

Patrick Cordes

**A combined hybrid and integral
approach for aeroacoustics
simulations**

Band 29



**Institut für
Modellierung und
Berechnung**

A combined hybrid and integral approach for aeroacoustics simulations

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Patrick Cordes

aus
Buchholz in der Nordheide

2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schlüter

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2019

Schriftenreihe des Instituts für
Modellierung und Berechnung der
Technischen Universität Hamburg

Band 29

Patrick Cordes

**A combined hybrid and integral approach for
aeroacoustics simulations**

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, 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 978-3-8440-7088-0
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 entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Modellierung und Berechnung der Technischen Universität Hamburg.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff für die Möglichkeit, an seinem Institut eine Promotion durchzuführen. Zusätzlich bedanke ich mich für die ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung sowie die angenehme Zusammenarbeit in Forschung und Lehre.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Michael Schlüter für die Übernahme der Aufgabe des Zweitgutachters und für die gründliche Auseinandersetzung mit meiner Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und die angenehme Gestaltung der Prüfung.

Ich bedanke mich herzlich bei meinen Kollegen am Institut für die Jahre guter Zusammenarbeit in einer sehr schönen Arbeitsatmosphäre, für unzählige interessante Diskussionen und die vielen lustigen Momente. Insbesondere möchte ich mich bei meinem langjährigen Freund, Kollegen und Büropartner Dr.-Ing. Thorben Schröder für seine vielen fachlichen Anregungen, persönlichen Gespräche und seine Unterstützung bedanken. Zusätzlich möchte ich mich besonders bei meinen Kollegen Joscha Piepiorka, Gerrit Weiser und Matthias Ram bedanken, die jeder Zeit für ein Gespräch oder auch eine Ablenkung zu haben waren.

Ich danke meiner Familie für die Unterstützung sowohl während des Studiums als auch während der Promotion. Besonderer Dank gilt meinen Eltern und Großeltern, die an verschiedenen Stationen meines Werdegangs entscheidende Beiträge zum Erreichen meiner Ziele geleistet haben.

Meinen Freunden Tim, Henning, David und Fred danke ich für den Rückhalt, den sie mir geben und dafür, dass sie jeder auf seine Weise stets für mich da waren und sind.

Meiner wundervollen Frau Anne danke ich vom tiefsten Herzen für alles, was sie für mich getan hat. Ohne ihren unermüdlichen Beistand, ihre Ermutigungen, ihren Rückhalt und so vieles mehr, das ich nicht in Worte fassen kann, würde diese Arbeit heute nicht existieren. Du bist unglaublich. Danke.

Zusammenfassung

Unter den hybriden Methoden zur Simulation von Strömungsschall haben sich zwei Ansätze etabliert, die eine Auftrennung in getrennte Simulationen der Strömung und Akustik ermöglichen. Es wird zwischen Störungsverfahren und Integralverfahren unterschieden. Erstere basieren auf einer Auftrennung der Variablen in akustische und fluiddynamische Anteile. Hieraus resultieren zwei Gleichungssysteme, die über Quellterme verbunden sind und eine unidirektional gekoppelte Simulation beider Phänomene ermöglichen. Ein Vorteil ist, dass die Netze auf die jeweiligen Anforderungen angepasst werden können. Des Weiteren wird die Schallentstehung und -ausbreitung im gesamten Gebiet berechnet. Die Integralverfahren nutzen die Strömungssimulationsdaten und stellen mit Hilfe einer Fundamentallösung eine Integralgleichung auf. Diese wird über eine Oberfläche integriert und ergibt den akustischen Druck an einem beliebigen Empfängerpunkt. Vorteil ist, dass die Entfernung des Empfängerpunktes keinen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses hat. Nachteile sind, dass zum einen nur Informationen außerhalb des Integrationsgebiets vorhersagbar sind und zum anderen die akustische Ausbreitung innerhalb des Integrationsgebiets abgebildet werden muss.

