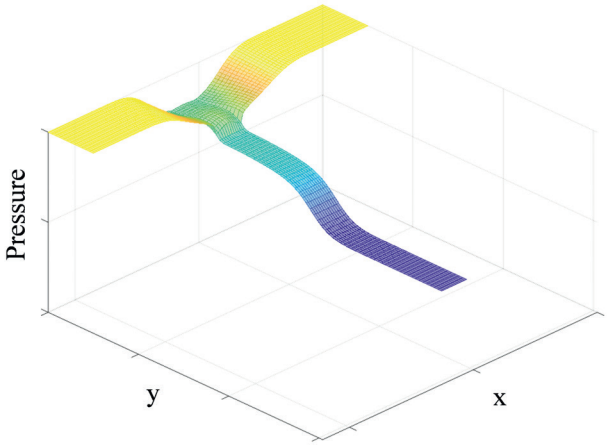
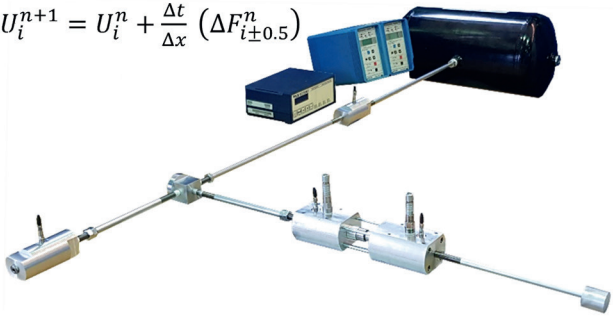
Reihe
Fluidtechnik

Filipp Kratschun

Transient Pneumatic System Simulation



$$U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\Delta F_{i\pm 0.5}^n\right)$$



TRANSIENT PNEUMATIC SYSTEM SIMULATION

Transiente Simulation pneumatischer Systeme

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Filipp Maksimovic Kratschun

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2020

Reihe Fluidtechnik

D / Band 99

Filipp Kratschun

Transient Pneumatic System Simulation

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2020
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7399-7
ISSN 1437-8434

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Sehe das Ziel, sehe kein Hindernis.

— KOVROV
Charodei

VORWORT UND DANKSAGUNG

Das angeführte Zitat fasst meine fünf Jahre Schaffenszeit am ifas perfekt zusammen. Obwohl sich die Hindernisse oft als doch nicht vernachlässigbar erwiesen und es mehr Energie bedurfte, diese zu überwinden als ursprünglich angenommen, waren es fünf tolle Jahre, in denen ich sehr viel gelernt habe. Während dieser Zeit ist auch die vorliegende Arbeit entstanden.

Zunächst möchte ich mich bei Professor Murrenhoff und Professorin Schmitz sowohl für die Betreuung der Arbeit als auch für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Der Freiraum bot mir die Möglichkeit, meiner Kreativität freien Lauf zu lassen, und es machte unheimlich viel Spaß, in einem tollen Team zu arbeiten. Für den Vorsitz und den Pflichtbeisitz danke ich Professor Jeschke und Professor Olivier.

Als ich vor fünf Jahren die Vorworte der am ifas verfassten Dissertationen las, war immer wieder davon die Rede, dass die Atmosphäre im Kollegium einzigartig sei. Nach fünf Jahren kann ich dem uneingeschränkt zustimmen. Das Gemeinschaftsgefühl und das Maß an Hilfsbereitschaft im Kollegium ist unvergleichlich und ich werde es mehr als vermissen. Aus dem Kreis der wissenschaftlichen Mitarbeiter möchte ich hier stellvertretend meinen zwei Bürokollegen Monsieur Jardinier und Stöpa, Tobi, Mäxchen, Fifi, Rapha, Chewy, Julian, Marco und Flo danken. Insbesondere sind hier die DABs und die Moscow Mules mit Tobi hervorzuheben. Unter den Festangestellten gilt mein Dank dem IT- und Werkstattteam, hier stellvertretend Heinz und Klaus, für die lösungsorientierte Arbeitsweise. Beim Sekretariat und der Buchhaltung möchte ich mich insbesondere bei Jutta und Morena dafür bedanken, dass sie mit meiner strikten Bürokratieabneigung so gut zurechtkamen und mir diesbezüglich das Leben immer so einfach wie möglich machten.

