

**Technische Universität Berlin**

Institut für Strömungsmechanik und technische Akustik  
Fachgebiet numerische Fluidodynamik



Bachelorarbeit

**Modellierung von Hydrauliköl-Luft-Gemischen  
in der CFD-Simulation von Verdrängerpumpen**

René Franke

Matrikelnummer: 346677  
25.04.2020

Erstgutachter  
Prof. Dr. rer. nat. Julius Reiss

Zweitgutachter  
Dr.-Ing. Mathias Lemke

Betrieblicher Betreuer  
Dr. Andreas Spille-Kohoff

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	iii
<b>Tabellenverzeichnis</b>	vii
<b>Nomenklatur</b>	viii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
1.3 Stand der Technik	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Strömungsmechanik	5
2.1.1 Kavitation	5
2.1.2 Erhaltungsgrößen und deren Berechnung	5
2.2 Numerische Fluidodynamik	7
2.2.1 Modellierung mehrphasiger Strömungen	7
2.2.2 Modellierung der Gaskavitation	8
2.2.3 Diskretisierung	9
2.2.4 Randbedingungstypen	12
2.2.5 Turbulenzmodellierung	12
2.2.6 Lösung und Konvergenz	16
2.2.7 Fehlerquellen	16
2.3 Der Kompressionsmodul und Bestimmung der Dichte	18
2.3.1 Reines Öl	18
2.3.2 Gemisch aus Öl und Luft	19
2.4 Bestimmen der Stoffwerte	21
2.4.1 Referenzdichte	22
2.4.2 Viskosität	23
2.4.3 Schallgeschwindigkeit	24
2.5 Rotationsverdrängerpumpen	25
<b>3 Vorbereitung der Simulationen</b>	<b>27</b>
3.1 Validierung der Dichtefunktion	27
3.1.1 Geometrie und Vernetzung	27
3.1.2 Randbedingungen und Solvereinstellungen	28

3.1.3	Ergebnisse	29
3.2	Drehkolbenpumpe	31
3.2.1	Geometrie und Vernetzung	31
3.2.2	Randbedingungen	35
3.2.3	Solver-Einstellungen	36
3.2.4	Sonstige Einstellungen	37
3.3	Innenzahnradpumpe	38
3.3.1	Geometrie und Vernetzung	38
3.3.2	Randbedingungen	42
3.3.3	Solver-Einstellungen	44
3.3.4	Sonstige Einstellungen	44
<b>4</b>	<b>Analyse der Ergebnisse</b>	<b>45</b>
4.1	Drehkolbenpumpe	45
4.1.1	Ermittlung der Drehzahl	45
4.1.2	Konvergenz	46
4.1.3	Vergleich der Ergebnisse	50
4.2	Innenzahnradpumpe	62
4.2.1	Ermittlung der Drehzahl	62
4.2.2	Konvergenz	62
4.2.3	Vergleich der Ergebnisse	66
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>79</b>
5.1	Zusammenfassung	79
5.2	Erweiterungsmöglichkeiten	80
<b>Literatur</b>		<b>81</b>

## 5 Fazit

In diesem Kapitel erfolgt eine abschließende Auswertung der vorgestellten Ergebnisse sowie ein kurzer Ausblick auf mögliche Erweiterungen der vorgestellten Modelle.

### 5.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es zu zeigen, dass durch Luftzufuhr die harte Kavitation von Hydrauliköl in Verdrängerpumpen vermieden werden kann, und ein einphasiges und zweiphasiges Modell für die Modellierung eines Hydrauliköl-Luft-Gemischs zu vergleichen.