In der Arbeit wird ein kombiniertes Verfahren aus Störungsansatz und Integralansatz für niedrige Machzahlen präsentiert. Dies resultiert in einer Vorhersagemöglichkeit, die die Schallentstehung und -ausbreitung im Nahfeld sowie die Abstrahlung ins Fernfeld abbilden kann. Das Verfahren ermöglicht weiterhin die Verwendung des Integralansatzes auf der Basis von inkompressiblen Strömungsberechnungen. Das kombinierte Verfahren wird anhand von akademischen Beispielen und einfachen Testfällen erprobt und untersucht. Des Weiteren wird eine neue Möglichkeit präsentiert, die die Verwendung des Integralverfahrens in zweidimensionalen Simulationen von umströmten Körpern mit großer Spannweite erlaubt. Die Simulationen werden im Zeitbereich durchgeführt. Dies erzeugt durch die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit zwei unterschiedliche Zeitstrahlen innerhalb des kombinierten Verfahrens. Der eine Zeitstrahl ist die Simulationszeit auf dem Netz und der andere ist die Zeit am Empfängerpunkt. Hier wird eine neue Herangehensweise eingeführt, die die Verwendung von nur wenigen Zeitpunkten am Empfängerpunkt ermöglicht. Dies führt zu weniger benötigten Auswertungen der Integralgleichung und somit zu einer Aufwandsreduktion. Zusätzlich kann dieses Verfahren auch mit sich verändernden Zeitschritten in der Störungsansatzsimulation umgehen. Abschließend wird mit Hilfe des kombinierten Verfahrens die Schallemission eines endlichen, wandgebundenen Zylinders untersucht. Hierbei werden insbesondere die Einflüsse untersucht, die zu einer Beeinträchtigung der Ergebnisqualität führen können. Das kombinierte Verfahren wird des Weiteren als Möglichkeit zur Ermittlung der Ergebnisgüte genutzt.

Contents

Nomenclature	ii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 State of the art	3
1.2.1 Direct approaches	4
1.2.2 Hybrid approaches	5
1.2.3 Integral approaches	7
1.2.4 Combined approaches	9
1.3 Scope of this work	10
2 Theory	13
2.1 Computational fluid dynamics	13
2.2 Computational aeroacoustics	17
2.2.1 Hybrid approach: Acoustic perturbation equations version 2	17
2.2.2 Integral approach: Kirchhoff integral equation	19
2.2.3 Combined approach	23
3 Numerical procedure	25
3.1 Discretization techniques	25
3.1.1 Spatial discretization with the finite volume method	26
3.1.2 Temporal discretization	30
3.2 Non-reflective boundary condition	32
3.3 Spurious wave filtering	36
3.4 Simplified pressure field continuation	38
3.5 Consideration of the time in integral approaches	42
3.5.1 Retarded time	43
3.5.2 Forward time	44
3.6 Long span body models	49

4	Verification	53
4.1	Harmonically vibrating sphere	53
4.2	Harmonically vibrating cylinder	62
4.3	Cylinder in uniform crossflow	74
4.3.1	Verification of the hybrid approach acoustics solution	75
4.3.2	Verification of the combined approach acoustics solution	80
5	Application to a finite wall-mounted cylinder	89
5.1	Introduction	89
5.2	Fluid dynamics simulations	90
5.3	Aeroacoustics simulations	99
5.3.1	Hybrid approach applied to a two-dimensional slice	99
5.3.2	Hybrid approach applied to the full three-dimensional case	108
5.3.3	Combined approach applied to the full three-dimensional case	113
6	Conclusions and outlook	121
6.1	Conclusions	121
6.2	Outlook	123
	Bibliography	125

Nomenclature

Functions and scalars

a_{jl}	Runge-Kutta coefficients
b_i	Cartesian vector component of $\mathbf{b}$
b_j	Runge-Kutta coefficients
c	Speed of sound
df	Depth factor
e	Cell face
f	Vector components of convective and diffusive flux
f	Frequency
f_{shed}	Vortex shedding frequency
h	Time step between Runge-Kutta stages
k_i	Number of eigenmode nodes
m	Mass
n	Cell face
p	Pressure
p_{ac}	Acoustic pressure
p_{ic}	Incompressible pressure
q_ϕ	Source Term
r	Distance between source and observer point
s	Cell face
t	Time / observer time
t_j^*	Actual observer time corresponding to the emission time
u_i	Cartesian vector component of $\mathbf{u}$
w	Cell face
x_i	Cartesian direction
y_+	Dimensionless wall coordinate
C_L	Lift coefficient

