



Institut für Thermische Strömungsmaschinen  
Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bauer, Ord.

# **Implementation of a Nearest-Neighbor Search for Particle Simulation in Sparse Computational Domains**

Energietechnisches Praktikum  
von  
**Jens Peifle, B.Sc.**

Betreuer: **Marc Keller, M.Sc.**

---

Januar 2019

Ich versichere, die Arbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben. Die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Satzung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis wurde von mir in der aktuellen Fassung beachtet.

Karlsruhe, January 8, 2019

# Contents

<b>List of Symbols</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Motivation</b>	<b>2</b>
<b>3 Objective</b>	<b>3</b>
<b>4 Methods and Tools</b>	<b>4</b>
4.1 The ANN Library . . . . .	4
<b>5 Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>5</b>
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>6</b>
<b>7 Abschlussarbeiten am ITS</b>	<b>7</b>
7.1 Allgemeines . . . . .	7
7.2 Einleitung . . . . .	8
7.3 Stand der Forschung . . . . .	8
7.4 Grundlagen . . . . .	8
7.5 Material und Methoden . . . . .	9
7.6 Ergebnisse und Diskussion . . . . .	9
7.7 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	9
7.8 Anhang . . . . .	10
<b>8 Weitere Hinweise</b>	<b>11</b>
8.1 Sprachliche Gestaltung . . . . .	11
8.2 Gliederung . . . . .	12
8.2.1 überflüssige Überschrift . . . . .	12
8.3 Literaturverweise . . . . .	12
8.4 Abbildungen und Tabellen . . . . .	12
8.5 Diagramme . . . . .	14
8.6 Gleichungen . . . . .	16
<b>References</b>	<b>17</b>
<b>Appendix</b>	<b>18</b>
A.1 Anhang 1 . . . . .	18
A.2 Anhang 2 . . . . .	18

# List of Symbols

Symbol	Unit	Description
<i>Latin symbols</i>		
$F_{xy}$		Faktor xy
$H$	m	Höhe
$c_p$	J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität
<i>Indices</i>		
r		r-Koordinate
x		x-Koordinate
y		y-Koordinate
<i>Abbreviations</i>		
CFD		Computational Fluid Dynamics
FEM		Finite-Elemente-Methode
ANN		approximate nearest neighbor (name of C++ library)
frNN		fixed-radius nearest neighbor

# 1 Introduction

Turbofan engines are widely used in commercial aircraft. New, more stringent requirements with regards to emissions, fuel consumption and noise pollution are putting pressure on aircraft engine manufacturers to increase the efficiency of their products. From a technical point of view, there are two options: increase the thermal efficiency of the turbine stage or increase the bypass ratio of the engine. The bypass ratio is the amount of air that passes around the turbine core rather than through it. Generally, a higher bypass ratio results in a quieter, more efficient engine. To increase the bypass ratio, the diameter of the engine's fan blades must be increased. However, increasing the fan diameter leads to an increase in the circumferential velocity of the fan blade tips. At very high speeds, large increases in losses and noise emissions are observed.

In conventional turbofans, the fan and the low-pressure compressor and turbine which drives the fan are attached to single shaft. In this configuration, the speed of the compressor stage is limited by the blade tip speeds to the fan. With the addition of a gearbox between the fan and the compressor and turbine, the fan speed can be greatly reduced while the compressor and turbine can rotate much faster. Both components can therefore operate at their optimal speeds, greatly increasing efficiency and reducing noise.

However, geared turbofans are not without drawbacks. In addition to increased complexity and manufacturing cost, a significant amount of energy is lost as heat within the gearbox. The cooling and lubrication of the gearbox are key challenges. These functions are realized with oil jets arranged around the gears. The interaction between the oil jets and the gear surfaces determines the cooling and lubrication performance as well as the further propagation of the oil within the gearbox.

Therefore, this interaction is a current focus of research at the Institute of Thermal Turbomachinery at the Karlsruhe Institute of Technology. Experimental investigations in this area are difficult due to the small time scale and inaccessible location of the interactions. However, Computational Fluid Dynamics (CFD) methods offer possibilities for detailed investigation. One such method is Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), a particle-based method that is well-suited to modeling free surface flows and moving boundaries. SPH, like other approaches to fluid dynamics modeling, is very computationally expensive. To increase the pace of innovation, it is desirable to reduce the required computation time as much as possible.

This work examines an approach to increasing the computational efficiency of the SPH solver and therefore reducing the required computation time.

