

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr. -Ing. Georg Wachtmeister

**Ladungswechselsimulation eines opt. zugänglichen Groß-DF-Motors**

Bachelorarbeit

Verfasser: Konstantin Milchev

Matrikel-Nr.: 03654889

Studienrichtung: Ingenieurwissenschaften

Betreuer: Stephan Karmann, M. Sc.

Ausgabe am: 24. Oktober 2016

Abgabe am: 01. April 2017

**Aufgabenstellung**

**Bachelorarbeit**

**Ladungswechselsimulation eines opt. zugänglichen Groß-DF-Motors**

Im maritimen Anwendungsgebiet existieren zunehmend strengere Abgasgrenzwerte, denen die Entwicklung neuer Brennverfahren begegnen muss. In einem EU-Forschungsprojekt soll ein optisch zugänglicher Dual Fuel Groß- Einzylinder Forschungsmotor aufgebaut werden. Mit diesem wird es möglich sein realitätsnah die Zylinderfüllung im Betrieb zu beobachten und so das Brennverfahren zu optimieren. Unter den gegebenen Randbedingungen soll der Ladungswechsel des optischen Motors mit AVL Fire simuliert werden.

Zum Arbeitsumfang dieser Arbeit gehören:

* + Einarbeitung in die Thematik und in die bestehenden Konzepte
  + Einarbeitung in ein kommerzielles CFD Tool
  + Aufbau der CFD Simulation in AVL Fire
  + Optinal Berechnung des Ladungswechsels für unterschiedliche Kolbengeometrien
  + Dokumentation der Ergebnisse

Die Arbeit wird im Motorenlabor des Lehrstuhls in der Schragenhofstraße oder an der Maschinenbaufakultät in Garching durchgeführt.

Die eingereichte Arbeit verbleibt als Prüfungsunterlage im Eigentum des Lehrstuhls und wird Dritten nicht zugänglich gemacht.

Bearbeitungszeitraum: 24. Oktober 2016 – 24. April 2017

München, den 20. April 2017

M. Sc. Stephan Karmann Konstantin Milchev

**Inhaltsverzeichnis**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| [**Bildverzeichnis**](#page3) | | | **ii** |
| [**Tabellenverzeichnis**](#page4) | | | **iii** |
| [**Nomenklatur**](#page5) | | | **iv** |
| **1** | **Einleitung** | | **1** |
|  | 1.1 | Ausgangssituation und Motivation . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 2 |
|  | [1.2](#page11) | [Aufbau der Arbeit](#page11) . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 2 |
| **2** | **Grundlagen der Strömungsmechanik** | | **3** |

