



TECHNISCHE FACHHOCHSCHULE BERLIN
University of Applied Sciences

Fachbereich VIII
Verfahrens- und Umwelttechnik

Masterarbeit zur Erlangung des Grades
M.Eng.

Numerische Strömungssimulation von Füll- und Gussvorgängen

vorgelegt von
Dipl.Ing.(FH) Matthias Voß
Matrikelnr. 7526860

Erstgutachter: Prof. Dr. -Ing. Bartsch
Zweitgutachter: Dr.rer.nat Spille-Kohoff

Berlin, den 15. September 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Ziel der Arbeit	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Allgemeine Prozessschritte beim Befüllen	5
2.2	Anwendungsfälle - Füllventil der Firma KHS	15
2.3	Numerische Simulation von Befüllvorängen	18
2.4	Das Programmpaket ANSYS Workbench	19
3	Grundlagen numerischer Strömungssimulation	21
3.1	Erhaltungsgleichungen	22
3.2	Diskretisierung	24
3.3	Simulation von mehreren Stoffen im Strömungsraum	26
3.4	Kennzahlen	37
4	Füllsimulationen in zwei Dimensionen	39
4.1	Unterschichtende Kanalbefüllung	39
4.2	Stutzenbefüllung	55
4.3	Flaschenbefüllung	65
5	Abfüllung über Langrohr	75
5.1	DVF Füllventil der Firma KHS	75
5.2	Auswertung der Berechnungen	79
5.3	Vereinfachtes Modell	87
6	Abfüllventil	91
6.1	Ventildurchströmung	91
6.2	Auswertung der Berechnungen- Druckkennlinie und ζ -Wert	95
7	Zusammenfassung und Ausblick	103

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit hatte zum Ziel, die Simulation von Füll- und Gussvorgängen mit dem Programmpaket ANSYS CFX durchzuführen. Anhand einer industrienahen Flaschengeometrie sollte eine Befüllung berechnet werden. In Kapitel 2 wurde ein Überblick über die bestehenden Systeme der Abfüllung von flüssigen Lebensmitteln gegeben und das verwendete Beispiel der Langrohrbefüllung vorgestellt. Kapitel 3 stellt die grundlegenden Gleichungen der numerischen Strömungssimulation vor und gibt einen Überblick über die Modelle für mehrphasige Strömungssimulationen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 2 Arbeitsbereiche. Es wurden zunächst in Kapitel 4 zweidimensionale Voruntersuchungen an einfachen Geometrien durchgeführt, um einen geeigneten Zeitschritt für die transienten Berechnung und eine geeignete Netzauflösung zu finden. In diesem Arbeitsabschnitt wurden durchgeführt:

- 2D-Simulation einer unterschichtenden Kanalbefüllung
- 2D-Simulation einer Stutzenbefüllung

Die grundlegende Unterscheidung der Berechnungen erfolgte nach der homogenen oder inhomogenen Formulierung der Strömungsgleichungen und deren Auswirkungen auf den Berechnungsverlauf und die Ergebnisse. Resultierend aus den Simulationen mit adaptivem Zeitschritt in der homogenen Formulierung konnte der geeignete Zeitschritt zunächst auf $0,001s$ ermittelt werden. Die Netzauflösung wurde in Anbetracht der benötigten Rechenzeiten auf $0,08mm$ festgelegt. Es wurden ausschließlich hexahedrale Netze verwendet.

Das Hauptaugenmerk im zweiten Arbeitsabschnitt (Kapitel 5) lag in der Durchführung der Befüllsimulation einer von der Firma KHS zur Verfügung gestellten Flaschengeometrie in der inhomogenen Formulierung, um die Entmischung der Phasen während der Befüllung so gut als möglich abbilden zu können. Im zweiten Arbeitsbereich wurden durchgeführt:

- 2D-Modellierung einer Flaschenbefüllung 6° -Segment
- 3D-Modellierung einer Flaschenbefüllung 72° -Segment

Die Berechnungen in der homogenen Formulierung konnten bei einem Zeitschritt von $0,001s$ und einer Einströmgeschwindigkeit von $1,34 \frac{m}{s}$ (ca. $175 \frac{ml}{s}$) zu zufriedenstellenden Ergebnissen gebracht werden.