## 2 Motivation

Smoothed-particle hydrodynamics is a computational method which can be used to simulate mechanics of solids and fluids. It is mesh-free and employs the Lagrangian approach, which makes it well-suited for complex problems with free surface flows and moving boundaries. For fluid dynamics, it offers several key benefits:

- no additional computations are needed to ensure conservation of mass
- the pressure field is calculated locally instead of through solving a system of equations
- no explicit tracking of fluid boundaries is necessary

Compared to mesh-based methods, SPH requires a very large number of particles to ensure an equivalent resolution. However, in applications where there is relatively little high-density fluid (e.g. oil) in a computational space filled with low-density fluid (e.g. air), the low-density phase can be completely omitted. This results in a sparse computational domain, in which the amount of particles is small compared to the size of the domain.

During an SPH-method simulation, particles interact locally within a characteristic radius ("smoothing length"). In other words, each particle's behavior is influenced only by the particles surrounding it within a certain range. Therefore, for each particle  $p_i$  in the domain, all points within a certain radius  $r$  around the particle must be determined. This type of search is called *fixed-radius near neighbor* (frNN) search.

In the in-house code used at the Institute of Thermal Turbomachinery, the

### 3 Objective

For each point  $p_1$  within the computational domain (given in a list), find all neighbors  $p_2$  that lie less than three times the mean particle spacing  $dx$  ( particle Diameter) away from the particle. This includes the particle itself.

Problem properties:

- low-dimensional (2D/3D)
- large N ( 10e6 points)
- static (for a single time step)
- exact

Since the neighbors must be found for all points, we can use the fact that, if we know that  $p_b$  is a neighbor of  $p_a$  then  $p_a$  is also a neighbor of  $p_b$ .

## 4 Methods and Tools

### 4.1 The ANN Library

Fixed-radius k-nearest neighbor search with ANN

From the ANN Programming Manual (page 7):

In order to produce a true fixed-radius search, first set  $k = 0$  and run the procedure in order to obtain the number  $k'$  of points that lie within the radius bound. Then, allocate index and distance arrays of size  $k'$  each, and repeat the fixed-radius search by setting  $k = k'$  and passing in these two arrays.



## 5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse beschrieben, diskutiert und ggf. mit anderen Daten aus der Literatur verglichen. Die Diskussion soll klären, ob die Daten sinnvoll sind, die Ergebnisse so zu erwarten waren und ob ungewöhnliche Beobachtungen sichtbar sind. Es ist auf eine übersichtliche Struktur zu achten, untersuchte Fälle sind konsistent und logisch zu benennen. Die Darstellung der Daten ist an die verwendete Messgenauigkeit anzupassen (z.B. ist eine Angabe von 314,394 575 K in den meisten Fällen nicht sinnvoll).

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Zusammenfassung ermöglicht Außenstehenden einen Überblick über den Inhalt der Arbeit und enthält insbesondere die Zielsetzung, die verwendete Methodik, Verfahren und Ansätze sowie die erzielten Ergebnisse. Daran schließt sich ein Ausblick an, der mögliche Verbesserungen bzw. weitere Arbeitsschritte aufzählt. Die Zusammenfassung ist das am häufigsten gelesene Kapitel (größt mögliche Sorgfalt!) und umfasst maximal zwei bis drei Seiten.

## 7 Abschlussarbeiten am ITS

Diese Vorlage dient zur Erstellung wissenschaftlicher Abschlussarbeiten am Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) und stellt eine Zusammenfassung der Meinungen aller wissenschaftlicher Mitarbeiter dar. Zu manchen Punkten kann der Betreuer eigene Meinungen haben. Es existiert eine äquivalente Word-Vorlage, deren Benutzung mit dem Betreuer abzusprechen ist.

In diesem Kapitel wird auf den allgemeinen Aufbau einer Abschlussarbeit eingegangen. In Kapitel 8 wird im Detail auf einzelne Aspekte der sprachlichen Gestaltung, Aufbau von Gliederung, Diagrammen, Abbildungen sowie Gleichungen eingegangen.

### 7.1 Allgemeines

Die Arbeit ist in deutscher Sprache anzufertigen und wird einseitig gedruckt. Der Gesamtumfang beträgt in der Regel für Bachelorarbeiten 30 – 60 und für Masterarbeiten 60 – 80 Seiten. Diese Angaben sind lediglich als Richtlinie zu werten und erfolgen immer in Absprache mit dem Betreuer. Vor Beginn des Schreibens ist die Gliederung mit dem Betreuer abzusprechen. Um den Korrekturaufwand möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll, eine Vorkorrektur an einem Teil der Arbeit durchzuführen, bevor die gesamte Arbeit zur Korrektur abgegeben wird. Für die Einarbeitung in das Thema sollten ungefähr zwei Wochen eingeplant und spätestens sechs Wochen vor Abgabe mit dem Schreiben begonnen werden.

