

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Fakultät für Maschinenwesen

Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen  
der RWTH Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff

### **Seminararbeit**

Untersuchung der mehrphasigen Durchströmung einer Drossel mittels CFD

Bearbeiter:	B.Sc. Svetlana Faktorovich
Betreuender wiss. Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. Katharina Schrank
Fachgebiet:	Hydraulik, simulativ

Aachen, im Juli 2014

Die Arbeit ist nur für den internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen beim IFAS.  
Für den Inhalt wird keine Gewähr übernommen.

## **Aufgabenstellung**

Durch Verunreinigungen wie Luft und Wasser können sich in hydraulischen Systemen mehrphasige Strömungen ausbilden. Dies führt insbesondere in hydraulischen Widerständen zu einer deutlichen Veränderung des Durchflussverhaltens. Strömungssimulationen sind ein viel verwendetes Tool zur Berechnung und Visualisierung der Strömungsvorgänge, die allerdings für mehrphasige Problemstellungen bislang nur für Wasser ausreichend parametrisiert worden sind. Im Rahmen dieser Arbeit sollen anhand von vorhandenen Messergebnissen, die mehrphasigen Strömungsvorgänge simuliert und visualisiert werden.

## **Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Aachen, im Juli 2014

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>I</b>	<b>Formelzeichen .....</b>	<b>iii</b>
<b>II</b>	<b>Abkürzungen.....</b>	<b>vi</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>8</b>
2.1	Eigenschaften des Fluids.....	8
2.1.1	Stoffgrößen und Strömungseigenschaften eines Fluids.....	8
2.1.2	Zweiphasenströmung.....	10
2.1.3	Erhaltungsgesetze .....	10
2.2	Beschreibung hydraulischer Widerstände.....	11
2.3	Numerische Berechnungsverfahren .....	11
<b>3</b>	<b>Numerische Strömungssimulation .....</b>	<b>13</b>
3.1	CAD-Geometrie und Gittergenerierung.....	13
3.2	Anfangs- und Randbedingungen.....	14
3.2.1	Einphasenströmung .....	15
3.2.2	Zweiphasenströmung.....	15
3.3	Solvereinstellungen .....	15
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>17</b>
4.1	Netzgenauigkeit und Konvergenzverhalten .....	17
4.2	Einfluss verschiedener Einlassbedingungen auf die Gas-Flüssigkeits-Strömung .....	18
4.2.1	Einfluss des Massenstroms bei konstantem Luftvolumenanteil.....	18
4.2.2	Einfluss des Luftvolumenanteils bei konstantem Massenstrom.....	21
4.3	Vergleich der Simulation mit der analytischen Berechnung.....	24
4.4	Vergleich der Simulation mit dem Experiment .....	26
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>28</b>
<b>III</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>29</b>
<b>IV</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>30</b>
<b>V</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>31</b>
<b>VI</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>32</b>

## **I Formelzeichen**

---

$l$	Drossellänge	$[m]$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	$[J / kg / K]$
$d$	Drosseldurchmesser	$[m]$
$D$	Rohrdurchmesser	$[m]$
$L$	Rohrlänge	$[m]$
$m$	Masse	$[kg]$
$\dot{m}$	Massenstrom	$[kg / s]$
$m_G$	Gasmasse	$[kg]$
$m_L$	Masse der Flüssigkeit inklusive des in der Flüssigkeit gelösten Gases	$[kg]$
$n$	Stoffmenge	$[mol]$
$p_1$	Druck am Eingang des Rohrs	$[bar]$
$p_2$	Druck am Ausgang des Rohrs	$[bar]$
$\Delta p$	Druckverlust	$[bar]$
$Q$	Volumenstrom	$[m^3 / s]$
$r$	Drosselradius	$[m]$
$R$	Universelle Gaskonstante	$[J / mol / K]$
$T$	Temperatur	$[K]$
$V$	Volumen	$[m^3]$
$x$	Gasgehalt bezogen auf Masse	$[-]$
$\eta$	Dynamische Viskosität	$[Pa \cdot s]$
$\eta_{\text{Gemisch}}$	Gemischviskosität	$[Pa \cdot s]$
$\varphi$	Volumetrischer Gasgehalt	$[-]$
$\nu$	Kinematische Viskosität	$[m^2 / s]$
$\rho$	Dichte	$[kg / m^3]$

---

$\rho_G$	Dichte des Gases	$[kg/m^3]$
$\rho_{Gemisch}$	Gemischdichte	$[kg/m^3]$
$\rho_L$	Dichte der Flüssigkeit	$[kg/m^3]$
$\tau$	Schubspannung	$[N/m^2]$

## II Abkürzungen

CEL	CFX Expression Language
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
IFAS	Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen
NSG	Navier-Stokes-Gleichungen
PDGL	Partielle Differentialgleichungen

## 1 Einleitung

Die numerische Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics oder CFD) ist eine etablierte Verfahrensweise zur computergestützten Darstellung der Strömung in hydraulischen Bauteilen. Diese verfolgt das Ziel, das Verhalten der Strömungen detailliert abzubilden, sodass die Möglichkeit besteht, den Einsatz kostenaufwendiger Experimente zu minimieren. CFD Simulationen erlauben eine präzise Modellierung einer Fluidströmung mit den dazugehörigen physikalischen Komponenten.

In der Hydraulik wird zur Leistungsübertragung Hydrauliköl verwendet, welches häufig durch Fluide wie Luft und Wasser verunreinigt ist. Luft kann in gelöster Form oder als freie Luftblasen im Hydrauliköl vorkommen. Luftblasen können im Saugkanal einer Pumpe an undichten Stellen eingesaugt werden oder im Tank mitgerissen werden. Wasser kann beispielsweise als Regenwasser oder als Frostschutzmittel durch Risse in den Dichtungen in das System gelangen.

Durch die Querschnittsverengung in einem hydraulischen Widerstand steigt die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids. Danach fällt der statische Druck in der Strömung und die sich im Fluid befindlichen Luftblasen nehmen an Größe zu.

In dieser Arbeit sollen numerische Strömungssimulationen einer mehrphasigen Strömung durch einen hydraulischen Widerstand (Drossel) durchgeführt werden. Dabei soll der Zusammenhang zwischen dem Druckabfall über der Drossel und dem Volumenstrom für disperse Öl-Luft-Strömungen untersucht werden. Im ersten Schritt wird eine einphasige Ölströmung zur Bestimmung der optimalen Simulationsparameter abgebildet. Nachfolgend werden Zweiphasenströmungen, bestehend aus Hydrauliköl und ungelöster Luft simuliert. Der Vergleich der Ergebnisse der Simulationen mit der Drosselgleichung und den experimentellen Ergebnissen findet abschließend statt. Dabei werden die Ergebnisse diskutiert, analysiert und hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewertet.



## 2 Stand der Technik

### 2.1 Eigenschaften des Fluids

#### 2.1.1 Stoffgrößen und Strömungseigenschaften eines Fluids

Fluide werden im Allgemeinen in Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase unterteilt. Um eine ausreichende Beschreibung der Strömungsvorgänge für eine mathematische Modellierung zu erhalten, werden die Fluide anhand ihrer Stoffgrößen betrachtet.

##### Dichte

Die Dichte  $\rho$  ist eine Stoffgröße des Fluids unter der die auf das Volumen  $V$  bezogene Masse  $m$  verstanden wird:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Zur Bestimmung der Dichte eines Hydrauliköls kann eine empirische Modellfunktion nach Witt herangezogen werden (Gl. 2-2) /Wit74/.

$$\rho = \left( E_0 \cdot \left\langle 1 - \exp\left(-\frac{p-1}{E_1}\right) - E_2 \cdot (p-1) \right\rangle + D \right) \cdot t + \frac{\rho_0}{1 - C \cdot \log\left(\frac{B+p-1}{B}\right)} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Die Dichte  $\rho$  wird dabei in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , der Druck  $p$  in  $[\text{bar}]$  und die Temperatur  $t$  in  $[\text{°C}]$  angegeben.  $B$ ,  $C$  und  $D$  sind experimentell zu ermittelnde Konstanten.

##### Viskosität

Die Viskosität ist eine Stoffgröße, die die innere Reibung eines Fluids beschreibt und ist ein Maß für die Zähigkeit eines Fluids.

Der als dynamische Viskosität bezeichnete Faktor  $\eta$  gibt den Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der Schergeschwindigkeit an und hängt von der Art des Fluids ab (Gl. 2-3) /Sch04/.

