

Joscha Piepiorka

**Hybride Methode zur Vorhersage
des strömungsinduzierten Schalls
von rotierenden Systemen**

Band 31



**Institut für
Modellierung und
Berechnung**

Hybride Methode zur Vorhersage des strömungsinduzierten Schalls von rotierenden Systemen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Joscha Piepiorka

aus
Hamburg

2021

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud

Tag der mündlichen Prüfung: 08.04.2021

Schriftenreihe des Instituts für
Modellierung und Berechnung der
Technischen Universität Hamburg

Band 31

Joscha Piepiorka

**Hybride Methode zur Vorhersage des strömungs-
induzierten Schalls von rotierenden Systemen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2021

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

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

Telefon: 040/42878-3032
Fax: 040/427-3-14543
E-Mail: estorff@tuhh.de
Internet: <http://www.tuhh.de/mub>

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8089-6
ISSN 1860-8221

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 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 bei meinem Doktorvater Professor Otto von Estorff für die Möglichkeit zur Promotion und die ausgezeichnete Betreuung bedanken. Die Zusammenarbeit in Forschungsprojekten sowie in der Lehre war stets spannend, erfolgreich und herzlich. Zudem bedanke ich mich für die eingeräumten Freiheiten, die ich im Rahmen meiner Forschungsarbeiten erfahren durfte und die ich als essentiellen und schätzenswerten Bestandteil ansehe.

Bei Professor Moustafa Abdel-Maksoud möchte ich mich für die Übernahme des Zweitgutachtens meiner Dissertation sowie die einhergehende umfangreiche Auseinandersetzung mit der Arbeit bedanken. Mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gilt Professor Michael Schlüter.

Für eine tolle Arbeitsatmosphäre, die gute Zusammenarbeit und den (fachbezogenen) Austausch in meiner Zeit am Institut für Modellierung und Berechnung möchte ich mich herzlich bei allen meinen Kollegen bedanken. In besonderem Maße bedanke ich mich bei Dr. Patrick Cordes und Dr. Thorben Schröder, die mich sowohl als Betreuer von studentischen Arbeiten als auch im Rahmen spannender Diskussionen als fachliche Kollegen stets begeistert und unterstützt haben. Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank für zahlreiche anregende Diskussionen und gemeinsame Projekte Matthias Ram und meinem guten Freund Dennis Gibhardt.

Im Rahmen der Zusammenarbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit Studenten möchte ich mich vor allem bei Konrad Scheffler für seine gute Arbeit und sein großes Engagement bedanken.

Ein überaus großer Dank gilt meinen Eltern für die langjährige Unterstützung und den Rückhalt ausgehend von der schulischen Ausbildung bis hin zur Promotion. Bei meiner Schwester bedanke ich mich ebenfalls für den Beistand und die anhaltende Unterstützung auf diesem Weg. Abschließend möchte ich mich insbesondere bei meiner Frau Melanie für die Kraft und den privaten Rückhalt sowie Ausgleich bedanken, wodurch ich die notwendige Motivation für diese Arbeit nie verlieren konnte.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit erweitert die numerischen Vorhersagemöglichkeiten für strömungsinduzierten Schall von rotierenden Systemen und trägt zum anwendungsbezogenen Verständnis der Schallentstehung bei. Hierfür wird eine hybride Methode entwickelt, die eine effiziente Vorhersage und eine detaillierte Untersuchung des Strömungsschalls ermöglicht.

Eine große Herausforderung bei der numerischen Vorhersage des Strömungsschalls stellen Problemstellungen bei niedrigen Mach-Zahlen dar. Die charakteristischen Längenskalen der Strömung und die dadurch auftretenden Wellenlängen der Akustik erfordern gleichzeitig die Auflösung kleiner Wirbelstrukturen und die Abbildung großer Ausbreitungsdistanzen. Zur Vorhersage werden daher hybride Methoden eingesetzt. Die zugehörige Verfahrensklasse unter Verwendung des “Hydrodynamic/Acoustic-Splitting“ (HAS) ermöglicht eine eindeutige Auftrennung der Zustandsgrößen, sodass Untersuchungen der Schallentstehung und -ausbreitung gleichzeitig realisierbar sind. Die Gegenüberstellung und Weiterentwicklung ausgewählter Verfahren zeigt spezifische Charakteristika auf, wodurch neue Erkenntnisse hinsichtlich der validen Einsatzfähigkeit gewonnen werden können. Anwendungsorientiert werden zwei besonders geeignete HAS-Verfahren für die Vorhersage des Lärms von rotierenden Schallerzeugern bei niedrigen Mach-Zahlen vorgeschlagen.