Grundsätzlicher Aufbau einer Abschlussarbeit:

- ITS Deckblatt
- Leerseite
- Gegebenenfalls ein Sperrvermerk
- Aufgabenstellung
- Unterschriebene eidesstattliche Erklärung
- Danksagung (freiwillig!)
- Evtl. Kurzfassung/Abstract
- Inhaltsverzeichnis
- Abbildungsverzeichnis
- Tabellenverzeichnis
- Symbolverzeichnis
- **Hauptteil** (siehe folgende Unterkapitel)
- Literaturverzeichnis
- Anhang

Im Folgenden ist beschrieben, aus welchen Bausteinen der Hauptteil einer Abschlussarbeit besteht, welche Aufgabe diese Bausteine haben und wie sie mit Inhalt zu füllen sind. Um den Leser an einem „roten Faden“ durch die Arbeit zu führen, ist es hilfreich kurze Zusammenfassungen am Ende der Kapitel bzw. Überleitungen zum nachfolgenden Kapitel zu liefern.

## 7.2 Einleitung

Die Einleitung hat die Funktion zum Thema hinzuführen und liefert Antworten, warum das Thema der Arbeit aus technischer, wissenschaftlicher und evtl. wirtschaftlicher Sicht von Bedeutung ist. Mit Ende der Einleitung muss das Thema der Arbeit klar beschrieben sein. Daher ist der Anfang sehr allgemein gehalten, während zum Schluss das Problem eingegrenzt wird. Hier gilt: Möglichst keine externe Quellen!

## 7.3 Stand der Forschung

Im Stand der Forschung wird aufgezeigt, welche Arbeiten es zu diesem bzw. ähnlichen Themen gibt und welche Lücke diese Arbeit füllen soll. Hierbei sind vor allem sämtliche Vorgängerarbeiten des ITS ausfindig zu machen. Als Quellen sind bevorzugt Zeitschriftenartikel und Konferenzbeiträge statt Dissertationen anzugeben. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird eine konkrete Zielsetzung der Arbeit und die Vorgehensweise erarbeitet.

## 7.4 Grundlagen

Grundlagen, die zum Verständnis der weiteren Kapitel notwendig sind, werden beschrieben. Daher ist dieses Kapitel möglichst knapp zu gestalten, es handelt sich nicht um ein Lehrbuch! Um Platz zu sparen, können Verweise auf weiterführende Lehrbücher verwendet werden. Zum Beispiel:

„Im Rahmen dieser Arbeit kommt nur das  $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell zum Einsatz. Deshalb wird an dieser Stelle auf andere Turbulenzmodelle nicht weiter eingegangen. Diese werden ausführlich in Autor XY et al. (2017) erläutert.“

Aussagen in diesem Kapitel werden mit Quellenangaben versehen, wenn es sich nicht um allgemeines Wissen im Ingenieurwesen handelt. Herleitungen komplexer Formeln sind nur mit Bedacht zu verwenden. Um zu verhindern, dass der Leser gezwungen ist im Text vor- und zurückzuspringen, ist auf einen logischen Aufbau des Kapitels zu achten. Dies kann zum Beispiel nach Teilgebieten, chronologisch oder nach Komplexität gestaltet sein. Verweise auf noch kommende Textstellen sind zu vermeiden. Besser: „In Abschnitt 7.2 wurde gezeigt, dass ...“.

## 7.5 Material und Methoden

Hier wird der experimentelle Aufbau bzw. das verwendete numerische Modell beschrieben und die Vorgehensweise der Arbeit dargelegt. Es soll kein Benutzerhandbuch zur eingesetzten Software enthalten! Die folgenden exemplarischen Gliederungen können als Orientierungshilfe dienen:

Beispiel für numerische Arbeit:

- Geometrie
- Netz
- Anfangs- und Randbedingungen
- Verwendete Solver, Zeitschrittweite, Konvergenzkriterien, ...
- Einlaufrechnung, Mitteilungsdauer, ...