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Dieser lineare Zusammenhang gilt für laminar strömende, newtonsche Fluide. Wird die dynamische Viskosität  $\eta$  auf die Dichte  $\rho$  des Fluids bezogen, resultiert daraus die kinematische Viskosität  $\nu$  (Gl. 2-4):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Analog zur Dichte kann eine empirische Funktion nach Witt zur Bestimmung der dynamischen Viskosität  $\eta$  in [cP] für Hydrauliköl verwendet werden (Gl. 2-5) /Wit74/:

$$\eta = \exp\left(\frac{a_0 - a_2 \cdot T}{a_1 + T}\right) \cdot \exp\left(\left\langle (a_3 + a_4 \cdot (p-1)) \cdot \exp\left(-\frac{T}{a_5 + a_6 \cdot (p-1)}\right) + (a_7 + a_8 \cdot (p-1)) \right\rangle \cdot (p-1)\right) \quad \text{Gl. 2-5}$$

### Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  oder die spezifische Wärme ist ein Maß für die Energiemenge  $\Delta Q$ , die benötigt wird, um ein Kilogramm eines Stoffes um ein Kelvin bei konstantem Druck zu erwärmen. Nach Witt kann die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur in [K] durch Gl. 2-6 erfolgen /Wit74/.

$$c_p = A_0 + A_1 \cdot T \quad \text{Gl. 2-6}$$

### Ideales Gasgesetz

Die Abhängigkeit zwischen dem Druck  $p$ , dem Volumen  $V$  und der Temperatur  $T$  für ein ideales Gas wird durch das ideale Gasgesetz (Gl. 2-7) beschrieben.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{Gl. 2-7}$$

Die Konstante  $R$  wird als universelle Gaskonstante bezeichnet und beträgt für Luft  $8,3144621 \frac{J}{mol \cdot K}$ ;  $n$  ist die Stoffmenge.

### 2.1.2 Zweiphasenströmung

Die Zusammensetzung eines Gas-Flüssig-Gemisches wird durch den Gasgehalt  $x$  angegeben, welcher als Verhältnis von ungelöster Gasmasse  $m_G$  zur Gesamtmasse  $m_G + m_L$  definiert ist (Gl. 2-8). Da in Hydraulikflüssigkeiten auch Gas gelöst werden kann, beinhaltet der Parameter  $m_L$  beinhaltet zusätzlich zur Masse der Flüssigkeit auch die Masse des gelösten Gases.

$$x = \frac{m_G}{m_G + m_L} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Der volumetrische Gasgehalt  $\varphi$  (Gl. 2-9) resultiert aus der Umrechnung über die entsprechenden Dichten.

$$\varphi = \frac{\frac{m_G}{\rho_G}}{\frac{m_G}{\rho_G} + \frac{m_L}{\rho_L}} \quad \text{Gl. 2-9}$$

Die homogene Gemischdichte und die dynamische Gemischviskosität für ein Öl-Luft-Gemisch sind definiert als /Gru97

$$\rho_{\text{gemisch}} = \left( \frac{x}{\rho_{\text{Luft}}} + \frac{1-x}{\rho_{\text{Öl}}} \right)^{-1} \quad \text{Gl. 2-10}$$

$$\eta_{\text{Gemisch}} = (1-\varphi) \cdot \eta_{\text{Öl}} + \varphi \cdot \eta_{\text{Luft}} \quad \text{Gl. 2-11}$$

### 2.1.3 Erhaltungsgesetze

Als Grundlage für die mathematische Modellierung der Strömungsvorgänge dienen die Erhaltungsgesetze für Masse, Impuls und Energie. Diese werden in Form von Gleichungen formuliert,

die zur Betrachtung und Darstellung der Strömungsvorgänge angewendet werden. Die Erhaltungsgleichungen werden in der Regel an einem infinitesimal kleinen Kontrollvolumen (in Integralform) oder einem Volumenelement (in Differentialform) formuliert /Lec09/.

Die physikalisch relevanten Strömungsgrößen des Fluids, wie zum Beispiel Geschwindigkeit, Dichte, Druck und Temperatur lassen sich als Funktionen der Zeit und des Wegs berechnen. Die Herleitungen der Erhaltungsgleichungen sind bei Schroeder und bei Lecheler zu finden /Sch04, Lec09/.

## 2.2 Beschreibung hydraulischer Widerstände

Die Drossel ist neben der Blende eine der häufigsten Formen hydraulischer Widerstände. Der Hauptunterschied zwischen Blenden und Drosseln liegt in dem Verhältnis zwischen der Widerstandslänge  $b$  und des Widerstandsdurchmessers  $d$ . Bei Drosseln beträgt dieses Verhältnis  $\frac{b}{d} > 1.5$ , bei Blenden ist  $\frac{b}{d} < 0.5$ . Das Intervall zwischen den beiden Verhältnissen ist nicht eindeutig definiert /Fas95/.

Beim Durchfließen der Drossel kommt es zu einem Druckverlust. Dieser entsteht durch die Reibung an den Wänden des Widerstands. Der Druckverlust ist abhängig vom Massen- bzw. Volumenstrom und kann zur Ermittlung dieser herangezogen werden. Dieser Zusammenhang wird durch das Hagen-Poiseulle-Gesetz für laminare Strömungen ( $Re < 2300$ ) beschrieben:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{2 \cdot \rho \cdot \nu \cdot l} \cdot \Delta p \quad \text{und} \quad \zeta = \frac{64}{Re} \quad \text{für} \quad Re < 2300 \quad \text{Gl. 2-12}$$

Dabei ist  $\Delta p$  die Druckdifferenz zwischen dem Anfang und dem Ende des Rohrs,  $\eta$  - die dynamische Viskosität des Fluids,  $r$  - der Radius der Drossel und  $l$  - die Länge der Drossel.

Der Durchfluss hängt stark von der Temperatur ab, da sich die Viskosität mit der Temperatur ändert /Mur05/.

## 2.3 Numerische Berechnungsverfahren

Strömungsmechanische Prozesse beruhen auf den physikalischen Bilanzgesetzen für Masse, Impuls und Energie (**Kapitel 2.1.3**). Die mathematische Modellierung solcher Prozesse basiert auf den Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik, die zu einem System partieller Differenti-

algleichungen (PDGL) zweiter Ordnung führen. Durch die Komplexität solcher Gleichungssysteme ist eine exakte analytische Lösung in der Regel nicht berechenbar. Hierzu bedarf es Näherungslösungen, die mit Hilfe numerischer Verfahren zu finden sind.

Um Näherungslösungen zu berechnen, werden Diskretisierungsmethoden angewendet, die die PDGLs durch ein System algebraischer Gleichungen approximieren. Dabei wird das kontinuierliche Gleichungssystem in eine diskrete oder diskontinuierliche Schreibweise überführt. Anschließend findet die Vernetzung statt, bei der das zu untersuchende Gebiet in kleinere Teilgebiete (Zellen) unterteilt wird, sodass ein Rechengitter entsteht. Die diskretisierten Differentialgleichungen werden an den Gitterpunkten des Gitters berechnet. Das bei der Diskretisierung entstandene System algebraischer Gleichungen wird mit Hilfe eines passenden Lösungsalgorithmus (z. B. die Gauß-Elimination für ein System linearer algebraischer Gleichungen oder iterative Methoden für nicht lineare Gleichungssysteme) gelöst. Die Genauigkeit der Lösung hängt von dem verwendeten Diskretisierungsverfahren, der Wahl des Gitters und den zugehörigen Anfangs- und Randbedingungen ab.

Die drei bekanntesten Diskretisierungsmethoden sind: Finite-Differenzen-Methode (FDM), Finite-Elemente-Methode (FEM) und Finite-Volumen-Methode (FVM) /Lec09/.

### 3 Numerische Strömungssimulation

In diesem Kapitel wird der Ablauf einer CFD-Simulation einer kompressiblen Ein- und Mehrphasenströmung vorgestellt.

Im ersten Schritt wird die Geometrie zur Darstellung des Rechengebiets erzeugt und anschließend mit einem Rechengitter diskretisiert. Der Präprozessor dient zur Vorbereitung der Strömungssimulation. Im Präprozessor werden Anfangs- und Randbedingungen für die zu berechnenden Strömungsgrößen vorgegeben und Solvereinrichtungen definiert. Diese Definitionsdateien aus dem Präprozessor werden an den Solver übergeben, der die Berechnung des Strömungsfeldes übernimmt. Der Postprozessor dient zur Analyse und graphischen Darstellung der Resultate.

Alle Strömungssimulationen wurden mit dem kommerziellen Softwarepaket Ansys CFX 14, welches auf der Finite-Volumen-Methode basiert, durchgeführt.

#### 3.1 CAD-Geometrie und Gittergenerierung

Für die CFD-Simulation ist eine Definition des Strömungsgebiets notwendig. Dafür wird ein CAD-Modell mit Autodesk Inventor 2013 erstellt und als \*.igs-Datei in das Tool Ansys ICEM CFD geladen. Die verwendete Geometrie (**Bild 3-1**) besteht aus einem Rohr ( $D = 8 \text{ mm}$ ,  $L = 170 \text{ mm}$ ) mit einer Drossel ( $d = 1 \text{ mm}$ ,  $l = 30 \text{ mm}$ ). Das Verhältnis der Drossellänge zum Drosseldurchmesser ist deutlich größer als 1,5. Da die Geometrie rotationssymmetrisch ist, wird ein Kreisabschnitt von  $90^\circ$  verwendet, wodurch die Rechenzeit und der Rechenaufwand gesenkt werden.



Bild 3-1: CAD-Geometrie des Simulationsgebiets

An der Geometrie werden Bereiche (engl. parts) definiert, die die Systemgrenzen darstellen: Einströmfläche (Inlet), Ausströmfläche (Outlet), zwei Symmetrieränder (Sym1, Sym2), die Rohrwand (Zyl1, Zyl2, Wand1, Wand2) und die Drosselwand (Drossel1, Drossel2). Diesen Bereichen werden im Verlauf der Simulationsvorbereitung Randbedingungen zugeordnet.

