. Statuskolloquium des  
Programms Mikrosystemtechnik**

**10./11. Februar 2004  
im Forschungszentrum Karlsruhe**

zusammengestellt von der Programmleitung

**Programm Mikrosystemtechnik**

**Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 36 40, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

**ISSN 0947-8620  
ISSN 1615-133X**