

Thorben Hans Jürgen Schröder

**Advanced computational aeroacoustics
based on hydrodynamic/acoustic
splitting**

Band 28



**Institut für
Modellierung und
Berechnung**

Advanced computational aeroacoustics based on hydrodynamic/acoustic splitting

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Thorben Hans Jürgen Schröder

aus
Henstedt-Ulzburg

2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Rung

Tag der mündlichen Prüfung: 04.07.2019

Schriftenreihe des Instituts für
Modellierung und Berechnung der
Technischen Universität Hamburg

Band 28

Thorben Hans Jürgen Schröder

**Advanced computational aeroacoustics based
on hydrodynamic/acoustic splitting**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2019

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg
Institut für Modellierung und Berechnung
Denickestraße 17
21073 Hamburg

Telefon: 040/42878-3032
Fax: 040/42878-4353
E-Mail: estorff@tuhh.de
Internet: <http://www.tuhh.de/mub>

Copyright Shaker Verlag 2019

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 978-3-8440-6873-3
ISSN 1860-8221

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Modellierung und Berechnung an der Technischen Universität Hamburg entstanden.

An erster Stelle möchte ich mich für die Möglichkeit zur Promotion bei meinem Doktorvater Professor Otto von Estorff bedanken. In der Forschung gab er mir stets die inspirierende und überaus motivierende Freiheit, eigenen Ideen uneingeschränkt nachzugehen und vieles hinterfragen zu dürfen. Er stand mir dabei immer mit wertvollem Rat und viel Unterstützung zur Seite.

Professor Thomas Rung gilt mein Dank für die Übernahme des Zweitgutachtens meiner Dissertation und die damit einhergehende umfangreiche Auseinandersetzung mit meiner Arbeit. Bei Professor Michael Schlüter bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die immer konstruktive und angenehme Arbeitsatmosphäre, viele anregende fachliche Diskussionen und vielfältige Unterstützung möchte ich mich bei allen Mitarbeitenden des Institutes für Modellierung und Berechnung bedanken, die mich in meiner Zeit dort begleitet haben. Ganz besonders hervorheben möchte ich dabei Patrick Cordes und Joscha Piepiorka, die viel fachliche Inspiration lieferten und mich in unzähligen Situationen mit Rat und Tat unterstützten. Weiterhin habe ich besonders die Zusammenarbeit und die Diskussionen mit Matthias Ram, Dr. Sören Keuchel und Dr. Kristof Heitmann genossen.

Ein Dank gilt auch Dr. Thilo Michels, der mich zu Beginn meiner Zeit am Institut bei der Einarbeitung in die Thematik der Strömungsakustik unterstützt hat.

Während meiner Forschungstätigkeit habe ich mich immer wieder gefreut, mit Studenten zusammenarbeiten zu dürfen, die ich im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder als studentische Hilfskräfte betreute. Für besonders engagierte und gute Arbeit möchte ich mich bei Joscha Piepiorka, Henning Lohmann und Björn Niedergesäß bedanken.

Von ganz besonderer Bedeutung war für mich der großartige Rückhalt, den ich abseits der Arbeit im Privaten genossen habe. Daher möchte ich mich aus tiefstem Herzen bei meiner Freundin Susi, bei meinen Eltern und bei meiner Schwester bedanken. Sie haben mich immer sehr unterstützt und mir motivierend zur Seite gestanden.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit trägt zur Entwicklung und zum Verständnis von „hydrodynamic/acoustic splitting“ (HAS)-Ansätzen in der hybriden numerischen Strömungsakustik bei. Diese Verfahren eignen sich besonders für den ansonsten problematischen Bereich niedriger Mach-Zahlen. Sie verhalten sich hinsichtlich zahlreicher Aspekte grundsätzlich anders als viele alternative Verfahren.