Das Volumen wird durch ein Rechengitter in endlich viele Kontrollvolumina unterteilt. Dafür steht das Tool ICEM CFD zur Verfügung. Für die Strömungssimulation wird ein vollständig strukturiertes Gitter (O-Gitter) verwendet.

### 3.2 Anfangs- und Randbedingungen

Zur Definition der Simulation werden die Geometrie und das Gitter in den Präprozessor Ansys CFX-Pre übergeben. Zu Beginn müssen Stoffdaten und Randbedingungen vorgegeben werden, damit die verwendeten Differentialgleichungen gelöst werden können und sich somit die gewünschte Strömung einstellen kann.

Die Strömung wird simuliert mit dem Hydrauliköl HLP 46, dessen Produktinformation im Anhang (**Bild 5-1**) zu finden ist, und der Luft, die als ideales Gas modelliert wird. Zur Definition des HLP 46 in Ansys wird die Annahme eines kompressiblen Fluids getroffen. Die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Viskosität werden als nicht konstant angenommen und als Funktionen von Druck und Temperatur, siehe Kapitel 2.1.1, in CFX Expression Language (CEL) deklariert. Das ideale Gasgesetz (Gl. 2-7) wird ebenso in CFX deklariert, wobei die Luftdichte angepasst wird, sodass diese am Auslass des Rohres der Dichte bei 1 bar Druck entspricht.

Die für die Simulation definierten Randbedingungen der Strömung sind der Massenstrom  $\dot{m}$ , der konstant über dem gesamten Strömungsverlauf bleibt und der Druck  $p_2$  am Auslass des Rohres. Beide Werte werden durch die Dirichlet-Randbedingung als feste Werte für die Simulation definiert. Die Werte für den Massenstrom  $\dot{m}$  am Eingang werden im Bereich zwischen  $0,001 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  und  $0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  variiert. Am Auslass liegt ein konstanter Druck  $p_2 = 40 \text{ bar}$  vor. Damit kann die Gravitationskraft vernachlässigt werden. Durch die Geometrie des Rechennetzes ist sichergestellt, dass sich der Auslass in ausreichendem Abstand zur Drossel befindet, damit sich die Strömung voll ausbilden kann.

Da die Rohrströmung in einem Kreisabschnitt von  $90^\circ$  simuliert wird, wird die rotationssymmetrische Randbedingung für die Symmetrieebenen verwendet. An den Rohrwänden gilt die Haftbedingung, die als „No Slip Wall“-Bedingung definiert wird. Damit ist die Strömung an der Wand reibungsbehaftet. Die Temperaturänderungen, und als dessen Folge auch die Wärmeübertragung, werden vernachlässigt und die Fluidtemperatur als konstant definiert. Die Fluidtemperatur beträgt  $293,15 \text{ K}$ .

### 3.2.1 Einphasenströmung

Vor der Berechnung einer kompressiblen mehrphasigen Strömung empfiehlt es sich, die Problemstellung zu vereinfachen und mit nur einer Phase die Simulation durchzuführen. Diese Testläufe werden mit Massenströmen von  $0,001 \frac{kg}{s}$ ,  $0,003 \frac{kg}{s}$ ,  $0,005 \frac{kg}{s}$ ,  $0,007 \frac{kg}{s}$ ,  $0,01 \frac{kg}{s}$  und  $0,015 \frac{kg}{s}$  mit HLP 46 durchgeführt.

### 3.2.2 Zweiphasenströmung

Die simulierten Zweiphasenströmungen bestehen aus Hydrauliköl und Luft. Bei der kontinuierlichen Phase handelt es sich um das Hydrauliköl HLP 46. Die disperse Phase ist Luft, die als ideales Gas modelliert wird.

Bei der Untersuchung werden verschiedene Testfälle betrachtet (**Tabelle 3-1**).

	Luftvolumenanteil [Vol-%]	Massenstrom [kg / s]
HLP 46 - Luft	0, 1, 2, 5	0,001, 0,003, 0,005, 0,007, 0,01, 0,015

Tabelle 3-1: Übersicht durchgeführter Testsimulationen

## 3.3 Solvereinstellungen

Zur Durchführung der Simulation müssen verschiedene Einstellungen an den Solver übergeben werden.

Obwohl die Strömung als laminar angenommen wird, wird trotzdem ein Turbulenzmodell verwendet um mögliche, vor oder nach der Querschnittsverengung, entstehende Wirbel abbilden zu können.

Am Ein- und Auslass ist die Strömung homogen und voll ausgebildet, mit einer Turbulenzintensität von 1%. Zur Berechnung der turbulenten Strömung wird das Shear-Stress-Transport-Modell verwendet, da es nicht nur das Innere des Strömungsfeldes, sondern auch die Strömung in der Wandnähe gut abbildet.



Zur schnellen Konvergenz wird bei der zweiphasigen Strömung im ersten Schritt die Simulation mit dem Upwind-Verfahren mit einem Root-Mean-Square-Residuum (RMS-Residuum) von  $10^{-4}$  durchgeführt. Das Upwind-Verfahren ist ein stabiles Lösungsverfahren, jedoch nur von erster Ordnung, was die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigt /Lec09/. Deshalb werden die mit Upwind berechneten Ergebnisse als Startwerte für die Folgesimulation eingesetzt. Im zweiten Schritt wird das High-Resolution-Verfahren mit einem RMS-Residuum von  $10^{-5}$  verwendet, das genauere Ergebnisse als das Upwind-Verfahren liefert.

Die einphasige Strömung wird mit dem High-Resolution-Verfahren mit einem RMS-Residuum von  $10^{-5}$  simuliert.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse der im Kapitel 3 vorgestellten Strömungssimulationen diskutiert und analysiert. Die Ergebnisse werden mit Hilfe der Drosselgleichung (Gl. 2-12) und Messdaten verglichen. Dabei wird die Abhängigkeit des Volumenstroms von der Druckdifferenz über dem Rohr untersucht.

### 4.1 Netzgenauigkeit und Konvergenzverhalten

Wichtig für die Interpretation der Ergebnisse ist ein konvergierendes Verhalten bei der Lösung der Erhaltungsgleichungen. Hierfür können die Residuenverläufe, siehe **Bild 4-1** der Lösung der Massenerhaltungs- und Impulserhaltungsgleichungen herangezogen werden.

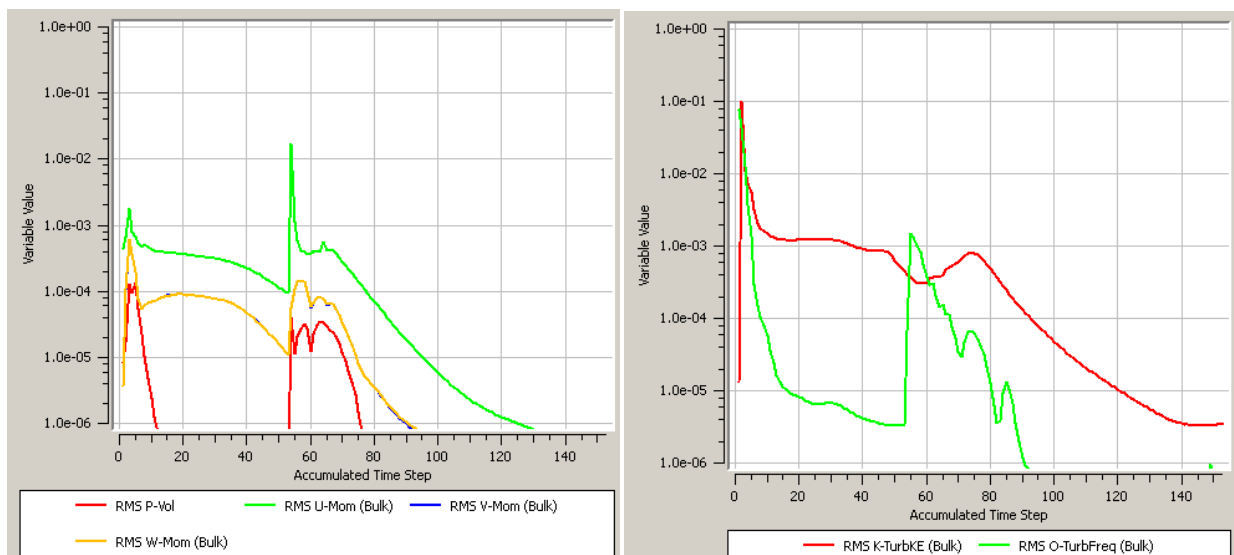


Bild 4-1: Residuenverlauf der Massen- und Impulserhaltungsgleichung für 1% Luftvolumen-gehalt und einem Massenstrom von 0,005 kg/s

Man erkennt, dass die gewählten Residuen der Erhaltungsgleichungen für gewählte Anzahl der Iterationen konvergieren, sodass die gewünschte Genauigkeit erreicht werden kann.

## 4.2 Einfluss verschiedener Einlassbedingungen auf die Gas-Flüssigkeits-Strömung

### 4.2.1 Einfluss des Massenstroms bei konstantem Luftvolumenanteil

Zur Untersuchung der unterschiedlichen Einlassbedingungen werden zuerst sechs Simulationen mit einem Volumenanteil der Luft von 1%, mit vier unterschiedlichen Einlassmassenströmen von  $0,001 \frac{kg}{s}$ ,  $0,003 \frac{kg}{s}$ ,  $0,005 \frac{kg}{s}$ ,  $0,007 \frac{kg}{s}$ ,  $0,01 \frac{kg}{s}$  und  $0,015 \frac{kg}{s}$  betrachtet.