Beispiel für experimentelle Arbeit:

- Versuchsaufbau und Geometrie
- Eingesetzte Messtechnik
- Angabe der Messgenauigkeit
- Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung

## 7.6 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse beschrieben, diskutiert und ggf. mit anderen Daten aus der Literatur verglichen. Die Diskussion soll klären, ob die Daten sinnvoll sind, die Ergebnisse so zu erwarten waren und ob ungewöhnliche Beobachtungen sichtbar sind. Es ist auf eine übersichtliche Struktur zu achten, untersuchte Fälle sind konsistent und logisch zu benennen. Die Darstellung der Daten ist an die verwendete Messgenauigkeit anzupassen (z.B. ist eine Angabe von 314,394 575 K in den meisten Fällen nicht sinnvoll).

## 7.7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zusammenfassung ermöglicht Außenstehenden einen Überblick über den Inhalt der Arbeit und enthält insbesondere die Zielsetzung, die verwendete Methodik, Verfahren und Ansätze sowie die erzielten Ergebnisse. Daran schließt sich ein Ausblick an, der mögliche Verbesserungen bzw. weitere Arbeitsschritte aufzählt. Die Zusammenfassung ist das am häufigsten gelesene Kapitel (größt mögliche Sorgfalt!) und umfasst maximal zwei bis drei Seiten.

## 7.8 Anhang

Stören umfangreiche Ergebnisse oder Daten den Lesefluss, werden sie nur auszugsweise in den Kern der Arbeit übernommen. Der Rest kommt in den Anhang. Programmcode kommt nach Absprache mit dem Betreuer auch in den Anhang. Aktive Verweise auf den Anhang sind zu vermeiden. Nicht: „In Abbildung A.12 ist eine Skizze des Versuchsaufbaus dargestellt. Die Probe ist unterhalb des Messkopfes eingespannt und ... “. In diesem Fall ist die Abbildung zu wichtig für den Anhang und wird stattdessen besser im entsprechenden Kapitel platziert.

## 8 Weitere Hinweise

In diesem Kapitel wird auf einzelne Aspekte im Detail eingegangen. Zunächst wird die sprachliche Gestaltung behandelt, im weiteren Verlauf der Aufbau der Gliederung. Schließlich werden einige Besonderheiten zu Diagrammen, Abbildungen sowie Gleichungen erläutert.

### 8.1 Sprachliche Gestaltung

Das Ziel einer Abschlussarbeit ist, den untersuchten Sachverhalt möglichst einfach und leicht verständlich darzustellen. Komplizierte Satz- bzw. Wortstrukturen, die den Leser beeindrucken sollen, haben hier nichts zu suchen. Es ist sprachlich zwischen Gegenständen, beobachtbaren physikalischen Phänomenen, messbaren physikalischen Größen und dem Wert der physikalischen Größen zu unterscheiden. Eine korrekte Formulierung ist beispielsweise:

„Es findet Wärmeübertragung vom Fluid auf die Rohrleitung statt. Die Leitung ändert daher ihre Temperatur. Diese beträgt 815 °C“.

Falsch ist hingegen:

„Die Leitung hat 815 °C“ oder „Die Wärmeübertragung wurde gemessen“ und niemals: „Die Leitung wurde gemessen“.

Ein Gegenstand hat genau einen Namen. Synonyme sind zu vermeiden, falls nicht völlig klar ist, dass mit beiden Begriffen dasselbe gemeint ist. Es sind aussagekräftige und eindeutige Beschreibungen zu verwenden. Zum Beispiel können Begriffe wie stromauf oder stromab eine eindeutigere Beschreibung liefern als horizontal oder vertikal. Auch rechts oder links sowie oben oder unten werden besser durch funktionsbezogene Lagebezeichnungen ersetzt. Beispielsweise:

„Der Wirbel befindet sich stromab der rückspringenden Stufe im Strömungskanal. Zur Messung des Geschwindigkeitsfeldes im Wirbel wird eine Sonde quer zur Strömungsrichtung traversiert.“

Sätze, die sich über mehr als drei Zeilen erstrecken, stören den Lesefluss und werden besser in einzelne Sätze unterteilt. Zur Strukturierung von Sätzen zu Gedanken können Absätze eingesetzt werden. Sätze werden im Passiv konstruiert (kein „man“, „ich“, „wir“). Füllwörter, wie z.B. „jedoch, hierfür, ...“, sind zu vermeiden. Diese beinhalten keine Information und sind daher nicht notwendig. Lange Listen oder Aufzählungen sind ebenfalls zu vermeiden.