2.1 Einleitung in die Fluidmechanik

2.1.1 Systemdefinitionen

2.1.2 Zustandsgrößen

2.1.3 Druck

2.1.4 Temperatur

2.1.5 Oberflächenspannung

2.1.6 Viskosität

2.2 Definitionen der Strömungsmechanik

2.2.1 Fluid

2.2.2 Kontinuum

2.2.3 Kompressibilität

2.2.4 Ideales Gas

2.2.5 Newtonsches Fluid

2.2.6 Kontrollvolumen

2.2.7 Hypothese von Stokes

2.3 Grundgleichungen

2.3.1 Massenerhaltung

2.3.2 Impulserhaltung

2.3.3 Energieerhaltung

2.3.4 Die Navier-Stokes-Gleichungen

2.4 Grundlagen der turbulenten Strömungen

2.4.1 Definitionen

2.4.2 Reynolds gemittelte Transportgleichung

2.4.3 Modellierung der Turbulenz

2.4.3.1 k-ε-Modell

2.4.3.2 k-ζ-f-Modell

2.4.3.3 Finite-Volumen-Methode

|  |  |
| --- | --- |
| **3 Grundlagen der CFD** | **6** |
| 3.1 Numerische Grundlagen  3.2 Diskretisierung und Interpolation    3.3 Forderungen an CFD  3.3.1 Konsistenz  3.3.2 Stabilität  3.3.3 Konvergenz    3.4 AVL Fire – Grundlagen und Bewertung    **4 Grundlagen der Kolbenmuldengeometrie**  4.1 Drall  4.2  4.3    **5 Aufbau der Simulationsmodelle**  **(Modellerstellung)**  5.1 Oberflächennetzerstellung    5.2 Volumennetzerstellung  5.3Simulationseinstellung  **Generierung der Netze**  **6 Auswertung der Simulation**  **7 Verifikation**  **8 Vergleich der Geometrievarianten** |  |
| **Literaturverzeichnis** | **7** |
| [**Anhang A**](#page16) | **8** |
| [**Anhang B**](#page17) | **9** |

**Bildverzeichnis**

**Tabellenverzeichnis**

2.



**Nomenklatur**

**Abkürzungen Bedeutung**

°KW Grad Kurbelwinkel

2D zweidimensional

3D dreidimensional

AS Auslass schließt

AÖ Auslass öffnet

CAD Computer Aided Design

CFD Computational Fluid Dynamics

ES Einlass schließt

EÖ Einlass öffnet

KV Kontrollvolumen

LVK Lehrstuhl für Verbrennungsmaschinen

maxF maximale Füllung

NSG Navier-Stokes-Gleichung

OT oberer Totpunkt

RANS Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichung

RB Randbedingung

THG Treibhausgas

TKE turbulente kinetische Energie

UT untere Totpunkt

Vec vektorielle Größe

ZOT oberer Totpunkt, an dem die Zündung statt findet

Symbolverzeichnis

**Symbolverzeichnis**

***Symbol Einheit Bezeichnung***

A m2 Fläche, Oberfläche

a m/s2 Beschleunigung

a m/s Schallgeschwindigkeit

cv J/kg**·**K Spezifische Wärmekapazität bei

konstantem Volumen

cp  J/kg**·**K Spezifische Wärmekapazität bei

konstantem Druck

dx,dy,dz M Seitenfläche des Volumenelements dV

e J Spezifische innere Energie

ε m2/s3 Turbulente Dissipation

g m/s2 Erdbeschleunigung

h J/kg Spezifische Enthalpie

I - Einheitsmatrix

i, j, k - Netzpunktindex in die 3 Raumrichtungen

k m2/s2 Turbulente kinetische Energie

λ W/m**·**K Wärmekoeffizient

Ma - Machzahl

m kg Masse

ṁ kg/s Massenstrom

NRB - Numerische Randbedingungen

n - Normalenrichtung

μ Pa**·**s Dynamische Viskosität

ω m2/s3  Turbulente Frequenz

PRB - Physikalische Randbedingungen

p Pa Druck

ϕ - Potential

Q̇ W Wärmestrom

q̇ W/kg Spezifischer Wärmestrom

R J/kg**·**K Gaskonstante

ρ kg/m3 Dichte

S J/K Entropie

T K Temperatur

t s Zeit

V, dV m3 Volumen, Volumenelement

Ẇ W Leistung

x, y, z m Kartesische Raumkoordinaten

ξ, ζ, η - Krummlinige Raumkoordinaten

n 1/min Drehzahl

l m Pleuellänge

–v–



Nomenklatur

**Griechische Symbole**

***Symbol Einheit Bezeichnung***

α 1/K Wärmeausdehnungskoeffizient

κ - Isentropenkoeffizien

λ - Schubstangenkoeffizient

φ ° Kurbelwinkel (°KW)

ψ - Durchflussfunktion

ω rad/s Winkelgeschwindigkeit

**Konstanten**

*Symbol Wert Bedeutung*

π 3,1415 Kreiszahl

R 8,314J/mol**·**K Universelle Gaskonstante

**Mathematische Symbole**

*Symbol Bedeutung*

x Skalar

v Vektor, Matrix

i  Partielle Ableitung

Nabla – Operator

Integral

Summe

**I** Einheitsmatrix

**Indizes**

*Symbol Bedeutung*

c kontinuierlich

d Dispers

i Indiziert

s Simuliert

–vi–



Nomenklatur

–vii–

**1 Einleitung**

Intensiv wachsende Bevölkerung der Erde, das Streben nach dem westlichen Lebensqualität (pro Kopf Energiebederf) und knappe Energieresourcen bedeuten, dass wir nicht ewig so leben können. Und wenn wir die exponentiell steigende globale Mitteltemperaturen, die völlig unklare Folge haben können, zusätzlich berücksichtigen, stellen wir fest, dass etwas geändert werden soll. Entweder sollen wir heftig sparen – keine Privatautos, keine Flugreisen, regelmäßige Stromaufälle, oder einfach Inovationen einführen und ohne Schuld, dass man die Umwelt beschädigt, weiterleben. Die erste Wahl bedeutet ein totaller Finanzkollaps für die Welt, weil wirtschaftlich gesehen, sparen bedeutet wenigere Klimaschaden, aber auch weniger Konsum, weniger Konsum bedeutet Industrieniedergang und das führt zum Jobverluste und Gehaltsenkung, was zusätzliche schwere Folgen für die Konsum hat. Oder kurz gesagt ein Teufelskreis mit grausaume Konsequenzen einschließlich soziale Spannungen, niedrige Lebensqualität,Technologiniedergang und Wettbewerbsfähigkeitsverluste. Es ist auch kein Zufall, dass kein Politiker auf der Erde solches Suizid getan hat, weil es nämlich extrem ueffektiv ist.

Die zweite Wahl, die hohe Klimaschonung und Wirtschaftlichkeit beide erfüllt, ist was wir uns in dieser Bachelorarbeit genauer anschauen werden, nämlich Innovation und Optimierung. Diesemotoren sind seit Jahrzehnte durch ihre Effizienz und Wirkungsgrad geprägt aber sie besitzen auch eine Reihe von Nachteilen - ..................

Das sind extrem giftige Stoffe, die langfristige Effekte wie Krebs, Asthma und niedrigere Lebenserwartung haben. Das Hauptziel, diese Stoffe auf niedrigem Niveau zu halten, ist einer der wichtigsten Ziele der heutigen Forschung. Das nächste Ziel nebenbei ist auch die Erhöhung der mechnischen Wirkungsgrad und Minimirung der thermische Verluste. Einer der letzten Trends in der heutigen Entwicklung ist die Nutzung von alternativen Kraftstoffen wie zum Beispiel Methan, Gas oder sogar Wasserstoff und dies hat zahlreiche Vorteile wie zum Beispiel eine stabilere und saubere Verbrennung, drastische Senkung der Emissionen und niedrige Kosten. Die Mengen von Erdgas weltweit sind deutlich größer im Unterschied zum Erdöl und die werden reichen für mindestens noch 100 Jahre aus, was für die Menschheit eine gute Alternative ist bis neuere nachhaltige Energiequellen gefunden und ausgebaut werden können. Zudem kommen die Innovationen im Bereich der Methan Synthese, die ermöglichen uns Methan direkt aus Kohlendioxid, Wasser und Energie herzustellen. Auf dieser Weise werden diese Kraftstoffart im engsten Sinne völlig nachhaltig. Wir sollen als Ingenieure einen effektiven

.



1 Einleitung

und Weg finden, der die gespeicherte chemische Energie in einer anderen Art von Energie umwandeln

**1.1 Motivation**

Duell Fuel Motoren sind nicht etwas neues, seit langer Zeit wurde mit verschiedenen Kraftstoffe experimentiert. Duell Fuel Motoren bieten die Vorteile beider Kraftstoffarten und liefern die beste Ergebnisse unter den verschiedenen Bedingungen und Belastugszustände. Mit der immer strengeren Gesetzgebung weltweit soll man erstens