D	Diameter
E	Neighbor cell center point
F	Generic function
F_e	Integral of flux f_e over cell face e
G	Fundamental solution / Green's function
L	Span length
L_{AOP}	Distance between additional observer points
L_{S}	Simulated span length
L_{SPAN}	Modeled span length
M	Mach number
M_{∞}	Mach number based on U_{∞}
N	Neighbor cell center point
N_{AOP}	Number of additional observer points
P	Cell center point of current cell
Q	Q -criterion
Q_p	Volume integral of source term q_p at cell center P
R	Radius
R_{S_0}	Integration surface radius
Re	Reynolds number
Re_c	Reynolds number corresponding to vortex shedding onset
S	Neighbor cell center point
$\mathcal{S}$	Surface
St	Strouhal number
U_{∞}	Uniform free field velocity
V	Volume
W	Neighbor cell center point
Y	Far field observer point
α_{NF}	Near field factor
β	Transformation variable
γ_j	Runge-Kutta parameter
δt^+	Interpolation factor
δt^-	Interpolation factor
ϵ	Reynolds number relation
λ	Wavelength
λ_e	Linear interpolation factor to cell face e
λ_{shed}	Wavelength corresponding to f_{shed}

μ	Dynamic viscosity
ρ	Density
τ	Emission time / source time
ϕ	Intensive property
Γ	Diffusivity
Γ_{inner}	Inner domain boundary
Γ_{outer}	Outer domain boundary
$\Delta\tau$	Travel time from source to observer
$\Delta\tau_{\text{sim}}$	Simulation time step
Θ	Angle between normal vector and direction vector
Φ	Extensive property

Matrices and vectors

Vectors and matrices are denoted as bold variables throughout this work.

$\mathbf{b}$	Body forces
$\mathbf{e}_i$	Cartesian unit vector in direction x_i
$\mathbf{f}$	Acting forces
$\mathbf{g}$	Intermediate function in Runge-Kutta scheme
$\mathbf{n}$	Outward pointing surface normal vector
$\mathbf{r}$	Vector between source and observer point
$\mathbf{u}$	Intermediate solution variable vector in Runge-Kutta scheme
$\mathbf{u}$	Velocity
$\mathbf{x}$	Cartesian vector
$\mathbf{D}$	Rate of strain tensor
$\mathbf{E}$	Unit tensor
$\mathbf{T}$	Stress tensor
$\mathbf{U}$	Solution variable vector

Indices

Indices used for counting purposes are not included in the following list.

ac	Irrotational acoustic perturbation
ic	Incompressible perturbation
n	Time step level
o	Prandtl-Glauert transformed variable
v	Solenoidal vortical perturbation
CM	Control mass
CV	Control volume
CFD	CFD-simulation value
S	Surface

Operators and other symbols

$\text{tr}(\cdot)$	Trace of a square matrix
∇	Nabla operator
δ	Dirac delta function
Δ	Difference between two variables
$(\cdot)$	Source variables on the integration surface
$(\cdot)'$	Perturbation variable
$(\bar{\cdot})$	Mean value
$(\tilde{\cdot})$	Filtered variable
$\langle \cdot \rangle_{\text{RMS}}$	Root mean square value

Abbreviations

AOP	Additional observer points
APE	Acoustic perturbation equations
APE-2	Acoustic perturbation equations variant 2
CAA	Computational aeroacoustics
CFD	Computational fluid dynamics

CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
DNS	Direct noise simulation
EIF	Expansion about incompressible flow
FD	Finite differences
FEM	Finite element method
FRPM	Fast random particle mesh
FVM	Finite volume method
FWH	Ffowcs Williams and Hawkings
FWMC	Finite wall-mounted cylinder
LEE	Linearized Euler equations
LES	Large eddy simulation
LPCE	Linearized perturbed compressible equations
NRBC	Non-reflective boundary condition
OP	Observer point
RANS	Reynolds averaged Navier-Stokes
RK	Runge-Kutta
RMS	Root mean square
PCE	Perturbed compressible equations
PCWE	Perturbed convective wave equation
PISO	Pressure implicit with splitting of operators
PML	Perfectly matched layer
PSD	Power spectral density
SAS	Scale adaptive simulation
SIMPLE	Semi-implicit for pressure linked equations
SNGR	Stochastic noise generation and radiation
SPL	Sound pressure level
SPFC	Simplified pressure field continuation
uRANS	Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes