

Fachbereich II Mathematik - Physik - Chemie

Masterarbeit

von

Sebastian Eller, Dipl.-Ing.

zur Erlangung
des akademischen Grades
Master of Engineering (M.Eng.)

im Master-Fernstudiengang
Computational Engineering

Thema:

**Analyse des Strömungsverhaltens bei der
Förderung nichtnewtonscher Fluide in
Exzentrerschneckenpumpen mittels
CFD-Simulationen**

Betreuer: Dr. Andreas Spille
Gutachterin: Prof. Dr. habil. Anja Paschedag
Eingereicht: 25. Februar 2022

Abstract

Titel der Masterarbeit: „Analyse des Strömungsverhaltens bei der Förderung nicht-newtonscher Fluide in Exzentrerschneckenpumpen mittels CFD-Simulationen“

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse des Strömungsverhaltens bei der Förderung nichtnewtonscher Fluide in Exzentrerschneckenpumpen mittels CFD-Simulationen und die Herausarbeitung der Unterschiede zum newtonschen Verhalten.

Zur Bearbeitung der Zielstellung wurden Modellfluide erstellt, die den kompletten Bereich zwischen newtonschem und nichtnewtonschem Fluid stufenweise abdecken können und in einer Sensitivitätsanalyse anhand der planaren Couette- und Poiseuille-Strömung verwendet wurden, um die Effekte des nichtnewtonschen Verhaltens herauszuarbeiten. Weiterhin wurde das nichtnewtonsche Verhalten durch Simulationen anhand der kompletten Pumpengeometrie analysiert und dem newtonschen Verhalten gegenübergestellt.

Die Untersuchungen zeigen für die nichtnewtonschen Fluide einen ausgeprägten Einfluss auf den Widerstand gegen scher- und druckgetriebene Belastung, den Übergang vom laminaren zum turbulenten Bereich, die Geschwindigkeitsprofile und die Temperaturerhöhungen durch viskose Dissipation. In der Exzentrerschneckenpumpe resultiert ein starker Einfluss auf Ergebnisgrößen wie den Massenstrom, die Leistungsaufnahme der Pumpe und die Temperaturerhöhung. Eine Parameterstudie zum Spaltmaß zeigt einen großen Einfluss der Spaltgröße auf den Massenstrom.

Title of the Master Thesis: „Analysis of the flow behavior of non-Newtonian fluids in eccentric screw pumps using CFD simulations“

The aim of the present work is the analysis of the flow behavior of non-Newtonian fluids in eccentric screw pumps by means of CFD simulations and the elaboration of the differences to the Newtonian behavior.

To address the objective, model fluids were created that can gradually cover the entire range between Newtonian and non-Newtonian fluids and which were used in a sensitivity analysis based on the planar Couette and Poiseuille flows to work out the effects of non-Newtonian behavior. Furthermore, the non-Newtonian behavior was analyzed by simulations based on the complete pump geometry and was compared with the Newtonian behavior.

For non-Newtonian fluids, the investigations show a pronounced influence on the resistance to shear- and pressure-driven loads, the transition from the laminar to the turbulent region, the velocity profiles and the temperature increases due to viscous dissipation. In the eccentric screw pump, this results in a strong influence on outcome variables such as mass flow rate, pump power consumption, and temperature increase. A parameter study of the gap dimension shows a strong influence of the gap size on the mass flow.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	v
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielstellung	1
1.3. Methodik	2
2. Exzentrerschneckenpumpen	5
2.1. Aufbau und Funktionsweise	5
2.2. Technische Parameter und Rahmenbedingungen	7
I. Theoretischer Teil	9
3. Numerische Strömungssimulation	11
3.1. Strömungsmechanische Grundgleichungen	12
3.1.1. Erhaltungsgleichungen	12
3.1.2. Zusätzlich benötigte Gleichungen und Größen	16
3.2. Turbulenzmodelle	18
3.2.1. Mittelung der Erhaltungsgleichungen	18
3.2.2. Wirbelviskositätsmodelle	20
3.2.2.1. Standard k - ϵ -Modell	22
3.2.2.2. Wilcox k - ω -Modell	24
3.2.2.3. SST-Modell	25
3.3. Diskretisierung	26
3.3.1. Die allgemeine Transportgleichung	26
3.3.2. Die Finite-Volumen-Methode	27
3.3.3. Räumliche Diskretisierung	28
3.3.4. Zeitliche Diskretisierung	31
3.4. Lösungsverfahren	32
3.4.1. Linearisierung	33
3.4.2. Gleichungskopplung	33
3.4.3. Matrixlöser	34
3.5. Qualitätssicherung	36
3.5.1. Vorüberlegungen	36
3.5.2. Geometrie	37
3.5.3. Rechengitter	37
3.5.4. Physikalische Modelle und Randbedingungen	38
3.5.5. Numerische Fehler	38
3.5.5.1. Abbruchfehler	38
3.5.5.2. Diskretisierungsfehler	38