Die Grundidee des HAS und die daraus resultierenden Eigenschaften sowie drei ausgewählte HAS-Methoden werden detailliert untersucht. Ein Schwerpunkt liegt auf sogenannten Wirbelmoden in den Störungsgrößen, welche die Stabilität und oft auch die Genauigkeit der Verfahren beeinflussen können. Es wird eine erweiterte Version eines HAS-Ansatzes vorgeschlagen, welche eine partielle Modellierung von Wirbeleffekten beinhaltet. Für Analysezwecke wird außerdem eine explizite Filterung von Wirbelanteilen mittels der Helmholtz–Hodge-Zerlegung realisiert. Der Einfluss einiger oft vernachlässigter Gleichungsterme kann so aufgezeigt werden.

Da die Strömungs- und die Akustiksimulation getrennte Schritte in der hybriden numerischen Strömungsakustik sind, müssen Quelldaten zwischen den Teilmodellen übertragen werden. Daher wird eine Analyse der Einflüsse durch die Wahl der Rekonstruktionsmethoden vorgestellt. Nach einer theoretischen Studie der HAS-Spezifika werden die räumliche und die zeitliche Rekonstruktion von Quellfeldern betrachtet. Es wird festgestellt, dass der HAS-Ansatz recht unempfindlich auf Fehler bei der räumlichen Rekonstruktion reagiert, eine geeignete zeitliche Rekonstruktion aber entscheidend sein kann.

In der hybriden numerischen Strömungsakustik können Probleme auftreten, wenn die Domäne der Strömungssimulation kleiner ist als die Domäne des Akustikmodells. Die daraus resultierende Diskontinuität der Quellfelder auf dem Akustikgitter kann gravierende Folgen haben. Es wird in dieser Arbeit gezeigt, dass bestehende Ansätze zur Behandlung diskontinuierlicher Quellfelder bei HAS-Methoden in einigen Fällen unbrauchbar sind. Als Alternative wird daher eine Strategie zur Fortsetzung der Strömungsdruckfelder in den äußeren akustischen Ausbreitungsbereich vorgeschlagen. Dieser neuartige Ansatz zeigt vielversprechende Ergebnisse.

Zum Abschluss der vorliegenden Arbeit werden eine Verifikation und eine Validierung der verwendeten Methoden und Konzepte vorgestellt. Der einfache Fall eines zweidimensionalen Zylinders in laminarer Queranströmung führt zu einer aussagekräftigen Verifizierung des akustischen Modells. In einem zweiten Test wird die Akustik auf Basis einer skalenauflösenden Strömungssimulation untersucht. Dabei handelt es sich um eine turbulent umströmte Zylinder-Flügelprofil-Anordnung. Experimentelle Daten des Falles werden zur Validierung genutzt.

Abstract

The present thesis contributes to the development and the understanding of hydrodynamic/acoustic splitting (HAS) approaches in hybrid computational aeroacoustics. The discussed methods are particularly suitable for the otherwise problematic range of low Mach numbers. Approaches based on the HAS behave differently than other methods in many respects.

The basic idea of the HAS and the resulting characteristics, as well as three selected HAS methods, are investigated in detail. One focus is on vortical modes of the perturbed quantities, which may have a major effect on the stability and the accuracy. Furthermore, an extended version of one HAS approach is proposed, which includes partial modeling of vortical effects. An explicit filtering of vortical components by means of the Helmholtz–Hodge decomposition is realized for analysis purposes. The influence of some often neglected equation terms can thus be shown.

Since the flow simulation and the acoustics simulation are separate steps in hybrid computational aeroacoustics, source data must be transferred between the two sub-models. Therefore, an analysis of influences due to the choice of reconstruction methods is presented. After a theoretical study of the HAS specifics, the spatial and the temporal reconstruction of source fields are considered. It is found that the HAS approach is rather insensitive to errors made in the spatial reconstruction, but appropriate temporal reconstruction is shown to be critical.

In hybrid computational aeroacoustics, issues may occur if the domain of the flow simulation is smaller than the domain of the acoustics model. The arising discontinuity of the source fields on the acoustics mesh can impair the result quality. The present study shows that existing approaches to the handling of discontinuous source fields are not always adequate for the use with the primary HAS source term. Therefore, a strategy to continue the flow pressure field into the outer acoustic propagation domain is proposed as an alternative. This novel approach shows promising results.

