

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA)  
Fachgebiet Fluidsystemdynamik  
Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen

---

Bachelorarbeit zum Thema

## **Numerische Simulation der Wärmeübertragung in einem ölgetauchten Getriebe mit dem VoF-Modell**

vorgelegt von

**Felix Sträubig**  
Matrikelnr. 347288

Berlin, den 7. Juli 2016

Studiengang	Physikalische Ingenieurwissenschaft
Gutachter	Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen
Betreuer	M. Sc. Raja Abou Ackl (Technische Universität Berlin) M. Eng. Matthias Voß (Technische Universität Berlin) Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin Software GmbH)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	1
1.3 Grundlagen der Zahnradgetriebe . . . . .	2
1.4 Grundlagen der Schmierung . . . . .	4
1.5 Stand der Technik . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1 Mathematische Modellierung der Strömungsmechanik . . . . .	8
2.2 Turbulenzmodellierung . . . . .	10
2.3 Strömungssimulation . . . . .	13
2.3.1 Diskretisierung . . . . .	13
2.3.2 Lösung . . . . .	17
2.3.3 Fehlertypen . . . . .	18
2.3.4 Arbeitsablauf . . . . .	19
2.4 Mehrphasenströmungen . . . . .	20
2.4.1 Mehrphasenmodelle für CFD-Simulationen . . . . .	20
2.4.2 Freie Oberflächenmodellierung . . . . .	20
2.4.3 Volume-of-Fluid-Modell . . . . .	21
2.5 Planschverluste . . . . .	22
2.6 Boxplots . . . . .	23
<b>3 Simulation des Stirnradgetriebes</b>	<b>24</b>
3.1 Geometrie . . . . .	24
3.1.1 2D-Modell . . . . .	25
3.1.2 3D-Modell . . . . .	25
3.2 Vernetzung . . . . .	25
3.2.1 Vernetzung der Rotoren . . . . .	26
3.2.2 Vernetzung des Gehäuses . . . . .	27
3.3 Pre-Processing . . . . .	29
3.3.1 Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .	29
3.3.2 Lösereinstellungen . . . . .	30
3.3.3 Drehung der Zahnräder . . . . .	31

3.4	Diskretisierung . . . . .	32
3.4.1	Gitterstudie . . . . .	32
3.4.2	Realisierbarkeit der Wärmeübertragung . . . . .	35
3.4.3	Winkelschrittstudie . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>41</b>
4.1	Auswertung der 2D-Simulationen . . . . .	41
4.1.1	Einfluss des nahen Interfaces . . . . .	42
4.1.2	Langsames Andrehen des Zahnrads . . . . .	43
4.1.3	Auswertung der Getriebesimulation . . . . .	45
4.2	Auswertung der 3D Simulationen . . . . .	48
4.2.1	Variation der Drehzahl . . . . .	48
4.2.2	Variation der dynamischen Viskosität . . . . .	52
4.2.3	Variation des Ölstands . . . . .	54
4.3	Vergleich zwischen 2D- und 3D-Modell . . . . .	56
4.4	Konvergenz . . . . .	58
4.5	Einfluss des VoF-Modells . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>65</b>
	<b>Literatur</b>	<b>67</b>

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurde untersucht, inwiefern sich die Strömung innerhalb der Getriebebox eines mit Öl geschmierten Stirnradgetriebes mit dem VoF-Modell unter ANSYS CFX simulieren lässt. Dafür wurden Berechnungsgitter mit der Vernetzungssoftware TwinMesh erzeugt.

Im ersten Kapitel wurde die Aufgabenstellung erläutert und auf Zahnradgetriebe sowie auf die Notwendigkeit der Schmierung eingegangen. Außerdem wurde der aktuelle Stand der Technik bezüglich Getriebesimulationen skizziert.

Die zum Verständnis nötigen Grundlagen wurden im zweiten Kapitel vorgestellt. Hierbei wurde auf das mathematische Modell der Strömungsmechanik eingegangen. Zudem wurde ein Einblick in die Turbulenzmodellierung und Strömungssimulation gegeben. Im Anschluss daran wurde kurz auf Planschverluste von Zahnradgetrieben eingegangen.