Eine korrekte Rechtschreibung und Interpunktion ist verpflichtend (Rechtschreibreform vom August 2006). Daher immer ein Rechtschreibprogramm nutzen! Als Dezimaltrennzeichen wird das Komma verwendet (1,3 km). Bis auf Vorgehensweise und Zusammenfassung werden alle Kapitel im Präsens verfasst.

## 8.2 Gliederung

### 8.2.1 überflüssige Überschrift

Auf einen Punkt x.y.1. folgt immer ein Punkt x.y.2. Wenn nicht, so ist der Punkt x.y.1 unnötig. Die Untergliederung auf der nächst höheren Ebene ist dann ausreichend. Empfehlung: Nach einer Kapitel- (Abschnitts-)Überschrift folgt i.d.R. Text und nicht etwa eine weitere Überschrift oder eine Abbildung. Gliedert sich das Kapitel X in X.1 und X.2, so könnte zu Beginn des Kapitels X z.B. stehen, was im Kap. X besprochen werden soll und wie sich dies auf die Unterkapitel aufteilt, warum die Themen des Kapitels X wichtig sind oder/und wie diese Themen mit dem Rest der Arbeit zusammenhängen. Die Gliederung ist so zu strukturieren, dass sie nicht mehr als drei Unterebenen (3.2.1, 3.2.1.1) enthält, vor allem nicht im Inhaltsverzeichnis. Treffende Überschriften wählen. Nicht „Messaufbau“, sondern „Laseroptische Methode zur Untersuchung des Streuverhaltens“.

## 8.3 Literaturverweise

Alle zur Durchführung der Arbeit und zu deren Nutzen herangezogenen Quellen sind im Text zu beschreiben oder zumindest zu erwähnen und in einem Literaturverzeichnis am Ende des Hauptdokumentes aufzulisten. Außerdem sollten sie dem Betreuer in einer geeigneten Form verfügbar gemacht werden. Ist eine Quelle nur schwierig oder kurz verfügbar (z.B. weil ein Buch nur für kurze Zeit ausgeliehen werden darf), so ist eine Kopie der für die Arbeit wesentlichen Passagen anzufertigen. Internetquellen (auch Wikipedia) sind nicht als seriöse Quelle geeignet und mit adäquaten Fachliteraturquellen zu ersetzen. Falls die Angabe im Ausnahmefall notwendig ist, wird die Quelle in Form einer html-Datei oder eines Screenshots festgehalten. Direkte Zitate der Form:

„In modernen Hochleistungstriebwerken betragen die Kühlluftmassenströme bereits über 30% des gesamten Massenstroms der Kernmaschine.“ (Baldauf (2001)),

sind zu vermeiden.

## 8.4 Abbildungen und Tabellen

Abbildungen werden im Text erläutert: Abbildung 8.1 lassen sich die physikalischen und geometrischen Eigenschaften des berechneten Gebiets entnehmen. Daher ist die Abbildung so platziert, dass sie nach dem Text erscheint, in dem diese beschrieben werden. Ebenso wird die Aussage der Abbildung erläutert: Die Fluid begrenzenden Flächen sind blau dargestellt, ... . Passiv konstruieren: Nicht „Das Bild 2.4 zeigt“, sondern „In Bild 2.4 ist gezeigt“.

Abbildungen helfen dem Autor, seine Erkenntnisse zu erläutern oder zu belegen. Diese Verbindung zwischen Abbildung und Aussage muss deutlich werden, sonst ist die Abbildung zu streichen. Alle Grafiken, Abbildungen und Tabellen müssen im Text referenziert und besprochen werden.