A verification and a validation of the studied methods and concepts are presented at the end of this thesis. The simple case of a two-dimensional cylinder in laminar cross-flow results in a meaningful verification of the acoustics part of the model. In a second test, the acoustics based on a scale resolving flow simulation is considered. The turbulent flow around a cylinder-airfoil configuration is employed, and experimental data demonstrate the validity of the basic model.

Contents

Nomenclature	vii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 State of the art	1
1.3 Objective and outline	7
2 Modeling basis	9
2.1 Fluid dynamics	9
2.1.1 General compressible flow	9
2.1.2 Incompressible flow	11
2.1.3 Turbulence modeling	14
2.2 Flow field decomposition	16
2.2.1 Helmholtz–Hodge decomposition	16
2.2.2 Elimination of vorticity modes	18
2.3 Procedure of hybrid computational aeroacoustics	18
3 Numerical approach	21
3.1 Spatial discretization	21
3.1.1 Finite volume method	22
3.1.2 Discretization of integrals	23
3.2 Temporal discretization	24
3.3 Non-reflecting boundaries	26
3.4 Spurious wave filtering	27
3.5 Numerical demonstration cases	28
3.5.1 Flow past a circular cylinder	29
3.5.2 Cylinder-airfoil configuration	30
4 Hydrodynamic/acoustic splitting	33
4.1 General idea and common features	33
4.2 Closure of the system of equations	36

4.3	Methods	38
4.3.1	Expansion about incompressible flow	38
4.3.2	(Linearized) perturbed compressible equations	39
4.3.3	Second variant of the acoustic perturbation equations	41
4.3.4	Wave equation forms	42
4.4	Perturbed mode decomposition	44
4.4.1	Acoustic modes	44
4.4.2	Vorticity modes	44
4.4.3	Entropy modes	49
4.5	Method analysis and numerical studies	50
4.5.1	Augmented linearized perturbed compressible equations	50
4.5.2	Vorticity influence in an application	52
5	Source reconstruction	61
5.1	Pressure time derivative source terms	61
5.1.1	Comparison with other source terms	61
5.1.2	Issues due to incompressibility of the base flow	63
5.2	Temporal reconstruction	64
5.2.1	Decimation and aliasing	65
5.2.2	Interpolation	67
5.2.3	Time derivative calculation	69
5.2.4	Numerical studies	70
5.2.5	Implications	75
5.3	Spatial reconstruction	76
5.3.1	Specifics in hydrodynamic/acoustic splitting	77
5.3.2	Methods	78
5.3.3	Interpolation between finite volume meshes	78
5.3.4	Coarse source meshes	82
5.3.5	Numerical studies	83
5.3.6	Implications	90
6	Spatially truncated source fields	91
6.1	Underlying problem	91
6.1.1	Problem description	91
6.1.2	Common treatment	92
6.1.3	Specifics for pressure time derivative source fields	92
6.1.4	Theoretical interpretation	93

6.2	Simplified pressure field continuation	95
6.2.1	Basic concept	95
6.2.2	Theoretical model	95
6.2.3	Setup to remedy source field truncation	97
6.3	Numerical studies	98
6.3.1	Sample continued pressure field	98
6.3.2	Acoustics simulations	100
6.3.3	Assessment of approaches	103
6.3.4	Implications	108
7	Verification and validation	111
7.1	Two-dimensional laminar cylinder in cross-flow	111
7.1.1	Fluid dynamics setup	112
7.1.2	Fluid dynamics results	113
7.1.3	Semi-analytical solution	114
7.1.4	Acoustics setup	117
7.1.5	Acoustics results	118
7.2	Three-dimensional cylinder-airfoil benchmark	120
7.2.1	Fluid dynamics setup	120
7.2.2	Fluid dynamics results	124
7.2.3	Acoustics setup	129
7.2.4	Acoustics results	130
8	Conclusions and outlook	137
	Bibliography	141