3.5.5.3.	Iterationsfehler	39
3.5.5.4.	Rundungsfehler	39
3.5.6.	Modellfehler	39
4.	Nichtnewtonsche Fluide	41
4.1.	Rheologische Grundlagen	41
4.1.1.	Dynamische und kinematische Viskosität	41
4.1.2.	Fließfunktion	43
4.2.	Zustandsabhängigkeit der Viskosität	46
4.2.1.	Temperaturabhängigkeit	46
4.2.2.	Druckabhängigkeit	47
4.3.	Einfluss auf die strömungsmechanischen Grundgleichungen	47
4.4.	Fluidmodelle für nichtnewtonsche Fluide	48
4.4.1.	Scherentzähende und scherverzähende Fluide	48
4.4.1.1.	Power-Law-Fluidmodell	48
4.4.1.2.	Sisko-Fluidmodell	50
4.4.1.3.	Prandtl-Eyring-Fluidmodell	50
4.4.1.4.	Sutterby-Fluidmodell	50
4.4.1.5.	Powell-Eyring-Fluidmodell	50
4.4.1.6.	Cross-Fluidmodell	51
4.4.1.7.	Ellis-Fluidmodell	51
4.4.1.8.	Reiner-Philippoff-Fluidmodell	51
4.4.1.9.	Yasuda-Fluidmodell	51
4.4.1.10.	Carreau-Fluidmodell	52
4.4.2.	Viskoplastische Fluide	53
4.4.2.1.	Bingham-Fluidmodell	53
4.4.2.2.	Modifiziertes Bingham-Fluidmodell	54
4.4.2.3.	Herschel-Bulkley-Fluidmodell	54
4.4.2.4.	Modifiziertes Herschel-Bulkley-Fluidmodell	55
5.	Strömungsgrundformen	57
5.1.	Planare Couette-Strömung	58
5.2.	Planare Poiseuille-Strömung	58
5.3.	Planare Couette-Poiseuille-Strömung	59
II.	Praktischer Teil	61
6.	Verwendete Software	63
6.1.	Ansys CFX	63
6.2.	TwinMesh™	64
7.	Modellierung	67
7.1.	Fluidmodelle für reale nichtnewtonsche Fluide	67
7.1.1.	Scherentzähendes Fluid	67
7.1.2.	Scherverzähendes Fluid	69
7.1.3.	Viskoplastisches Fluid	73
7.2.	Parametrierbare Modellfluide	74
7.2.1.	Methodik für das Herschel-Bulkley-Fluidmodell	75

7.2.2.	Methodik für das Power-Law-Fluidmodell	76
7.2.3.	Scherentzähende Modellfluide	77
7.2.4.	Scherverzähende Modellfluide	77
7.2.5.	Viskoplastische Modellfluide	79
7.3.	Strömungsbereiche in der Exzentrerschneckenpumpe	79
7.3.1.	Komplette Pumpengeometrie mit TwinMesh™	79
7.3.2.	Strömungsgrundformen	80
7.3.2.1.	Planare Couette-Strömung	80
7.3.2.2.	Planare Poiseuille-Strömung	80
8.	Simulation nichtnewtonscher Fluide in der Exzentrerschneckenpumpe	81
8.1.	Sensitivitätsanalyse anhand der Modellfluide für die Strömungsgrundformen	82
8.1.1.	Modellierung in Ansys CFX	84
8.1.1.1.	Geometrie und Vernetzung	84
8.1.1.2.	Randbedingungen und „Interfaces“	85
8.1.1.3.	Modelle	86
8.1.1.4.	Ergebnisauswertung	87
8.1.1.5.	Konvergenzkontrolle	87
8.1.1.6.	Verifikation und Gitterstudie	89
8.1.1.7.	Automatisierung der Simulationsdurchläufe	92
8.1.2.	Ergebnisse für die scherentzähenden Modellfluide	93
8.1.2.1.	Planare Couette-Strömung	93
8.1.2.2.	Planare Poiseuille-Strömung	97
8.1.3.	Ergebnisse für die scherverzähenden Modellfluide	101
8.1.3.1.	Planare Couette-Strömung	101
8.1.3.2.	Planare Poiseuille-Strömung	104
8.1.4.	Ergebnisse für die viskoplastischen Modellfluide	106
8.1.4.1.	Planare Couette-Strömung	106
8.1.4.2.	Planare Poiseuille-Strömung	108
8.2.	Simulation mit realen nichtnewtonschen Fluiden in der kompletten Pumpengeometrie	111
8.2.1.	Modellierung in TwinMesh™ und Ansys CFX	112
8.2.1.1.	Geometrie und Vernetzung in TwinMesh™	112
8.2.1.2.	Randbedingungen und „Interfaces“	117
8.2.1.3.	Modelle	119
8.2.1.4.	Ergebnisauswertung	120
8.2.1.5.	Konvergenzkontrolle	121
8.2.1.6.	Gitterstudie	124
8.2.2.	Ergebnisse für das scherentzähende Fluid	126
8.2.3.	Ergebnisse für das scherverzähende Fluid	130
8.2.4.	Ergebnisse für das viskoplastische Fluid	134
8.2.5.	Parameterstudie zum Spaltmaß anhand des scherentzähenden Fluids	138
9.	Ergebniszusammenfassung und Diskussion	141
10.	Zusammenfassung und Ausblick	145

A. Fluidmodelldaten für reale Fluide	149
B. Sensitivitätsanalyse anhand der Modellfluide für die Strömungsgrundformen	159
B.1. Konvergenzkontrolle	159
B.2. Automatisierung der Simulationsläufe	159
B.3. Ergebnisauswertung	159
B.4. Gitterstudie	159
C. Simulation mit realen nichtnewtonschen Fluiden in der kompletten Pum- pengeometrie	165
C.1. Vernetzung in TwinMesh™	165
C.2. Ergebnismonitoring im Solver-Manager	166
C.3. Geschwindigkeitsprofile des viskoplastischen Fluids im Arbeitsraum und Spalt	173
Literatur	175

10. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das nichtnewtonsche Verhalten von scherentzähenden, scher verzähenden und viskoplastischen Fluiden aus der Lebensmittelindustrie in der Exzentrerschneckenpumpe mittels CFD-Simulationen analysiert und mit dem newtonschen Verhalten verglichen. Dazu wurden in einem ersten Schritt über selbst entwickelte Exceltools Modellfluide erstellt, die den kompletten Bereich zwischen newtonschem und nichtnewtonschem, realen Fluid stufenweise abdecken können. Diese Modellfluide wurden in einer Sensitivitätsanalyse anhand der in Exzentrerschneckenpumpen vorkommenden schergetriebenen Couette-Strömung und druckgetriebenen Poiseuille-Strömung in zweidimensionalen, stationären Simulationen verwendet. Im zweiten Schritt wurde das nichtnewtonsche Verhalten durch dreidimensionale, transiente Simulationen anhand der kompletten Pumpengeometrie analysiert und dem newtonschen Verhalten gegenübergestellt.