In **Bild 4-2** sind die Geschwindigkeitsverläufe entlang der Drossel dargestellt. Je höher der Massenstrom im Rohr ist, desto höhere Werte erreicht die Geschwindigkeit der Strömung im Drosselbereich, um den Massenstrom konstant halten zu können. Durch die steigende Geschwindigkeit sinkt der Druck im System und die Dichte der Luft, die sehr stark vom Druck abhängig ist, sinkt. Dadurch steigt der Volumenstrom, es kommt zur erhöhten Bildung von Luftblasen und die Geschwindigkeit steigt noch mal an.

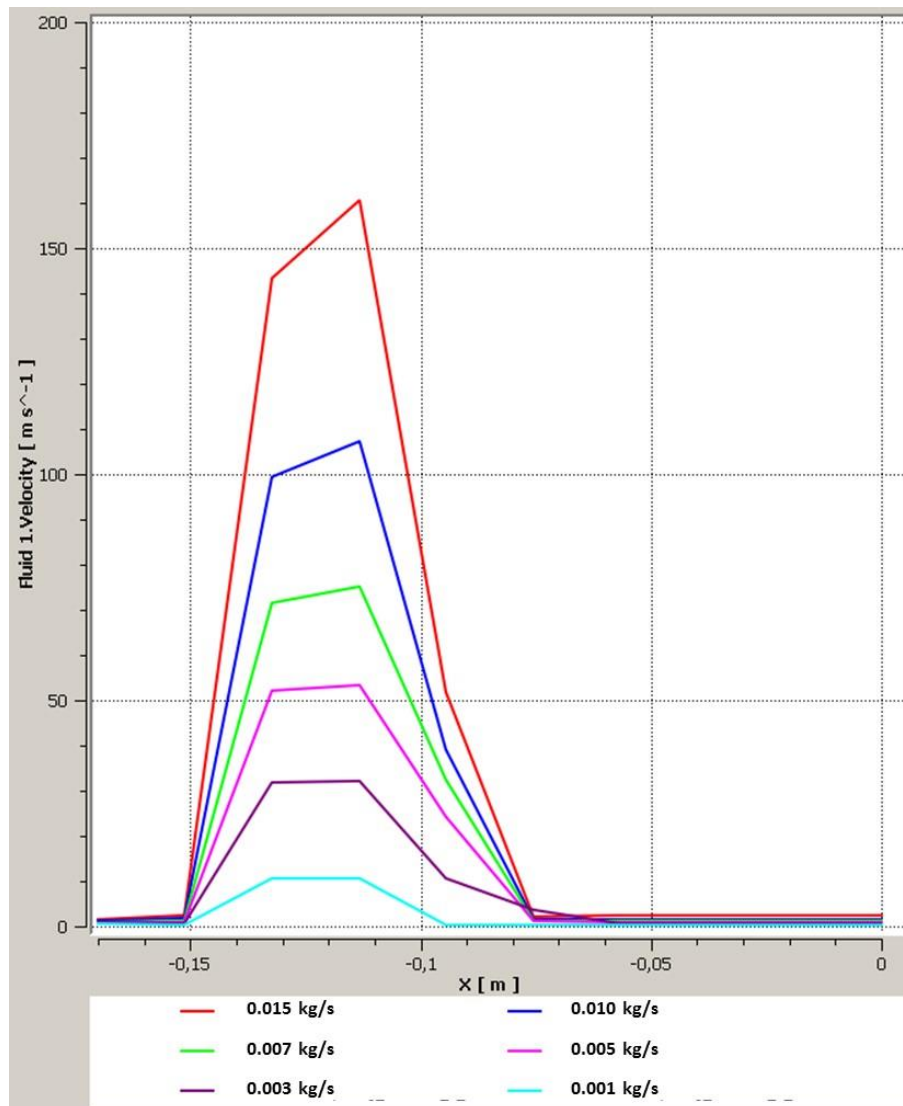


Bild 4-2: Geschwindigkeitsverlauf der kontinuierlichen Phase entlang der Rohrlänge für verschiedene Massenströme bei 1 Vol-% Luft

**Bild 4-3** zeigt den Verlauf des statischen Drucks für die sechs verschiedene Testläufe, aufgetragen über der z-Koordinatenachse. Wie erwartet, steigt der Druck am Einlass mit steigendem Massenstrom. Beim Durchfließen der Drossel erreicht die Druckkurve mit einem Massenstrom von  $0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  den geringsten lokalen Druck. Die Druckdifferenz steigt mit steigendem Massenstrom, siehe **Tabelle 4-1**. Hier sind in der die lokalen Minima und Maxima der Drücke aufgeführt.

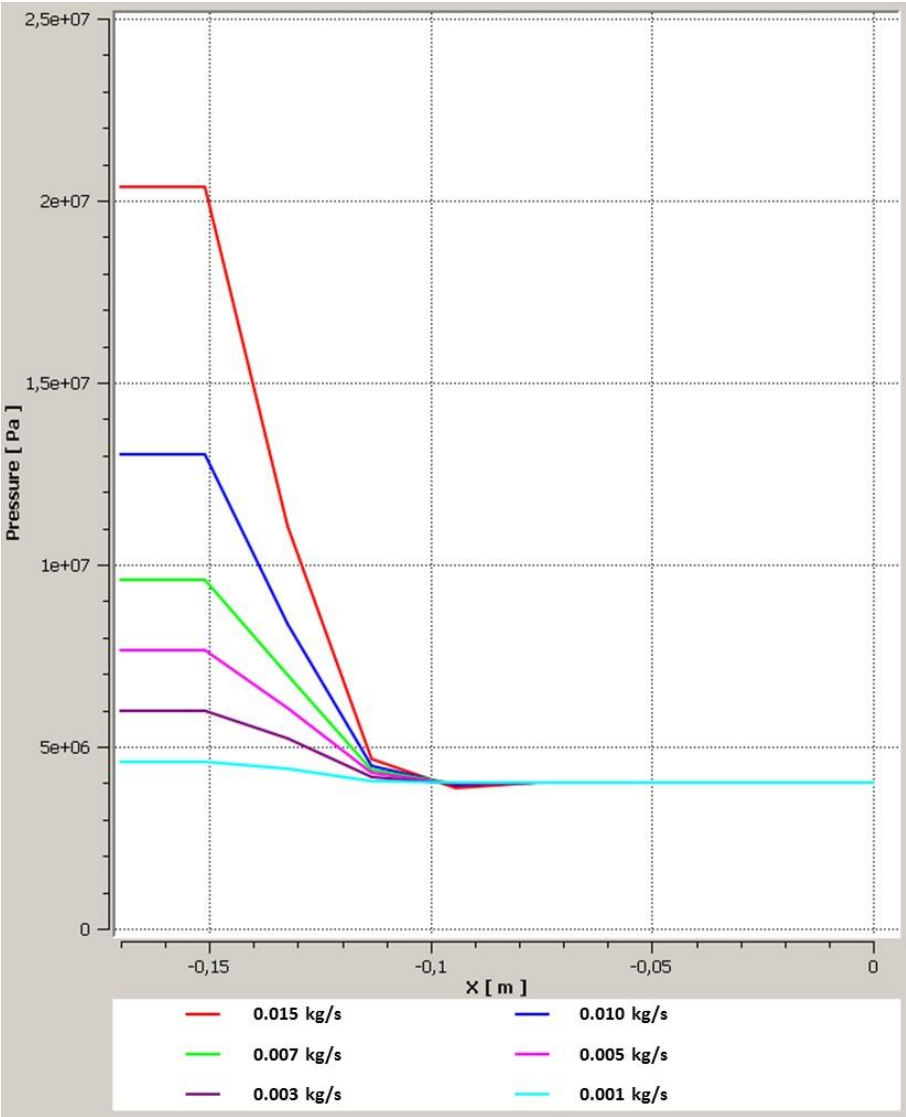


Bild 4-3: Druckverlauf entlang der Rohrlänge für verschiedene Massenströme bei 1 Vol-% Luft

Massenstrom $\dot{m}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	0,001	0,003	0,005	0,007	0,01	0,015
Minimaler statischer Druck $p_{\min}$ [bar]	40	39.7	39.4	38.9	37.8	35.3
Maximaler statischer Druck $p_{\max} = p_1$ [bar]	45.9	59.8	76.4	95.8	130.4	203.7
Druckdifferenz $\Delta p$ [bar]	5.9	19.8	36.4	55.8	90.4	163.7

Tabelle 4-1: Druckwerte der Strömungen mit unterschiedlichen Massenströmen bei 1 Vol-% Luft

#### 4.2.2 Einfluss des Luftvolumenanteils bei konstantem Massenstrom

Im Folgenden werden die Simulationen mit einem Einlassmassenstrom von  $0,007 \frac{kg}{s}$  und unterschiedlichen Luftvolumenanteilen betrachtet. Es ist erkennbar, dass die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt mit steigendem Luftvolumenanteil steigt (**Bild 4-4**). Damit steigt auch die Druckdifferenz (**Bild 4-5, Tabelle 4-2**).