**1.2 Aufbau der Arbeit**

–2–

**2 Grundlagen der**

**Strömungsmechanik**

**2.1 Einleitung in die Fluidmechanik**

2.1.1 Systemdefinition

Systeme, die in der Welt existieren, verfügen über einige wichtige Sachen – Systemgrenze (Scope), Kontrollvolumen (control volume), Schnittstelle (Interface), Systemumgebung (Kontex). Ein System in de Strömungslehre definiert sich als ein Fluid, das durch eine Fläche, die Systemgrenze, eingeschlossen ist. Dadurch in der Fluidmechanik sind die Systemgrenze und das Kontrollvolumen besonders relevant und von denen hängt maßgeblich ab, was für Eigenschaften ein System besitzt. Wenn ein Transfer von Masse über die Systemgrenze nicht stattfindet, ist das System *geschlossen*, sonst ist das System *geöffnet*. Das bedeutet, dass in einem geschlossenen System die Masse immer konstant ist (konstante Flüssigkeitsmasse). Bei geöffneten Systeme, im Gegensatz dazu, könnte die Flüssigkeitsmasse entweder konstant oder veränderlich sein.

2.1.2 Dichte

Zuerst betrachten wir ein infinitesimaler Punkt in einem Fluid. Die Dichte wurde definiert als

ρ =

Falls das Fluid homogen ist und nur in einer Phase sich befindet, dann können wir vereinfacht direkt scheiben:

ρ =

:

2.1.3 Zustandsgrößen

Verschiedene Fluide besitzen verschiedene Eigenschaften. Um die Eigenschaften quantitativ zu beschreiben, braucht man Zustandsgrößen. Zustandsgrößen, die massen- bzw. volumenabhängig sind, werden als extensive, jene auf Masseneinheit bezogene als intensive Zustandsgrößen bezeichnet.

2.1.3.1 Spezifisches Volumen

Das *spezifische Volumen* wird als den Kehrwert der Dichte definiert:

v = =

Wir haben bisher die extensive Zustandsgrößen vorgestellt – die Masse, das Volumen. Die intensive Zustandsgrößen sind das spezifische Volumen, die Temperatur, der Druck, die Enthalpie und der Entropie. Besonders wichtig sind die erste drei, da die einen wichtigen Zusammenhang haben:

*dv =* *dT +* ***·*** *dp*

Zudem sind die



2 Stand der Technik

2.1.2.1.1 Spezifisches Volumen der Flüssigkeiten

2.1.2.1.2 Spezifisches Volumen der Gase und Dämpfe

2.1.3 Druck

2.1.4 Temperatur

2.1.5 Oberflächenspannung

2.1.6 Viskosität

**2.2 Definition der Strömungsmechanik**

2.2.1 Fluid

2.2.2 Kontinuum

2.2.3 Ideales Gas

2.2.4 Newtonsches Fluid

2.2.5 Kontrollvolumen

2.2.6 Hypothese von Stokes

**2.3 Grundgleichungen**

2.3.1 Massenerhaltung

2.3.2 Impulserhaltung

2.3.3 Energieerhaltung

2.3.4 Die Navier-Stokes-Gleichung

–4–



2 Stand der Technik

–5–

**3 Grundlagen der CFD**

**Literaturverzeichnis**

1. Köhler, Eduard ; Flierl, Rudolf: *Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berech-nung und Auslegung des Hubkolbenmotors ; mit ... 23 Tabellen*. 6., erw. Aufl. Wiesba-den : Vieweg + Teubner, 2011 (Praxis). – ISBN 978–3–8348–1486–9

[2] Pope, Stephen B.; Turbulent flows, Cambridge University Press, 2000. –ISBN 0–521–59886–9

[3] Adams,N. A.; Skriptum Turbulente Strömungen, Lehrstuhl für Aerodynamik, Technische Universität München, Version SS2013

[4] von Böckh, Peter; Fluidmechanik, Springer Verlag, 3. erweiterte und ergänzte Auflage, 2013

[5] Naumann, Helmut; Handbuch Bauelemente der Optik, Hanser, 7. vollständig überbearbeitete und erweiterte Auflage, 2014, ISBN 978-3-446-42625-2

[6] Lecheler, Stefan; Numerische Strömungsberechnung, Springer Vieweg, 3. aktualisierte Auflage, ISBN 978-3-658-05200-3

[7]

**Anhang A**

**Anhang B**