Mit meinen Hiwis hatte ich scheinbar großes Glück, denn ich konnte mich immer auf sie verlassen und sie haben maßgeblich direkt oder indirekt bei der Erstellung der Arbeit mitgewirkt. Aus einigen von ihnen sind Kollegen und Freunde geworden. Stellvertretend danke ich Joscha, Yannick, Sandro, Ivan und Jens für die verantwortungsbewusste Art, die gestellten Aufgaben zu erledigen.

Da ich projektbedingt viel Zeit bei der Fluidon als Mitarbeiter X verbracht habe und dort immer unterstützt wurde, bedanke ich mich herzlich bei dem Fluidon Team,

hier stellvertretend bei Heiko für das von ihm erlernte Debugging sowie die Unterstützung über das Projekt hinaus und bei Enrico, für die zahllosen Fachdiskussionen.

Für das Lektorat der Arbeit möchte ich mich bei Enrico Pasquini, Julian Angerhausen, Kai Reichartz und meiner Tante Karolina bedanken.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie und insbesondere meiner Mutter, die mich nicht nur im Studium uneingeschränkt unterstützt hat, sondern mir auch das anfangs angeführte Zitat immer vorlebte. Von Ihr habe ich den Ehrgeiz und die Begeisterungsfähigkeit, die es zweifelsohne für die Anfertigung einer solchen Schrift braucht. Meinem lieben Bruder Wowchik sowie meiner Freundin Josi danke ich vor allem für die Unterstützung während der Endphase der Arbeit und dafür, dass es euch in meinem Leben gibt.

Aachen, April 2020 Filipp M. Kratschun

ABSTRACT

In the age of digitization simulation models play a central role. For the time-efficient design or condition monitoring of complex systems, precise numerical calculation models are required because such systems cannot be calculated analytically. This applies in particular to highly dynamic systems using compressible gas as operating medium, since the underlying mathematical description is based on equations of gas dynamics. Examples can be found in process engineering, pneumatics and combustion engineering.

The aim of this thesis is the development of a transient simulation library for the time-efficient calculation of gas-powered networks consisting of the following components: pipe, pipe connector, valve, pipe with discontinuous cross-sectional extension, reservoir, L-connector, T-connector and cylinder.

The components are locally resolved in at least one dimension. For components where this is not possible due to complex physical behavior, the local discretization is carried out in two dimensions. The calculation core of each component is based on an explicit first order finite volume method. The validation of the components is carried out in two steps: analytically applying closed solution cases and experimentally on a test bench. The analytical validation serves as proof that the components provide physically correct results. Experimental validation is used to demonstrate the accuracy of individual components and systems consisting of several components.

The developed component library achieves an accuracy of more than 95 % compared to the experiment. The computing time per meter system's length is fifteen times the simulation time. However, this can be reduced considerably in future work. This would make it possible to realize real-time capable condition monitoring of complex gas-powered systems.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Zeitalter der Digitalisierung spielen Simulationsmodelle eine zentrale Rolle. Für eine zeiteffiziente Auslegung oder Zustandsüberwachung komplexer Systeme braucht es genaue numerische Rechenmodelle. Die zunehmende Komplexität der Systeme erlaubt nicht länger eine analytische Rechnung. Dies gilt insbesondere für hochdynamische Systeme, deren Betriebsmedium kompressibles Gas ist und deren zugrundeliegende mathematische Beschreibung auf Gleichungen der Gasdynamik fußt. Beispiele finden sich in der Prozesstechnik, Pneumatik und der Verbrennungstechnik.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Simulationsbibliothek zur zeiteffizienten Berechnung gasbetriebener Netzwerke bestehend aus den folgenden Komponenten: Rohr, Rohrverbinder, Ventil, Rohr mit unstetiger Querschnittserweiterung, Reservoir, L-Stück, T-Stück und Zylinder. Die Darstellung der Herangehensweise ermöglicht es dem Leser dieser Arbeit, jede Komponente nachprogrammieren zu können.