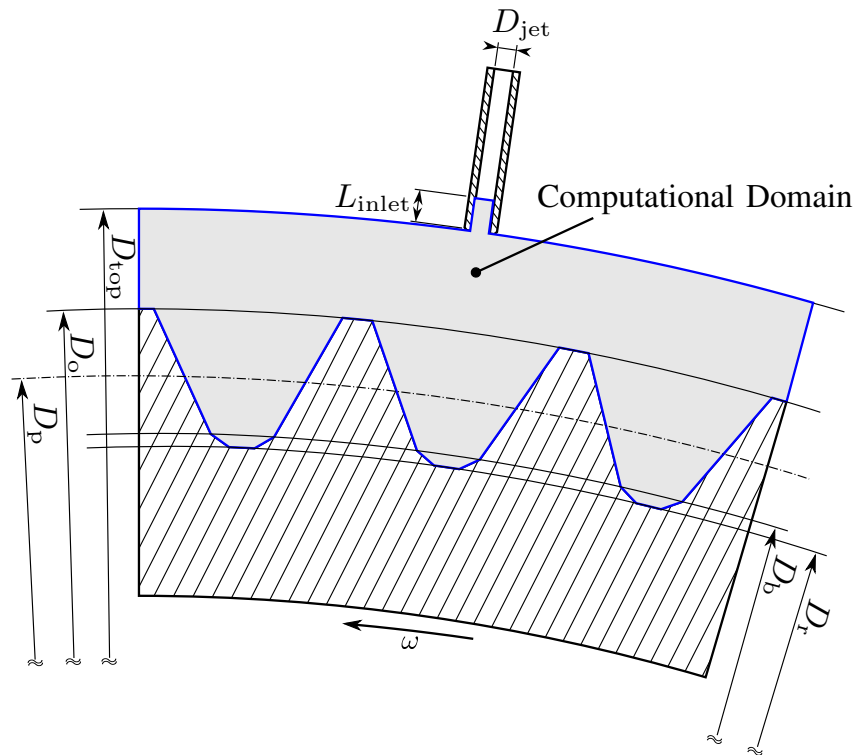


Figure 8.1: Querschnitt durch das berechnete Segment des Zahnrads, Keller et al. (2016)

Die Referenz ist durch eine fortlaufende Nummerierung der Objekte eindeutig vorzunehmen. Dabei werden Objekte gleichen Typs wie z.B. Abbildungen, Gleichungen und Tabellen jeweils gesondert nummeriert. Auf ein einheitliches Erscheinungsbild und Lesbarkeit achten (Textgröße, Auflösung, Größe angepasst an DIN A4, Vektorgrafiken wenn möglich). Abbildungen, die nicht selbst erstellt wurden, müssen ebenfalls zitiert werden. Wenn sie verändert wurden: „Abbildung nach Schoof (2014)“. Im Gegensatz zu Abbildungen besitzen Tabellen keine Unterschriften, sondern Überschriften (siehe Tabelle 8.1). Die Überschriften sind möglichst aussagekräftig und eindeutig zu gestalten. Weitere Tabellenbeispiele werden von Markus Püschel<sup>1</sup> aufgezeigt.

<sup>1</sup><https://www.inf.ethz.ch/personal/markusp/teaching/guides/guide-tables.pdf>

Table 8.1: Für die Modellierung verwendete Randbedingungen

Parameter	Variable	Value
Hot gas temperature	$T_h$	490 K
Coolant temperature	$T_c$	270 K
Inlet Re	$Re$	$4.66 \times 10^5$
Inlet Velocity	$u_h$	33 m/s
Tu Intensity	$Tu$	10 %
Operating Points	$DP$	1

## 8.5 Diagramme

Alle gezeigten Diagramme sollten ein einheitliches Erscheinungsbild aufweisen. Achsen sind im Allgemeinen mit der physikalischen Größe und ihrer Einheit sowie Werte der physikalischen Größe zu beschriften. Schriftzeichen in Diagrammen sind ungefähr so groß wie im Text. Skalierung der Achsen sinnvoll wählen, um leeren Raum im Diagramm zu vermeiden. Es ist unter Umständen sinnvoll, die Skalierung einer Achse über mehrere Diagramme hinweg gleich zu wählen, wenn die Daten in den Diagrammen vergleichbar sein sollen (siehe Abbildung 8.2). Eventuell ist auch eine logarithmische Auftragung sinnvoll. Diagramme besitzen eine Legende. Sinnvolle min./max. Werte festlegen (nicht 0,2845 bis 9,385, sondern besser 0 bis 10). Ein Raster („grid“) kann hilfreich sein. Diagramme farblich so gestalten, dass sie auch in schwarzweiß lesbar sind. In Abbildung 8.2 sind neben der farblichen Gestaltung zusätzlich unterschiedliche Marker und Linienarten eingesetzt. In der Regel ist der Hintergrund weiß, Sonderformatierungen (Hintergründe, Schriftarten) sind nur einzusetzen, wenn Vorteile daraus entstehen. Bei der Farbgebung auf die Erscheinungsform achten, zum Beispiel unterscheidet sich die Darstellung auf dem Beamer von der einer schriftlichen Ausarbeitung. Diagramme besitzen keinen alles umschließenden Rahmen. Abbildung möglichst einfach und leicht verständlich gestalten, in der Regel nicht mehr als drei Linien im Diagramm.

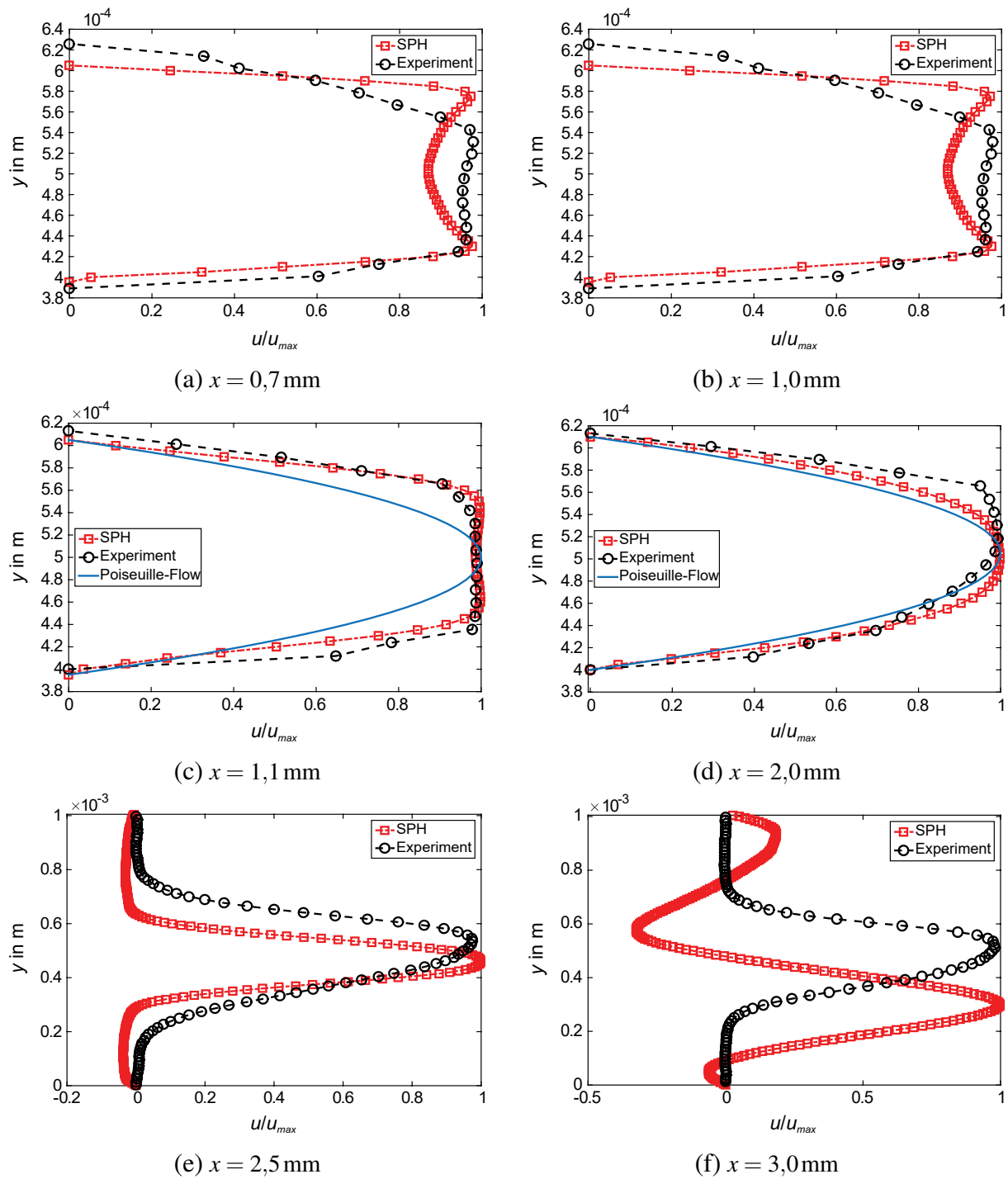


Figure 8.2: Vergleich zwischen experimentellen (kreisförmig) und berechneten (quadratisch) Werten, modifiziert nach Wieth et al. (2016). Da die Diagramme aus einer englischen Veröffentlichung stammen, sind die Dezimaltrennzeichen fälschlicherweise Punkte

