

# **Untersuchungen zur Oberflächenspannung mit ANSYS CFX**

## **Numerische Betrachtung von Luftblasen in Wasser**

### **Masterarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

### **Master of Engineering**

vom Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik  
der Technischen Fachhochschule Berlin

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Frank Baaß

Matrikelnummer: 740702

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Bartsch (TFH Berlin)

Zweitgutachter: Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin)

Berlin,  
im Oktober 2007

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
<b>2</b>	<b>Experimentelle Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Allgemeine Grundlagen .....	6
2.1.1	Oberflächenspannung und Krümmungsdruck .....	6
2.1.2	Reynolds-, Morton- und Eötvös-Kennzahl .....	8
2.2	Experimentelle Arbeiten .....	10
2.2.1	Form und Aufstieg einzelner Blasen .....	11
2.2.2	Terminale Aufstiegs geschwindigkeit .....	16
2.2.3	Schwingung von Blasen .....	20
<b>3</b>	<b>Numerische Grundlagen</b>	<b>24</b>
3.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen .....	25
3.1.1	Massenerhaltung .....	26
3.1.2	Impulserhaltung .....	28
3.1.3	Allgemeine Transportgleichung .....	30
3.1.4	Diskretisierung .....	32
3.1.5	Lösungsverfahren .....	36
3.2	Spezielle Grundlagen der Mehrphasenströmungen .....	37
3.2.1	Mehrphasensimulation mit ANSYS CFX .....	38
3.2.2	Oberflächenspannung in CFX .....	39
3.2.3	Volume-of-Fluid Methode .....	41
3.2.4	Parasitäre Strömungen .....	43
3.2.5	Parameter für Simulationen mit Oberflächenspannung .....	46
<b>4</b>	<b>Simulation von Luftblasen in Wasser</b>	<b>50</b>
4.1	Übersicht der durchgeführten Simulationen .....	51
4.2	Krümmungsdruck einer Luftblase in Schwerelosigkeit .....	55
4.2.1	Initialisierung und Simulationsaufbau .....	55
4.2.2	Konvergenzverhalten und erste Resultate .....	58
4.2.3	Auswertung und Bewertung der numerischen Variationen .....	61
4.2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	80
4.3	Formschwingung einer quadratisch initialisierten Blase .....	81
4.3.1	Erwartetes Schwingungsverhalten .....	81
4.3.2	Ergebnisse .....	82
4.4	Form und Endgeschwindigkeit beim Blasen aufstieg .....	87
4.4.1	Simulationsbedingungen .....	87
4.4.2	Ergebnisse zur Aufstiegs geschwindigkeit und Form .....	89
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>102</b>

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Alle durchgeführten zweidimensionalen Untersuchungen weisen eine gute Übereinstimmung mit theoretischen Werten und experimentell erwartbaren Ergebnissen (Kapitel 2) auf. Auf dem Weg zu diesen Ergebnissen wurden in Kapitel 3 numerische Grundlagen gegeben und wichtige numerische Parameter vorgestellt. Diese und allgemeine Vorgaben wurden in ersten Simulationen (Kapitel 4.2) auf ihre Wirkung hin untersucht. Dabei hat sich das kartesische Gitter mit  $10 \times 10$  mm und 40000 Hexaedern als universell einsetzbares Netz herausgestellt, welches bei einer Zeitschrittweite von  $10^{-5}$  s die physikalisch erwarteten Werte am besten erreichte. Das numerische Problem der parasitären Strömungen konnte auf diesem Gitter minimiert werden. Dazu wurden als Ursachen große Gradienten der vorgegebenen Volumenfraktion und daraus resultierende lokal überhöhte Krümmungen genauer untersucht. In diesen Bereichen treten die größten Diskretisierungsfehler auf und bewirken die Ausbildung eines parasitären Strömungsfeldes an der Phasengrenze. Die Minimierung der damit verbundenen maximalen Geschwindigkeiten im System, die sich besonders deutlich bei fehlenden äußeren Kräften zeigen, stand im Mittelpunkt der Bemühungen. Dazu wurde eine Blase mit 4 mm Durchmesser in Schwerelosigkeit betrachtet. An ihr wurde systematisch eine Vielzahl numerischer Parameter variiert. Davon erwiesen sich die verschmierte Initialisierung der Volumenfraktion als besonders hilfreiches Mittel. Ferner konnten mit dem Expert Parameter „Old Surface Tension Numerics“, einem „Interface Compression Level“ von 0 weitere Reduzierungen der maximalen Geschwindigkeiten erreicht werden. Unter Anwendung der gefundenen Einstellungen wurden zwei klassische Testfälle zweidimensional untersucht. Zum einen wurde die von der Oberflächenspannung getriebene Formschwingung zweier quadratisch initialisierter Blasen hin zu ihrer Gleichgewichtsform dem Kreis simuliert. Die Ergebnisse decken sich sehr gut mit den erwarteten Werten, wie z. B. der Frequenz. Zum anderen wurde der Blasenanstieg in ruhendem Wasser simuliert. Dabei wurde sehr genau auf die Modellierung der Oberflächenspannung als Oberflächenspannungskraft eingegangen (3.2.2). Anhand zahlreicher Bilder (Kapitel 4.4) wurde ihre Wirkung im Wechselspiel mit den äußeren Kräften veranschaulicht. Die Aufstiegs geschwindigkeiten zeigen nach 0,04 s Simulationsdauer noch keinen stationären Zustand und wurden daher trotz des enormen rechentechnischen Aufwandes für eine Blase mit  $d=4$  und eine weitere mit  $d=8$  mm bis 0,1 s fortgesetzt. Die erreichten Aufstiegs geschwindigkeiten liegen wie erwartet unter experimentell erwartbaren Werten. Die Blasenform und ihre Entstehung stimmen gut mit tatsächlichen Formen überein. Das implementierte Modell eignet sich sehr gut für die Berücksichtigung der Oberflächenspannung.