Die Komponenten werden in mindestens einer Dimension örtlich aufgelöst. Bei Komponenten, bei denen dies aus physikalischen Gründen nicht zulässig ist, erfolgt die örtliche Diskretisierung in zwei Dimensionen. Der Berechnungskern jeder Komponente basiert auf einem expliziten Finite-Volumen-Verfahren erster Ordnung. Die Validierung der Komponenten erfolgt in zwei Stufen: analytisch anhand bekannter Grenzfälle und experimentell an einem Prüfstand. Die analytische Validierung dient als Nachweis dafür, dass die Komponenten physikalisch korrekte Ergebnisse liefern. Mit Hilfe der experimentellen Validierung lässt sich zeigen, welche Abbildungsgenauigkeit einzelner Komponenten sowie Systeme bestehend aus mehreren Komponenten erreicht werden kann.

Die entwickelte Komponentenbibliothek erreicht im Vergleich zum Experiment eine Genauigkeit von über 95 %. Die Rechendauer bezogen auf einen Meter Länge des Systems beträgt das fünfzehnfache der Simulationszeit. Diese kann jedoch in zukünftigen Arbeiten erheblich reduziert werden. Dadurch ließe sich eine echtzeitfähige Zustandsüberwachung komplexer gasgetriebener Systeme realisieren.

TABLE OF CONTENTS

I. NOMENCLATURE & ABBREVIATIONS IV

1. INTRODUCTION 1

1.1 Motivation 1
1.2 Defined Goals 2
1.3 Structure and Methodology 2

2 MODELLING OF HIGHLY DYNAMIC GASEOUS SYSTEMS 3

2.1 Lumped Parameter Modelling 3
2.2 CFD Simulation 7
2.3 Concluding Remarks 9

3 ONE DIMENSIONAL PNEUMATIC COMPONENTS 11

3.1 Straight Pipe 11
3.1.1 Solver 11
3.1.2 Friction Losses 17
3.1.3 Heat Transfer 18
3.2 Pipe Connector 20
3.2.1 Numerical Scheme 21
3.3 Open and Closed Ending 22
3.3.1 Ghost Cell Concept Open Ending 22
3.3.2 Ghost Cell Concept Closed Ending 23
3.4 Pipe with Discontinuous Cross Section Jump 25
3.4.1 Approximate Curvature 26
3.4.2 Solver 27
3.5 Orifice 31
3.6 Cylinder 35
3.7 Concluding Remarks 39

4 VALIDATION AND RESULTS OF 1D COMPONENTS 40

4.1 Analytical Validation 40
4.1.1 Open and Closed Ending 40
4.1.2 Discontinuous Cross Section Jump 44
4.1.3 Cylinder 49

4.2 Experimental Validation 57
4.2.1 Pipe, Tank and Valve 57
4.2.2 Pipe, Tank, Valve and Closed Ending 60
4.2.3 Pipe, Tank, Valve, Cross-Sectional Jump and Open Ending 63
4.2.4 Pipe, Tank, Valve, Cross-Sectional Jump and Closed Ending 65
4.2.5 Cylinder and Closed Ending 67
4.2.6 Experimental Accuracy and Reproducibility 69
4.3 Concluding Remarks 71

5 SEMI 2D COMPONENTS 72

5.1 T-Connector 72
5.1.1 Numerical Scheme 73
5.1.2 Parameterization of the 2D Numerical Scheme 74
5.2 L-Connector 76

6 FULLY 2D COMPONENTS 77

6.1 T-Connector 77
6.1.1 Meshing and Coupling for Equal Diameters 77
6.1.2 Meshing for Different Diameters 82
6.2 L-Connector 86
6.2.1 Meshing 87

7 VALIDATION OF SEMI 2D AND FULLY 2D COMPONENTS 88

7.1 Analytical Validation 88
7.1.1 Analytical Validation T-Connector 88
7.1.2 Analytical Validation L-Connector 92
7.2 Experimental Validation 95
7.2.1 L-Connector 95
7.2.2 T-Connector with Equal Diameters 101
7.2.3 T-Connector with Unequal Diameters 106