Hierzu wurden nach einer kurzen Einführung in die Thematik zunächst die strömungsmechanischen, numerischen und technischen Grundlagen vorgestellt und die beiden Modellierungen beschrieben. Daraufhin wurde an einem einfachen Testfall für verschiedene Volumenanteile der Luft bei atmosphärischem Druck gezeigt, dass beide Modelle dieselbe Druck-Dichte-Kennlinie vorweisen, bevor der Aufbau der Simulationen der Rotationsverdrängerpumpen vorgestellt wurde. Es wurde anhand von Simulationen mit reinem Öl für beide Pumpen eine geeignete Drehzahl ermittelt, indem der Verlauf des minimalen Drucks im Rechengebiet ausgewertet wurde, um zu erkennen, wann dieser negativ wurde, da dies auf die Entstehung von Dampfkavitation hindeutet. Danach erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationen mit einem Volumenanteil der Luft bei atmosphärischem Druck von drei Prozent. Es wurde gezeigt, dass es nicht mehr zu einem negativem Druck kam und somit die Dampfkavitation vermieden werden konnte.

Das einphasige Modell ist weniger anfällig für Diskretisierungsfehler, benötigte weniger Iterationen je Zeitschritt sowie weniger Berechnungszeit und erreichte für manche Größen früher einen periodischen Zustand. Durch Implementierung eines einphasigen Modells kann also viel Rechenleistung eingespart werden. Da beide Modelle eine gute Übereinstimmung der Kennlinien für den maximalen und minimalen Druck im Rechengebiet vorgewiesen haben, wurde das einphasige Modell genutzt, um für beide Pumpen die minimale Volumenfraktion der Luft zu ermitteln, bei der ein Druckabfall unter 0,02 bar vermieden werden konnte. Dabei wurde gezeigt, dass dies schon mit sehr kleinen Volumenfraktionen der Luft von 0,25% beziehungsweise 0,125% möglich war.

Obwohl das einphasige Modell für die meisten Kenngrößen des Systems sehr ähnliche Ergebnisse liefert, kommt es zum Teil zu lokalen Unterschieden. Diese sind hauptsächlich auf die unterschiedliche Bestimmung der Volumenfraktion und die daraus folgenden Diskretisierungsfehler zurückzuführen. Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Die Simulationen liefern bei Kenngrößen des Systems wie dem Massenfluss, dem minimalen und maximalen Druck und der maximalen Geschwindigkeit fast identische Ergebnisse. Bei den Kenngrößen der maximalen und minimalen Dichte und Volumenfraktion liefern die Simulationen sehr ähnliche Ergebnisse. Durch die erheblich verkürzte Berechnungszeit ist das einphasige Modell bei der Bestimmung dieser Größen zu bevorzugen.
- Aufgrund der unterschiedlichen Bestimmung der Volumenfraktion kann es lokal, meist in Gebieten mit hohen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten oder an Interfaces zu größeren Unterschieden in der Verteilung der Volumenfraktion der Luft kommen. Dies muss für die Untersuchung lokaler Phänomene wie zum Beispiel der Spaltströmung oder der Kammerdrücke berücksichtigt werden.

## 5.2 Erweiterungsmöglichkeiten

Hinsichtlich zukünftiger Arbeiten bieten sich folgende Erweiterungsmöglichkeiten:

- **Einführung der Temperaturabhängigkeit**  
Da in der Realität kaum isotherme Systeme zustande kommen, ist eine Erweiterung des Modells um eine Temperaturabhängigkeit möglich.
- **Erweiterung um Lösung des Gases im Fluid**  
Für langsamere Verdrängerpumpen ist eine Implementierung der Löslichkeit des Gases denkbar. Im einphasigen Fall ist dies durch eine Implementierung des „compression and dissolve“-Kompressionsmoduls aus Gholizadeh et al. (2013) möglich. Für mehrphasige Simulationen käme die Modellierung der Lösung des Gases nach dem Full Cavitation Modell aus Singhal et al. (2005) oder nach Schmitz und Murrenhoff (2015) in Frage.
- **Variation des Mediums**  
Da in dieser Arbeit nur das Hydrauliköl Nuto H68 behandelt wurde, würde sich eine Modellierung mit anderen Hydraulikölen oder Gasen anbieten.
- **Validierung durch Vergleich mit realem System**  
Um herauszufinden, ob die Modelle die realen Bedingungen in einer Pumpe darstellen, ist eine Versuchsreihe an realen Pumpen als Vergleich denkbar.