Es stellte sich heraus, dass für die inhomogene Formulierung die Berechnungen innerhalb der Zeitschrittweite äußerst schlecht konvergieren. Die Berechnungen wurden mit einer

festen Anzahl von inneren Iterationen durchgeführt, da sich zeigte, dass eine Erhöhung dieser nicht zu einer spürbaren Verbesserung der Berechnungsläufe oder der Ergebnisse führt. Für den Vergleich der Berechnungen wurden jeweils die Anzahl an durchmischten Elementen herangezogen.

Als zusammenfassende Ergebnisse ergaben sich:

- homogene Formulierung sehr robust und für kleine Strömungsgeschwindigkeiten und überschlagsfreie Befüllung sehr gut geeignet
- inhomogene Formulierung bildet den Sachverhalt bedeutend realistischer ab, verläuft aber nur für sehr feine Netze konvergent und stabil
- bessere Berechnungsergebnisse der inhomogenen Berechnungen in der entkoppelten Formulierung der Volumenfraktionsberechnung
- Modellierung der Reibungskräfte der Phasen über das Freie-Oberflächen-Modell in der inhomogenen Formulierung und Standardgrenzflächenschärfung
- es sollte eine Netz/Zeitschrittkombination gefunden werden, die in der Berechnung eine Courant-Zahl kleiner 1 liefert
- für Segmentmodelle liefert die Randbedingung eines rotatorischen Interface bessere Ergebnisse, besonders in den 2D-Modellen
- bei der Verwendung von großen Modellen und Partitionierung des Berechnungsgebietes sollte die Geschwindigkeitsübergabe unterrelaxiert werden
- werden im Berechnungszeitraum Überschläge der Flüssigkeit errechnet, so verliefen die Berechnungen nicht konvergent, in diesem Zeitraum sollte, wenn möglich eine Zeitschrittverkleinerung durchgeführt werden
- Formulierung der Randbedingungen, wie z.B. Einströmgeschwindigkeit über glatte Funktion, z.B. kubische Funktionen wirken sich positiv auf den Berechnungsverlauf aus

Um einen Gesamteinblick über die Strömung während der Abfüllung zu erhalten, wurde das vorgeschaltete Befüllventil in Kapitel 6 einer Untersuchung unterzogen. Es wurde durchgeführt:

- 3D-Modellierung einer Ventildurchströmung mit variierenden Volumenströmen.

Aus dieser Untersuchung wurden Druckkennlinie und ζ -Wert (Widerstandswert) des gegebenen Kegelventils ermittelt. Hierbei stellte sich die Verwendung eines hexahedralen Netzes als besonders geeignet und einem tetrahedralen Netz überlegen dar. Die ermittelten ζ -Werte sind in guter Übereinstimmung zu Literaturwerten nach [14]. Es zeigte sich, dass durch die seitliche Kegelanströmung und die Umlenkung im Ventilraum, sich eine einseitig beschleunigte Strömung im Langrohr ausbildet. Dieser Umstand kann für Freistrahleinrichtungen zu ungleichmäßigem Produktaustrag führen und von Nachteil sein.

Es stellt sich prinzipiell als möglich dar, eine Befüllsimulation in der inhomogenen Formulierung mittels ANSYS CFX abzubilden. Würde ein kleiner Zeitschritt ($\Delta t \geq 0,0001s$) auf einem sehr feinen Netz ($\Delta x, y, z \geq 0,001mm$) verwendet werden können, so ist davon auszugehen, dass eine Berechnung zu sehr guten Ergebnissen führt. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit bietet sich eine solche Verfahrensweise jedoch nicht, da eine solche Berechnung mit erheblichem Zeit- und Speicheraufwand verbunden wäre. Mit steigender Speicherkapazität und Rechenleistung ist das Programmpaket ANSYS CFX durchaus in der Lage zu bestehenden Spezialprogrammen eine Alternative darzustellen. Eine neue Formulierung des Reibungskoeffizienten und eine Unterscheidung zwischen dispers verteilten inhomogenen Phasen, wie z.B. Luftblasen und tatsächlichen freien Oberflächen in der inhomogenen Formulierung ist notwendig.