Die Untersuchungen zeigen für die nichtnewtonschen Fluide teilweise deutliche Änderungen im Strömungsverhalten. Die **Sensitivitätsanalyse** stellt heraus, dass das nichtnewtonsche Verhalten einen ausgeprägten Einfluss auf den Widerstand gegen scher- und druckgetriebene Belastung und auf den Übergang vom laminaren zum turbulenten Bereich hat. Weiterhin können sich, abhängig von der scher- und druckgetriebenen Belastung, gegenüber dem newtonschen Verhalten andere Geschwindigkeitsprofile ergeben, die somit auch die Scherratenbereiche ändern. Eine kurze Abschätzung anhand der Couette-Strömung des scher verzähenden Fluids zeigt, dass beim nichtnewtonschen Verhalten große Temperaturerhöhungen durch viskose Dissipation auftreten können und die Temperaturabhängigkeit der Viskosität in diesen Fällen von Bedeutung ist. Die in der Sensitivitätsanalyse gemachten Beobachtungen konnten auch in den Ergebnissen der **Simulationen anhand der kompletten Pumpengeometrie** festgestellt werden. Das nichtnewtonsche Verhalten kann gegenüber dem newtonschen Verhalten, abhängig vom betrachteten Fluid, einen sehr starken Einfluss auf Ergebnisgrößen wie den Massenstrom, die Leistungsaufnahme der Pumpe und die Temperaturerhöhung durch viskose Dissipation haben. Die für unterschiedliche Querschnitte gezeigten Plots stellen die teilweise deutlichen Unterschiede zwischen nichtnewtonschem und newtonschem Verhalten heraus. Dabei können die in der Sensitivitätsanalyse ermittelten Geschwindigkeitsprofile in der kompletten Pumpengeometrie qualitativ wiedergefunden werden. In den Geschwindigkeitsprofilen der Exzentrerschneckenpumpe ist weiterhin eine kombinierte scher- und druckgetriebene Strömung (Couette-Poiseuille-Strömung) erkennbar, die örtlich variierende Anteile von scher- und druckgetriebener Ausprägung aufweist. Die Parameterstudie zum Spaltmaß zeigt einen großen Einfluss der Spaltgröße auf den Massenstrom.

Um den sehr umfangreichen Simulationsaufwand in einem durchführbaren Rahmen zu halten, wurden in dieser Arbeit Vereinfachungen vorgenommen. Zukünftige Arbeiten können an die erstellten Modellierungen und Simulationen anknüpfen und folgende Themen detaillierter berücksichtigen und analysieren:

Fluidmodelle für nichtnewtonsche Fluide

- genauere Abbildung der Gültigkeitsgrenzen der Fluidmodelle durch Zugang zu nicht-öffentlichen Papers oder eigenen Messungen:
 - gültige Belastungsgrenzen unter Angabe des Scherratenbereichs
 - untere und obere Grenzviskositäten

Sensitivitätsanalyse anhand der Modellfluide

- Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität
- thermische Simulationen zur Analyse des Einflusses der Temperaturabhängigkeit der Viskosität und Temperaturerhöhung durch viskose Dissipation
- Analyse der kombinierten scher- und druckgetriebenen Strömung (Couette-Poiseuille-Strömung)
- Verfeinerung des modellierten Bereichs durch gekrümmte Wände und Abbildung des Spalts (Verjüngung vom Arbeitsraum zum Spalt)
- weitere Steigerung der Ergebnisgenauigkeit durch Erhöhung der Vorgabe der minimalen Iterationen

Simulationen anhand der kompletten Pumpengeometrie

- Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität
- weitere Steigerung der Ergebnisgenauigkeit (Limitierung durch Studentenversion von Ansys CFX) durch
 - Abbildung kleinerer Winkelschritte
 - Erhöhung der maximalen „Coefficient Loops“
 - Verfeinerung der Vernetzung, insbesondere im Bereich des Spalts
- Analyse des Einflusses bei Variation der Randbedingungen der Exzentrerschneckenpumpe (Druckverhältnisse, Drehzahlen, Anzahl der Windungen, Länge der Pumpe, etc.)
- Durchführung der Parameterstudie zum Spaltmaß zusätzlich zum scherentzähenden Fluid auch für das scherverzähende und viskoplastische Fluid