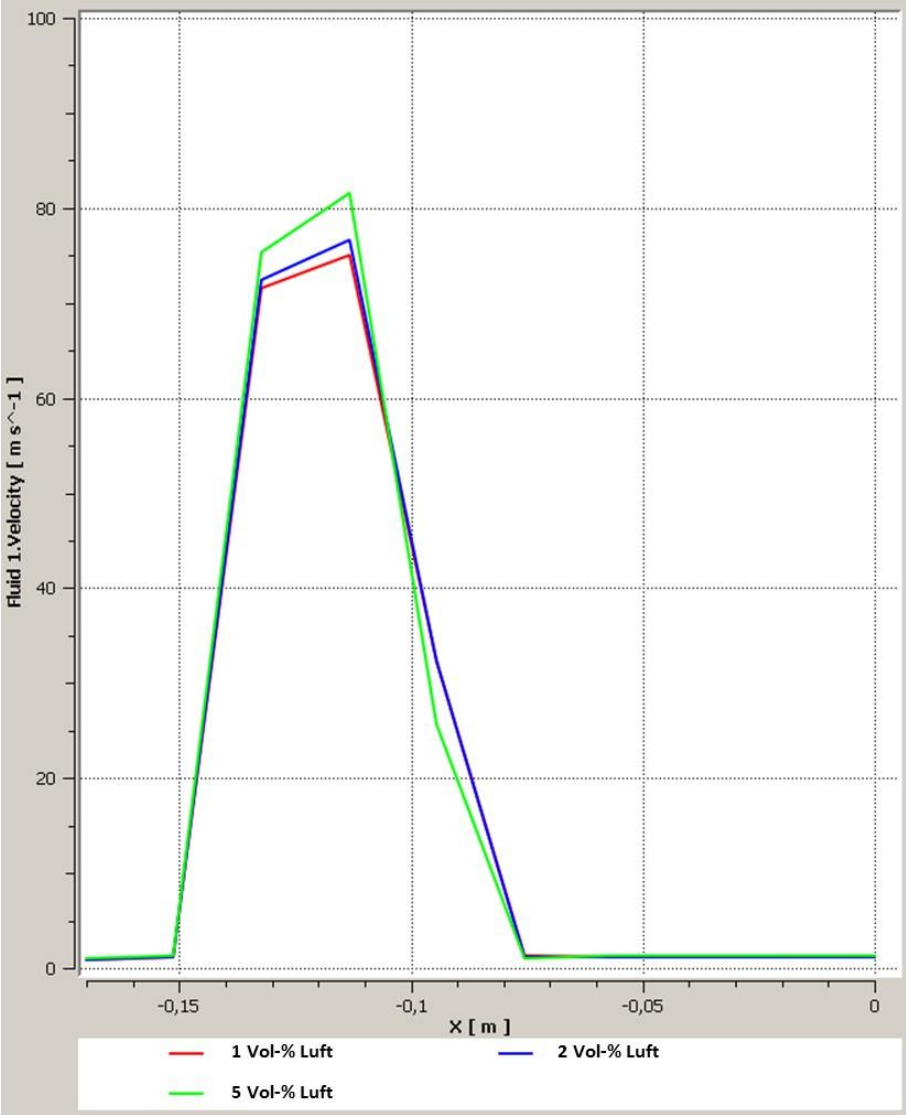


Bild 4-4: Geschwindigkeitsverlauf der kontinuierlichen Phase entlang der Rohrlänge mit verschiedenen Luftvolumenanteilen

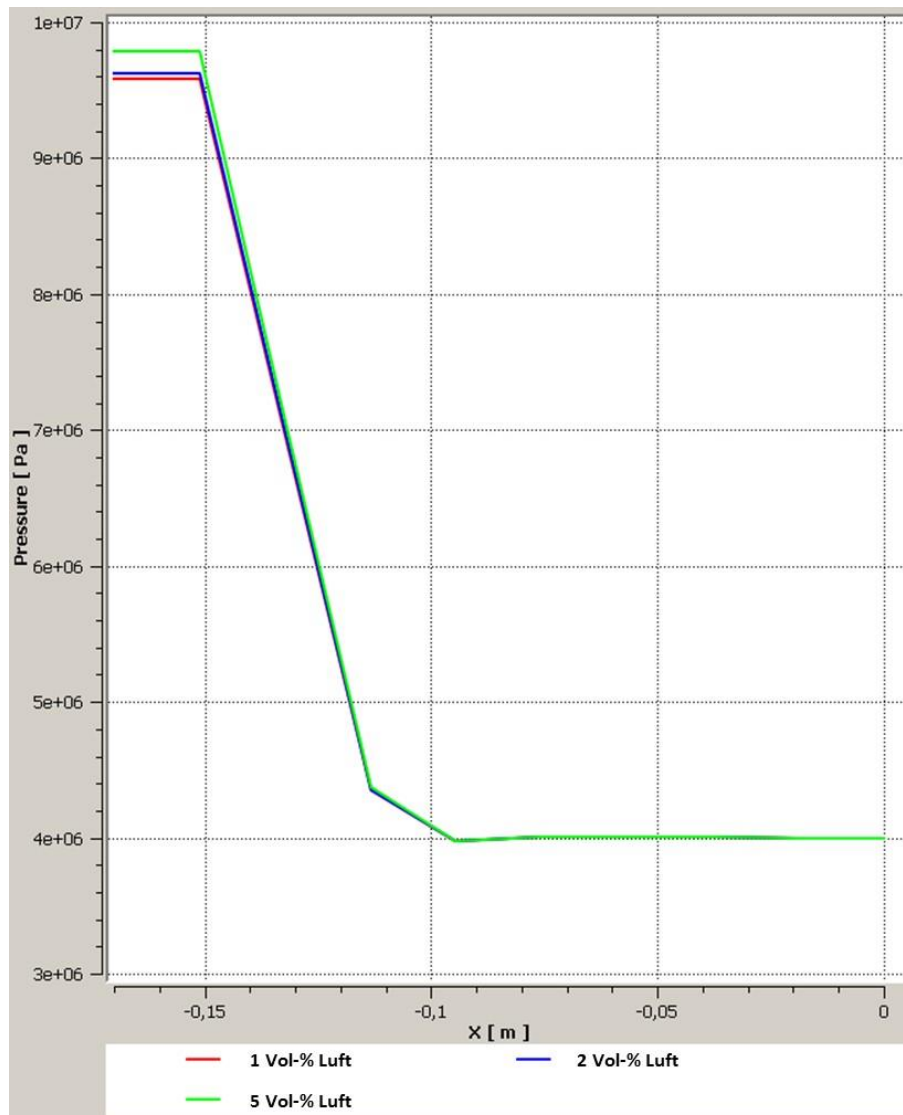


Bild 4-5: Druckverlauf entlang der Rohrlänge mit verschiedenen Luftvolumenanteilen

Luftanteil $\varphi_{Luft}$ [Vol-%] bei $p_1$	1	2	5
Minimaler statischer Druck $p_{min}$ [bar]	38.9	38.8	38.7
Maximaler statischer Druck $p_{max} = p_1$ [bar]	95.8	96.3	97.9
Druckdifferenz $\Delta p$ [bar]	55.8	56.3	57.9

Tabelle 4-2: Druckwerte für Strömungen mit unterschiedlichen Einlassluftvolumenanteilen



### 4.3 Vergleich der Simulation mit der analytischen Berechnung

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse mit den Rechenergebnissen mit der analytischen Drosselgleichung (Gl. 2-12) mit gemittelter Dichte (Gl. 2-10) und gemittelter Viskosität (Gl. 2-11) verglichen. Für die Analyse ist der Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz und dem Volumenstrom wichtig. Dabei wird untersucht, wie exakt das Systemverhalten durch die Modellierung abgebildet werden kann. In den nachfolgenden Diagrammen sind die analytischen Rechenergebnisse und die Ergebnisse der Simulationen dargestellt. Die resultierende Druckdifferenz ist dabei über dem Volumenstrom aufgetragen. Im Fall der analytischen Berechnung werden die Ergebnisse mit der Drosselgleichung mit gemittelten Dichte und Viskosität berechnet, im Fall der Simulation werden die Werte für die Berechnung aus dem Simulationstool genommen. Der aus der Simulation berechnete Volumenstrom wird mit dem Faktor 4 multipliziert um den Volumenstrom durch den ganzen Rohrquerschnitt zu erhalten.

**Bild 4-6, Bild 4-7, Bild 4-8** und **Bild 4-9** zeigen ausgewählte Simulationsergebnisse und Ergebnisse der Drosselgleichung, für jeweils 0 Vol-% Luft, 1 Vol-% Luft, 2 Vol-% Luft und 5 Vol-% Luft. Die Wertetabellen mit den Simulations- und analytischen Ergebnissen befinden sich im Anhang (**Bild 5-2** und **Bild 5-3**).

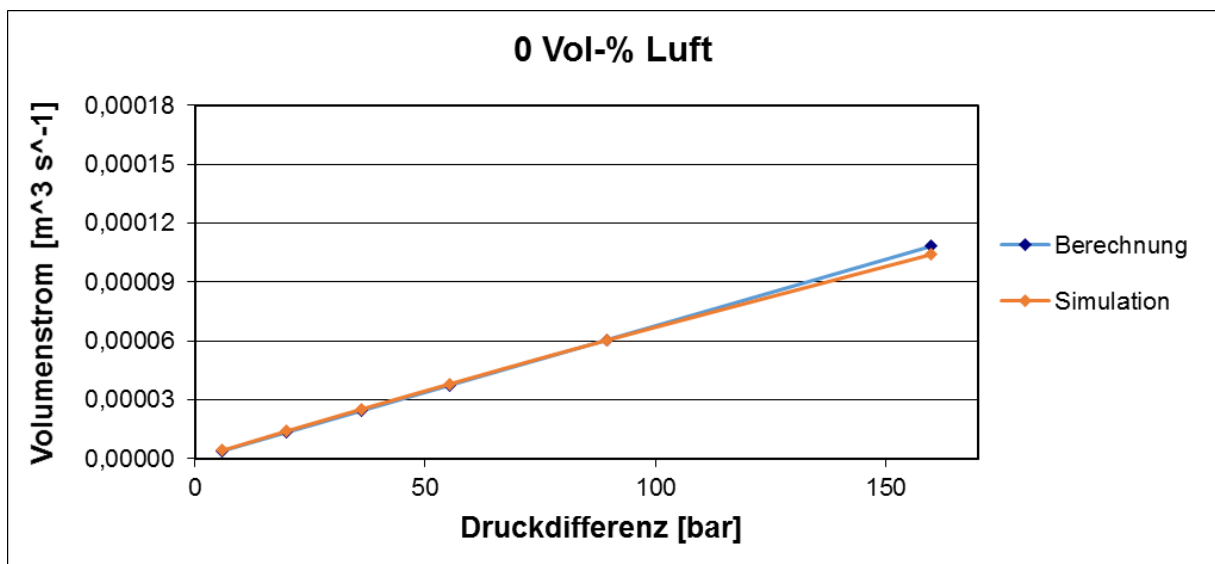


Bild 4-6: Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 0 Vol-% Luft

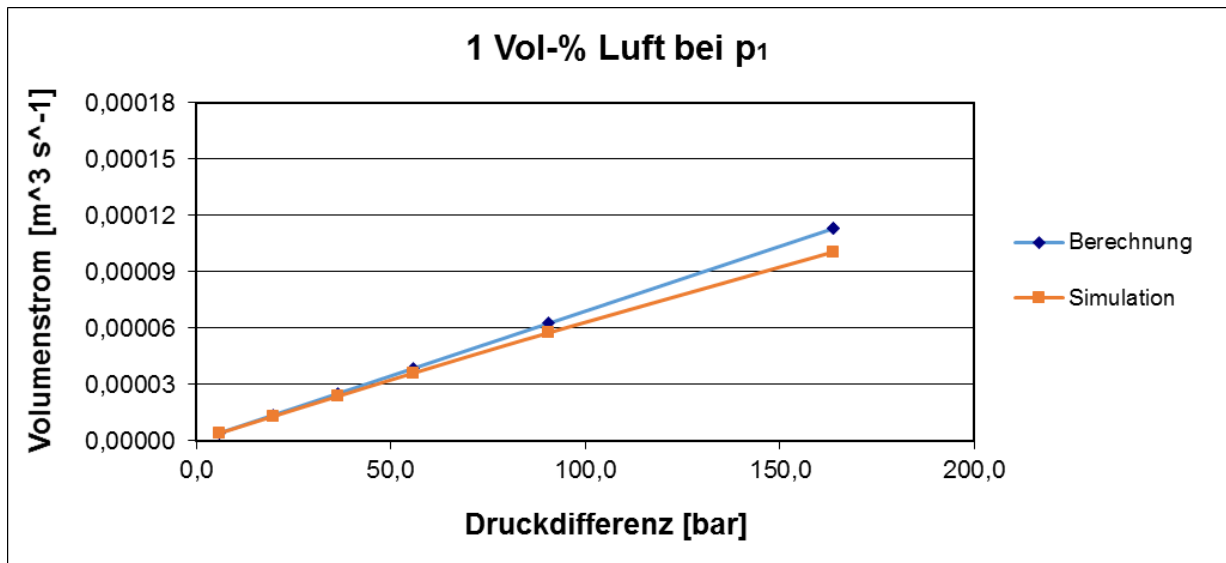


Bild 4-7: Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 1 Vol-% Luft

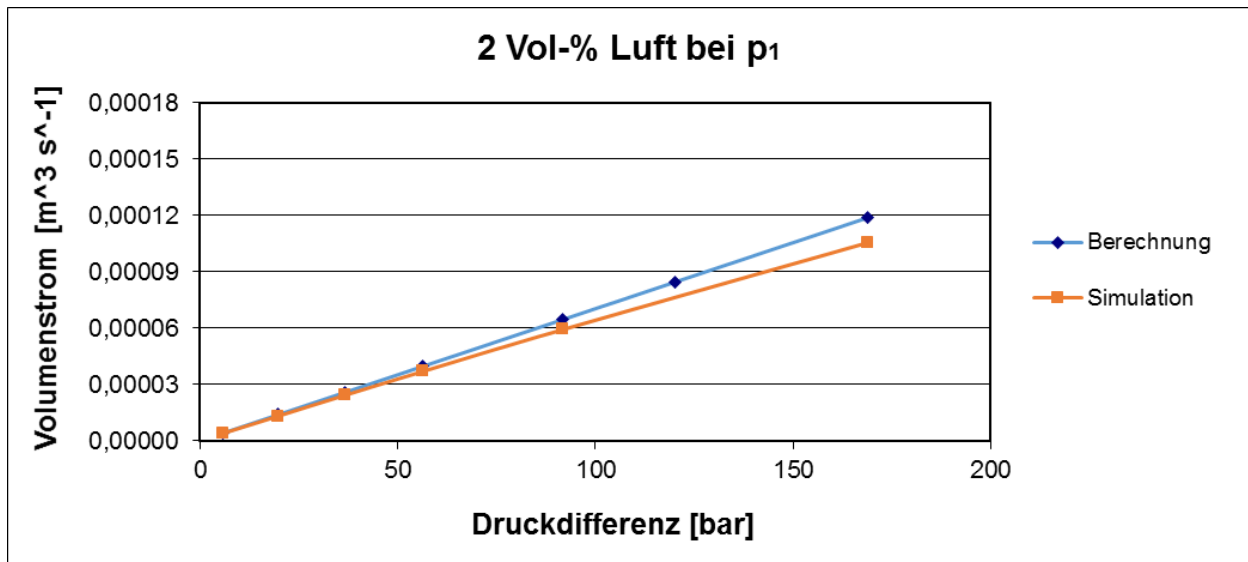


Bild 4-8: Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 2 Vol-% Luft

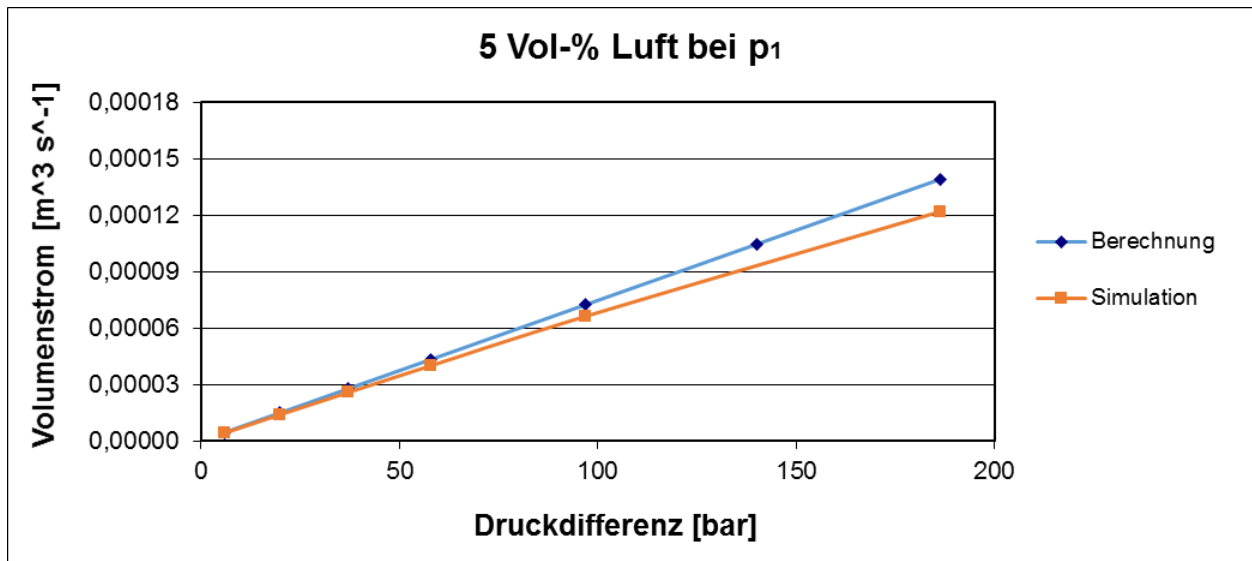


Bild 4-9: Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 5 Vol-% Luft

Der Vergleich der Ergebnisse weist für die Simulationen mit geringem Luftvolumenanteil und kleinen Volumenströmen Übereinstimmungen zwischen den Simulations- und Rechenergebnissen auf. Mit steigenden Luftvolumenanteilen und steigenden Volumenströmen steigt auch die Differenz zwischen den Ergebnissen.

Diese Abweichung könnte aus der analytischen Berechnung stammen, denn die Drosselgleichung (Gl. 2-12) ist nicht für eine zweiphasige Strömung parametrisiert. Außerdem wird die Kompressibilität der kontinuierlichen Phase bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Für die Berechnungen werden nur gemittelte Werte für Dichte und der Viskosität genommen. Die Dichte und die Viskosität verändern sich jedoch entlang des Rohres in Abhängigkeit von dem Druck und der Temperatur, was durch die Simulation abgebildet wird.

#### 4.4 Vergleich der Simulation mit dem Experiment

Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden diese mit den Messergebnissen verglichen. Die Messungen wurden mit einem neu entwickelten Prüfstand mit der selben Drosselweite und den selben Randbedingungen wie die Simulation durchgeführt. Der Aufbau des Prüfstands kann bei Schrank nachgelesen werden /Sch13/. Den Vergleich zwischen den Simulations- und Messergebnissen zeigen **Bild 4-10** und **Bild 4-11**. Die Messung wurde mit dem Hydrauliköl HLP 46 durchgeführt. Der Luftvolumenanteil wurde bei Atmosphärendruck bestimmt. Daher weist der Luftvolumenanteil am Einlass Differenzen auf.

Das Bild 4-10 zeigt die Simulations- und Messergebnisse für 0% Luftvolumenanteil am Einlass des Rohres.

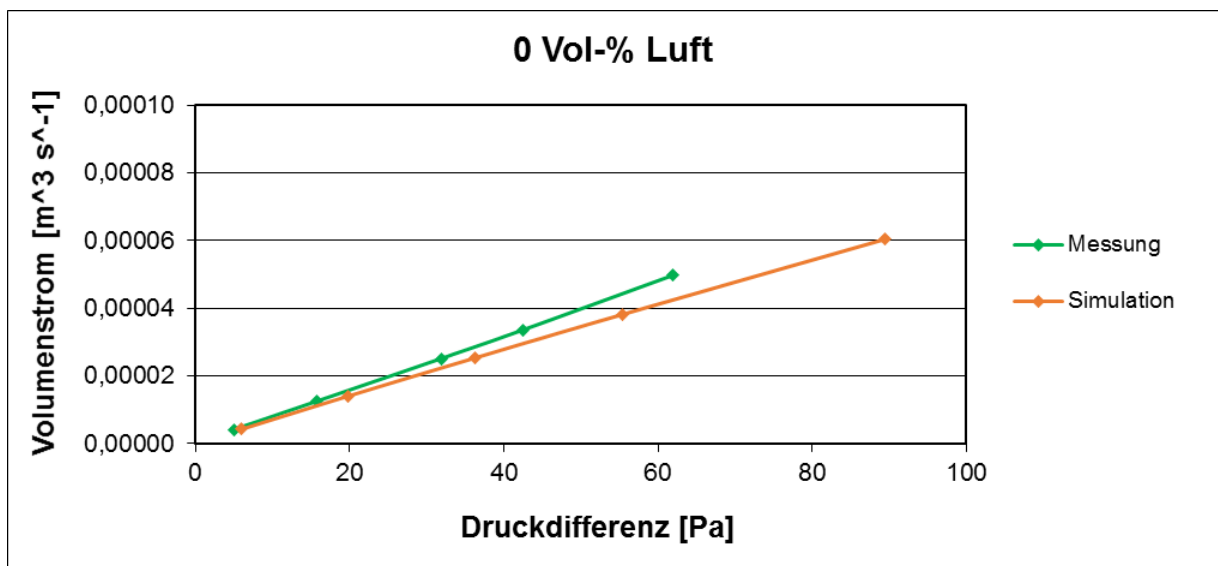


Bild 4-10: Vergleich der Simulations- und Messergebnisse für 0 Vol-% Luft

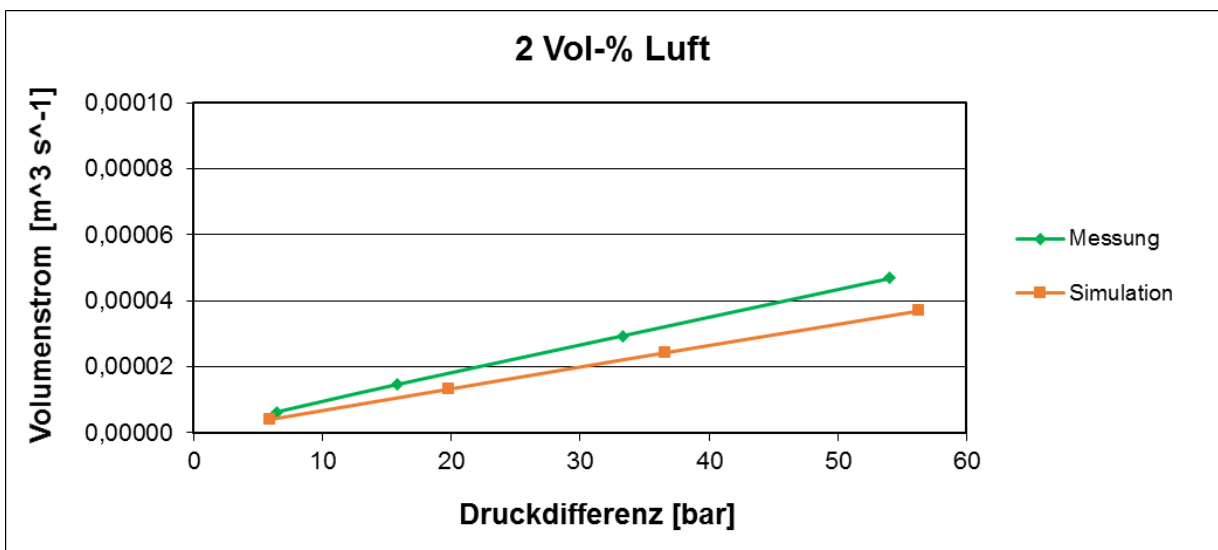


Bild 4-11: Vergleich der Simulations- und Messergebnisse für 2 Vol-% Luft

Es ist sichtbar, dass eine hohe Abweichung zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen vorhanden ist. Am Prüfstand ist der Luftvolumenanteil im Gegensatz zu der Simulation schwer messbar, das die Abweichung der Ergebnisse erklären würde.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden numerische Strömungssimulationen mit Ansys CFX 14 durchgeführt, um die Einflüsse von Luft und Wasser auf das Durchflussverhalten eines Hydrauliköls in einer Drossel zu untersuchen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf den Betrachtungen von verschiedenen Luftanteilen in Öl bei unterschiedlichen Eingangsmassenströmen. Dabei wurde der Zusammenhang zwischen dem statischen Druckverlauf über der Drossel in Abhängigkeit verschiedener Volumenströme entlang des Rohres betrachtet. Im Anschluss wurden die Simulationsergebnisse mit Rechenergebnissen der analytischen Drosselgleichung mit gemittelter Dichte und gemittelter Viskosität und mit Messergebnissen verglichen.

Das physikalische Verhalten der Dichte-, der Viskosität und der spezifischen Wärmekapazität des Öls wurde durch Modellfunktionen angenähert.

Die Resultate dieser Arbeit zeigen, dass bei konstantem Massenstrom mit steigenden Luftvolumenanteilen die Druckdifferenz über der Drossel steigt. Mit steigendem Massenstrom steigt die Druckdifferenz ebenfalls. Da Luft eine geringere Dichte als Öl hat, nimmt mit steigendem Luftgehalt in der Strömung die homogene Gemischdichte ab. Bei konstantem Massenstrom bedeutet dies einen Anstieg im Volumenstrom, was höhere Geschwindigkeit und damit größere Verluste im Drosselquerschnitt bedingt.

Der Vergleich der Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation und der Ergebnissen der Drosselgleichung zeigt gute Übereinstimmungen bei kleinen Volumenströmen und geringem Luftgehalt. Bei größeren Volumenströmen und Luftgehalten unterscheiden sich die Ergebnisse. Dies ist auf die ungenaue Berechnung in der Drosselgleichung zurückzuführen. Eine Voraussetzung zur Anwendung der Drosselgleichung ist die Annahme eines inkompressiblen Fluids. Diese Annahme ist besonders beim Vorhandensein von Luft nicht erfüllt.

**III Literaturverzeichnis**

- /DIN04/ „Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leistungen mit kreisquerschnitt“, DIN EN ISO 5167, 2004
- /Fas95/ Fassbender, A. „Theoretische und experimentelle Untersuchungen saugseitiger Widerstandssteuerungen bei Verdrängerpumpen“, Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- /Gru97/ Grunwald, G. „Theoretische Untersuchungen zur Flugi-Struktur-Wechselwirkungen in zweiphasig durchströmten Schwingungsmodellen“, Forschungszentrum Rossendorf e.V., Dresden, 1997
- /Küm07/ Kümmel, W. „Technische Strömungsmechanik“, 3.Aufl., Teubner, Wiesbaden, 2007
- /Lau11/ Laurien, E., Oertel jr., H. „Numerische Strömungssimulation“, 4. Aufl., Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011
- /Lex04/ Lex, T. „Fluidodynamik von Gas-Flüssigkeits-Gemoschen in Kugelhähnen“, Dissertation, TU München, 2004
- /Mur05/ Murrenhoff, H. „Grundlagen der Fluidtechnik, Teil 1: Hydraulik“, 4.Aufl. Shaker Verlag, Aachen, 2005
- /Sch04/ Schröder, W. „Fluidmechanik“, Verlag Mainz, Aachen, 2004
- /Sch13/ Schrank, K. “Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting”, Incline Village, USA, 2013
- /Wit74/ Witt, K. „Druckflüssigkeiten und thermodynamisches Messen“, Ingenieur Digest Verlag, Frankfurt am Main, 1974

**IV Abbildungsverzeichnis**

Bild 3-1:	CAD-Geometrie des Simulationsgebiets.....	13
Bild 4-1:	Residuenverlauf der Massen- und Impulserhaltungsgleichung für 1% Luftvolumengehalt und einem Massenstrom von 0,005 kg/s.....	17
Bild 4-2:	Geschwindigkeitsverlauf der kontinuierlichen Phase entlang der Rohrlänge für verschiedene Massenströme bei 1 Vol-% Luft.....	19
Bild 4-3:	Druckverlauf entlang der Rohrlänge für verschiedene Massenströme bei 1 Vol- % Luft.....	20
Bild 4-4:	Geschwindigkeitsverlauf der kontinuierlichen Phase entlang der Rohrlänge mit verschiedenen Luftvolumenanteilen.....	22
Bild 4-5:	Druckverlauf entlang der Rohrlänge mit verschiedenen Luftvolumenanteilen...	23
Bild 4-6:	Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 0 Vol-% Luft.....	24
Bild 4-7:	Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 1 Vol-% Luft.....	25
Bild 4-8:	Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 2 Vol-% Luft.....	25
Bild 4-9:	Vergleich der Simulations- und Rechenergebnisse für 5 Vol-% Luft.....	26
Bild 4-10:	Vergleich der Simulations- und Messergebnisse für 0 Vol-% Luft .....	27
Bild 4-11:	Vergleich der Simulations- und Messergebnisse für 2 Vol-% Luft .....	27
Bild 5-1:	Produktinformation zum Hydrauliköl HLP 46 / <a href="http://www.liqui-moly.de/">www.liqui-moly.de/</a> .....	32
Bild 5-2:	Wertetabelle für Simulationsergebnisse für verschiedene Einlassluftvolumenanteile für HLP 46 .....	34
Bild 5-3:	Wertetabelle für Messergebnisse für verschiedene Einlassluftvolumenanteile für HLP 46.....	34

**V Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Übersicht durchgeführter Testsimulationen ..... 15

Tabelle 4-1: Druckwerte der Strömungen mit unterschiedlichen Massenströmen bei 1 Vol-%  
Luft ..... 21

Tabelle 4-2: Druckwerte für Strömungen mit unterschiedlichen Einlassluftvolumenanteilen 23

Tabelle 5-1: Stoffkonstanten der Modellfunktion für die Dichte für HLP 46 /Wit74/ ..... 33

Tabelle 5-2: Stoffkonstanten der Modellfunktion für die dynamische Viskosität für HLP 46  
/Wit74/ ..... 33

Tabelle 5-3: Stoffkonstanten der Modellfunktion für die spezifische Wärmekapazität für  
HLP 46 /Wit74/ ..... 33



## VI Anhang

## Hydrauliköl HLP 46

### BESCHREIBUNG

Hochleistungs-Hydrauliköl aus hochwertigen Raffinaten mit optimalem Verschleißschutz bei Mischreibung (AW-Additive) und hohem Lasttragevermögen des Schmierfilms. Ausgezeichnete Thermische- und Oxidationsbeständigkeit für lange Einsatzzeit. Antioxidantien und Korrosionsinhibitoren sorgen für hohe Alterungs- und Temperaturstabilität, keine Schaumbildung, gutes Demulgierverhalten. Stahl, Bunt- und Leichtmetalle sowie deren Legierungen werden nicht angegriffen. Verträglich gegenüber handelsüblichen Dichtungswerkstoffen.

Gemäss Kennzeichnung DIN 51524: HLP 46

### TECHNISCHE DATEN

ISO-Viskositätsklasse	: VG 46		DIN 51519
Dichte bei +15°C	: 0,880	g/cm <sup>3</sup>	DIN 51757
Viskosität bei +40°C	: 46	mm <sup>2</sup> /s	DIN 51562
Viskosität bei +100°C	: 6,7	mm <sup>2</sup> /s	DIN 51562
Viskositätsindex	: 97		DIN ISO 2909
Flammpunkt	: 226	°C	DIN ISO 2592
Pourpoint	: - 25	°C	DIN ISO 3016
Asche, Sulfat	: 0,17	g/100g	DIN 51575
Neutralisationszahl, sauer	: 0,5	mg KOH/g	DIN 51558 Teil 1
Korr. Wirkung auf CU	: Korr.-Gr. 1-125 A3		DIN 51759
Schäumungseigenschaften	: S1B-30/0 S2B-50/0 S3B-30/0		DIN 51566
FZG-Zahnradkurztest			
Normaltest A/8,3/90	: Schadenskraftstufe 12		DIN 51354

### EINSATZGEBIETE

Hydraulikanlagen mit hydrostatischem Antrieb, die thermisch beansprucht werden und in denen Wasserzutritt nicht auszuschließen ist. Hydropumpen und -motoren, die aufgrund der Bauart oder der Betriebsbedingungen Öle mit Zusätzen zur Verschleißminderung benötigen. Hydraulische Baumaschinen, Bagger und Aufzüge, Industrie- und Werkzeugmaschinen, Hebebühnen, Holzspalter und Pressen.

### ERHÄLTICHE GEBINDE

Hydrauliköl HLP 46	1 l	Art.Nr. 1117
	20 l	Art.Nr. 1110
	60 l	Art.Nr. 1111
	205 l	Art.Nr. 1112
	offene Ware	Art.Nr. 1120

PI 01/02/05

Unsere Information stützt sich auf sorgfältige Untersuchungen und darf als zuverlässig gelten, dennoch kann sie nur unverbindlich beraten.



LIQUI-MOLY GmbH Postfach 10 20 Phone +49 6123 91450-10 Service online 00090323230  
 Jürgen Helber-Gl. 4 D-69006 Ulm Fax +49 6123 91450-32 E-Mail: liqui-moly.de  
 D-69006 Ulm www.liqui-moly.de E-Mail: liqui-moly.de

Bild 5-1: Produktinformation zum Hydrauliköl HLP 46 /www.liqui-moly.de/

$B$	$0,171801 \cdot 10^4$
$C$	$0,215003$
$D$	$-0,618199$
$E_0$	$0,269774$
$E_1$	$115299 \cdot 10^4$
$E_2$	$-0,134291 \cdot 10^{-4}$
$\rho_0$	$886,860$

Tabelle 5-1: Stoffkonstanten der Modellfunktion für die Dichte für HLP 46 /Wit74/

$a_0$	$0,716789 \cdot 10^3$
$a_1$	$0,116482 \cdot 10^3$
$a_2$	$0,361897 \cdot 10$
$a_3$	$0,822870 \cdot 10^{-2}$
$a_4$	$-3,11457 \cdot 10^{-6}$
$a_5$	$5,70805 \cdot 10^2$
$a_6$	$-0,228366$
$a_7$	$-0,562193 \cdot 10^{-2}$
$a_8$	$3,00900 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 5-2: Stoffkonstanten der Modellfunktion für die dynamische Viskosität für HLP 46 /Wit74/

$A_0$	$0,640157 \cdot 10^{-2}$
$A_1$	$0,443242 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 5-3: Stoffkonstanten der Modellfunktion für die spezifische Wärmekapazität für HLP 46 /Wit74/

HLP 46 0 Vol-% Luft		HLP 46 1 Vol-% Luft	
Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]	Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
593991	0,0000042	592827	0,000004
1976650	0,000014	1976650	0,000013
3624230	0,0000253	3636740	0,0000237
5545100	0,0000382	5579500	0,000036
8943370	0,0000604	9043540	0,0000574
15982400	0,0001041	16373000	0,0001006

HLP 46 2 Vol-% Luft		HLP 46 5 Vol-% Luft	
Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]	Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
593151	0,000004	594015	0,0000041
1981600	0,0000132	1996640	0,0000139
3655360	0,0000242	3712510	0,0000257
5627540	0,0000369	5789070	0,0000399
9182330	0,0000593	9688990	0,0000661
16883300	0,0001055	18641300	0,0001219

Bild 5-2: Wertetabelle für Simulationsergebnisse für verschiedene Einlassluftvolumenanteile für HLP 46

HLP 46 2 Vol-% Luft		
Luftvolumenanteil [Vol-%]	Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
2,021	641700	0,00000627
2,021	1584600	0,00001467
2,021	3329100	0,00002937
2,021	5405100	0,00004680

HLP 46 0 Vol-% Luft		
Luftvolumenanteil [Vol-%]	Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
0	498000	0,0000042
0	1578800	0,0000126
0	3185400	0,0000251
0	4251000	0,0000336
0	6190600	0,0000497

Bild 5-3: Wertetabelle für Messergebnisse für verschiedene Einlassluftvolumenanteile für HLP 46