7.3 Concluding Remarks 110

8 ACCURACY AND TIME EFFICIENCY 111

8.1 System Including 1D Components Only 111

8.2 System Including 2D Components 112

8.3 Concluding Remarks on Precision and Computational Time 117

9 SUMMARY AND OUTLOOK FOR FUTURE WORKS 118

II. BIBLIOGRAPHY IX

III. ANNEX XV

I. NOMENCLATURE & ABBREVIATIONS

Symbols

A	Area	m^2
$Anod$	Anti node	$-$
a	Speed of sound	$\frac{m}{s}$
$\tilde{a}$	Averaged speed of sound	$\frac{m}{s}$
C	Spring stiffness	$\frac{N}{m}$
c	Characteristic speed	$\frac{m}{s}$
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy number	$-$
D	Diameter	m
d	Diameter	m
d_0	Initial diameter	m
E	Inner Energy	$\frac{J}{m^3}$
e	Specific thermal energy	$\frac{J}{kg}$
F	Force	N
$\mathcal{F}$	Area specific force	$\frac{N}{m^2}$
f	Frequency	Hz
G	Flux vector in y-direction	$-$
H	Specific enthalpy and kinetic energy flux	$\frac{J}{kg}$
$\dot{H}$	Area specific enthalpy and kinetic energy flux	$\frac{W}{m^2}$

$\tilde{H}$	Averaged enthalpy and kinetic energy flux	$\frac{J}{kg}$
I	Momentum	$\frac{kgm}{s}$
i	Numerical x-coordinate	$-$
K	Bulk Modulus	Pa
$\tilde{K}$	Averaged Eigenvector	$-$
$\tilde{\mathcal{K}}$	Glaister Averaged Eigenvector	$-$
L	Amount of discretisations in x-direction	$-$
L^*	Length	m
M	Amount of discretised volumes	$-$
$\dot{m}$	Area specific mass flow rate	$\frac{kg}{sm^2}$
N	Amount of discretised masses	$-$
n	Order of resonance	$-$
n	Polytropic exponent	$-$
Nod	Node	$-$
Nu	Nusselt Number	$-$
Pr	Prandtl Number	$-$
p	Pressure	Pa
R	Specific gas constant	$\frac{J}{kgK}$
$\mathcal{R}$	Glaister density	$\frac{kg}{m}$
R_h	Horizontal radius	m
Re	Reynolds Number	$-$
r	Degree of reflection	$-$

S	Source term	$-$
T	Temperature	K
t	Time	s
U	Vector of conservative variables	$-$
$\mathcal{U}$	Volume flow rate	$\frac{m^3}{s}$
u	Particle velocity in x-direction	$\frac{m}{s}$
$\tilde{u}$	Averaged particle velocity in x-direction	$\frac{m}{s}$
v	Particle velocity in y-direction	$\frac{m}{s}$
W	Amount of discretisations in y-direction	$-$
z	Diameter ratio	$-$
α	Wave strength	$-$
$\tilde{\alpha}$	Averaged wave strength	$-$
β	Wave strength due to geometry	$-$
$\tilde{\beta}$	Averaged wave strength due to geometry	$-$
γ	Relative simulation length	$\frac{1}{m}$
$\mathcal{E}$	Glaister internal energy	$\frac{J}{m}$
ϵ	Compression ratio	$-$
ζ	Numerical coordinate	$-$
η	Dynamic viscosity	$\frac{kg}{ms}$
Θ	Degree of opening	$-$
κ	Heat capacity ratio	$-$

Λ	Diagonal matrix	$-$
λ	Eigenvalue in x-direction	$\frac{m}{s}$
$\tilde{\lambda}$	Averaged Eigenvalue in x-direction	$\frac{m}{s}$
ξ	Eigenvalue in y-direction	$\frac{m}{s}$
Π	Pressure ratio	$-$
$\mathcal{P}$	Glaister pressure	N
ρ	Density	$\frac{kg}{m^3}$
$\tilde{\rho}$	Averaged density	$\frac{kg}{m^3}$
σ	Specific 2D components' length	$-$
φ	Angle	$^\circ$
χ	Steepness factor	$-$
Ψ	Critical flow function	$-$
ψ	Position of 99% of real curvature	$-$
Ξ	Ratio between length and diameter	$-$
ω	Eigen angular frequencies	$\frac{1}{s}$

Abbreviations

1D	One-dimensional
2D	Two-dimensional
CFD	Computational fluid dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CNG	Compressed natural gas

CS	Circular segment
CSD	Circular segment difference
CSJ	Cross section jump
EE	Euler Equations
EV	Eigenvalues
FL	Friction losses
FV	Finite volume
FVS	Flux Vector Splitting
HT	Heat transfer
NS	No shear waves
RP	Riemann Problem
RS	Replaced segment geometry
VC	Vena contracta