Die Durchführung der Simulation wurde im dritten Kapitel beschrieben. Zu Beginn wurde die Geometrie des Getriebes vorgestellt und daraus ein 2D- und ein 3D-Modell erstellt. Es folgte die Vernetzung der Zahnräder mit TwinMesh sowie die Vernetzung des Gehäuses mit ANSYS ICEM CFD. Anschließend wurde das Pre-Processing mit ANSYS CFX beschrieben. Im Weiteren wurde durch eine Gitterstudie und eine Winkelschrittstudie an einem 2D-Modell eine geeignete räumliche und zeitliche Diskretisierung ermittelt. Dabei wurde deutlich, dass sich die korrekte Auflösung des Wärmeflusses aufgrund der erforderlichen Feinheit der Netze in dieser Bachelorarbeit nicht realisieren ließ. Auf diesem Grund wurde in nachfolgenden Simulationen auf die Modellierung des Wärmeübergangs verzichtet. Da die korrekte Simulation der Strömung eine Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Berechnung der Wärmeübertragung ist, wurde weiter daran gearbeitet, plausible Ergebnisse zu erzeugen.

Bei allen bisherigen 2D-Simulationen trat der fragwürdige Effekt auf, dass das Öl sich erst sehr spät aus den Zahnzwischenräumen löste und nicht wie erwartet sofort seitlich weggeschleudert wurde. Darum wurden im vierten Kapitel weitere Untersuchungen angestellt, um mögliche Modellfehler als Auslöser dieses Effekts auszuschließen. Dabei stellte sich jedoch nur die 2D-Modellannahme als möglicher Auslöser dieses Effekts heraus.

Aus diesem Grund wurden zum Vergleich 3D-Simulationen angefertigt. Drei verschiedene Drehzahlen wurden untersucht. Alle Simulationen verhielten sich augenscheinlich plausibel, da der zuvor beschriebene Effekt nicht auftrat und das Öl je nach Drehzahl unterschiedlich stark fortgeschleudert wurde. Erwartungsgemäß führten hohe Drehzahlen auch zu hohen Planschverlusten. Es stellte sich außerdem heraus, dass die Konvergenz der Lösung bei einer Ritzeldrehzahl von 150 U/min am besten ist. Bei der höchsten Drehzahl treten zudem vereinzelt numerische Artefakte auf.

Es folgten zwei weitere Simulationen mit einer Drehzahl von 150 U/min, bei denen die dynamische Viskosität in einem Fall halbiert und im anderen Fall verdoppelt wurde. Eine höhere Viskosität führte erwartungsgemäß zu großen Reibungsverlusten, bewirkte jedoch auch eine Minderung des Drehmoments durch Druckunterschiede.

Außerdem wurden zwei Simulationen mit einem geringeren Ölstand für die Ritzeldrehzahlen von 150 U/min und 520,2 U/min durchgeführt. Es zeigte sich dabei, dass bei niedrigerer Füllhöhe die Verluste erheblich gemindert werden.

Mit dieser Arbeit konnte erstmalig gezeigt werden, dass Getriebesimulationen in ANSYS CFX unter Verwendung von mit TwinMesh erzeugten Berechnungsgittern möglich sind. In Hinblick auf die Konvergenz der Lösungen sind jedoch Verbesserungen nötig. Es konnte gezeigt werden, dass mit 2D-Simulationen keine plausiblen Ergebnisse generiert werden können. Die durchgeführten Simulationen am 3D-Modell scheinen allerdings glaubwürdige Ergebnisse zu liefern. Dies könnte jedoch nur mit experimentellen Daten bestätigt werden, die bisher nicht vorliegen. Die Simulation der Wärmeübertragung am Getriebe stellt noch immer ein Problem dar, weil eine sehr viel feinere Diskretisierung hierfür erforderlich wäre. Sofern die Simulation der Strömung am Getriebe realitätsnah ist, wäre hiermit jedoch ein erster Schritt zur Simulation der Wärmeübertragung getan.

Weitere Arbeiten zu dieser Thematik könnten an folgende Punkten anknüpfen:

- Es könnte daran gearbeitet werden, durch Modelländerungen die Konvergenz der Lösung zu verbessern.
- Mit dem Vergleich der numerisch erzeugten Ergebnisse mit experimentellen Daten könnte die Realitätsnähe der Getriebesimulationen beurteilt werden.
- Möglicherweise könnten mit Massen- oder Impulsquellen 2D-Simulationen so beeinflusst werden, dass die beschriebenen 2D-Effekte nicht auftreten. Dann könnten mit 2D-Modellen eventuell Aussagen über die Größe der Planschverluste gemacht werden.
- Die Simulation der Wärmeübertragung mit einer feinen Diskretisierung wäre unter hohem Zeitaufwand oder auf einem Großrechner denkbar.
- Die Stoffeigenschaften der Medien könnten realitätsnäher modelliert werden. Denkbar wäre eine temperaturabhängige Viskosität des Öls oder die Modellierung der Luft als ideales Gas.
- Es könnte eine genauere Untersuchung des Ölfilms an den Zahnrädern erfolgen und in diesem Zuge die Oberflächenspannung des Öls modelliert werden.