## 8.6 Gleichungen

Alle Formelzeichen, die in einer Gleichung auftreten und nicht schon im vorangehenden Text definiert wurden, sind zu benennen und zu erläutern. In der Literatur etablierte Formelzeichen zur Beschreibung von physikalischen Größen wählen. Ein Formelzeichen beschreibt genau eine physikalische Größe. Jede physikalische Größe wird mit genau einem Formelzeichen beschrieben. Der Übersichtlichkeit halber mit Indizes und eingängigen Namen arbeiten. Gleichungen werden zentriert, nummeriert und sind Teil eines Satzes (besitzen also Satzzeichen). Zum Beispiel beschreibt der Impulssatz der Strömungsmechanik,

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{I}}{dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho \vec{w} dV}_{\text{instationär}} + \underbrace{\iint \rho \vec{w} (\vec{w} \cdot \vec{n}) dA}_{\text{stationär}}, \quad (8.1)$$

die zeitliche Änderung des Impulses  $\frac{d\vec{I}}{dt}$  innerhalb eines Kontrollvolumens  $V$ , mit der Dichte  $\rho$ , dem Geschwindigkeitsvektor  $\vec{w}$ , der Oberfläche  $A$  und dem äußeren Oberflächennormalen-Einheitsvektor  $\vec{n}$ . Die Änderung des Impulses entspricht der Summe der äußeren Kräfte  $\sum \vec{F}$ .

Formelzeichen werden immer zusammen mit einer Bezeichnung erwähnt. Die Angabe des Werts einer physikalischen Größe erfolgt immer mit der entsprechenden Einheit:

$$\Delta T = 452,69 \text{ K.}$$

Zwischen Größe und Einheit, wie 2,0 mm, wird ein halbes Leerzeichen gesetzt (umbruchgeschütztes Leerzeichen verwenden bzw.  $\text{\LaTeX}$ -Paket siunitx). Einheiten und Operatoren, wie „log“, werden nicht kursiv gesetzt. Innerhalb der Arbeit auf eine einheitliche Darstellung für Vektoren, Tensoren etc. achten und SI-Einheiten verwenden.

## Bibliography

- Baldauf, S. (2001): *Filmkühlung thermisch höchstbelasteter Oberflächen : Korrelation thermographischer Messungen*. Dissertation, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (T.H.).
- Bamer, F. und Oswatitsch, M. (1993): *Kraftstoffzuteilung beim Ottomotor*. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik.
- Denecke, J. (2008): *Rotierende Labyrinthdichtungen mit Honigwabenanstreifbelägen : Untersuchung der Wechselwirkung von Durchflussverhalten, Drallverlauf und Totaltemperaturänderung*. Dissertation, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (T.H.).
- Keller, M., Braun, S., Wieth, L., Chaussonnet, G., Dauch, T., Koch, R., Höfler, C. und Bauer, H.-J. (2016): *Numerical Modeling of Oil-Jet Lubrication for Spur Gears using Smoothed Particle Hydrodynamics*. In: *Proceedings of the 11th international SPHERIC Workshop*.
- Schoof, E. (2014): *Grobstruktursimulation einer Filmkühlbohrung mit Hilfe von OpenFOAM*. Masterarbeit, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Schrüfer, E. (1990): *Signalverarbeitung – Numerische Verarbeitung digitaler Signale*. Carl Hanser Verlag, München / Wien.
- Wieth, L., Kelemen, K., Braun, S., Koch, R., Bauer, H-J und Schuchmann, HP (2016): *Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) simulation of a high-pressure homogenization process*. Microfluidics and Nanofluidics, Bd. 20, S. 1–18.
- Winklhofer, E. und Plimon, A. (1991): *Monitoring of Hydrocarbon Fuel-Air Mixtures by Means of a Light Extinction Technique in Optically Accessed Research Engines*. Optical Engineering, Bd. 30, S. 1262 – 1268.

# Appendix

## A.1 Anhang 1

Table A.1: Simulationsergebnisse, die den Lesefluss stören.

$w = 8$			$w = 16$			
	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$
<i>dir = 1</i>						
<i>c</i>	0,0790	0,1692	0,2945	0,3670	0,7187	3,1815
<i>c</i>	-0,8651	50,0476	5,9384	-9,0714	297,0923	46,2143
<i>c</i>	124,2756	-50,9612	-14,2721	128,2265	-630,5455	-381,0930
<i>dir = 0</i>						
<i>c</i>	0,0357	1,2473	0,2119	0,3593	-0,2755	2,1764
<i>c</i>	-17,9048	-37,1111	8,8591	-30,7381	-9,5952	-3,0000
<i>c</i>	105,5518	232,1160	-94,7351	100,2497	141,2778	-259,7326

## A.2 Anhang 2

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adip-

iscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.