Zur Charakterisierung der Schallentstehung werden aero- sowie hydroakustische Untersuchungen präsentiert. Die Vorhersagemethode wird zur Modellierung eines Niederdruck-Axialventilators eingesetzt. Anhand eines Benchmark-Falls inklusive experimenteller Messdaten erfolgen umfassende Vergleiche. Im Hinblick auf die hybride Simulation werden Strömungsergebnisse erzeugt und als aeroakustisches Quellfeld bewertet. Bei der aufbauenden Modellierung der induzierten Akustik werden die Anforderungen zur validen Vorhersage anhand geeigneter Variationen aufgezeigt. Weiterhin werden hydroakustische Analysen einer einstufigen Radialpumpe durchgeführt. Die numerischen Ergebnisse der Schallquellen und der resultierenden Schallabstrahlung in die angeschlossenen Rohrleitungen geben detaillierte Einblicke in die Schallentstehungsmechanismen. Zusätzlich wird die Relevanz der Einbaubedingungen anhand numerischer Modelle im direkten Vergleich mit experimentellen Messdaten fokussiert.

Die Vorhersageanforderungen des Strömungsschalls von rotierenden Systemen zeigen klare Unterschiede zwischen Axial- und Radialmaschinen auf. Unter Berücksichtigung der charakteristischen Schallerzeugungsmechanismen sind bauartbedingte Modellierungsspezifikationen erforderlich. Darüber hinaus führen die Fluideigenschaften von Luft und Wasser und die einhergehenden Mach-Zahlen zu Unterschieden in der Effizienz der Vorhersage. Zusammenfassend werden spezifische Empfehlungen präsentiert, die zu sinnvollen Ergebnissen führen und eine valide Vorhersage des Strömungsschalls ermöglichen.

Abstract

This thesis extends the possibilities for the numerical prediction of flow-induced sound of rotating systems and improves the applicational understanding of the sound generation. For this purpose, a hybrid method is developed which allows for the efficient prediction and detailed investigation of flow-induced sound.

A major challenge in the numerical prediction of flow sound is posed by problems at low Mach numbers. The characteristic length scales of the flow and the resulting acoustic wavelengths simultaneously demand for resolving small vortices and huge propagation distances of sound waves. Therefore, hybrid methods are used for prediction. The associated methods using the “hydrodynamic/acoustic splitting” (HAS) enable a unique separation of the state variables, so that sound generation and propagation can be investigated at the same time. By comparing and enhancing selected methods, specific characteristics can be identified and new findings regarding the valid applicability can be obtained. Two especially suitable HAS methods are proposed for the applicational prediction of noise from rotating machinery at low Mach numbers.

Aeroacoustic and hydroacoustic investigations are presented to characterize the noise generation. The prediction method is used to model a low-pressure axial fan. By means of a benchmark case including experimental measurement data, extensive analyses are performed. In terms of the hybrid simulation, flow results are generated and evaluated as aeroacoustic source fields. The requirements for valid predictions are highlighted based on suitable modifications in the subsequent modelling of the induced acoustics. Furthermore, hydroacoustic analyses of a single-stage radial pump are performed. The numerical results of the sound sources and the induced sound radiation into the connected pipes provide detailed insights into the sound generation mechanisms. In addition, the importance of the assembly conditions is focused by numerical models in comparison with experimental measurement data.

The requirements for the numerical prediction of flow sound from rotating systems show significant differences between axial and radial machines. Based on the characteristic sound generation mechanisms, design related modelling specifications are necessary each. Furthermore, the respective fluid properties of air and water as well as the associated Mach numbers lead to differences in the efficiency of the prediction. In summary, specific recommendations are presented, which lead to appropriate results and provide a valid prediction of flow sound.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.2.1 Direkte Verfahren	2
1.2.2 Hybride Verfahren	3
1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen strömungsakustischer Störungsverfahren	9
2.1 Vorgehensweise	9
2.2 Strömungsmechanik	10
2.2.1 Allgemeine Strömung kompressibler Fluide	10
2.2.2 Inkompressibles Strömungsmodell	11
2.2.3 Notwendigkeit der Turbulenzmodellierung	12
2.3 Hydrodynamic/Acoustic-Splitting	14
2.3.1 Acoustic-Perturbation-Equations in der 2. Variante	14
2.3.2 Perturbed-Convective-Wave-Equation	17
2.3.3 Linearized-Perturbed-Compressible-Equations	18
2.3.4 Linearized-Perturbed-Compressible-Equations als Wellengleichung	20
3 Numerische Vorhersagemethode mittels finiter Volumen	23
3.1 Finite-Volumen-Methode	23
3.1.1 Örtliche Diskretisierung	24
3.1.2 Zeitliche Diskretisierung	26
3.2 Zeitintegration	27
3.2.1 Vereinheitlichung der Gleichungssysteme	27
3.2.2 Explizites Runge-Kutta-Verfahren	28
3.3 Nicht-reflektierende Randbedingungen	30
3.3.1 Dämpfende Randschicht	30
3.3.2 Perfectly-Matched-Layer-Randbedingung	31

3.4	Bewegte Rechengebiete	33
3.4.1	Aufteilung und Transformation	34
3.4.2	Korrektur für HAS-Verfahren	35
3.4.3	Kopplung der Rechengebiete	35
3.4.4	Randbedingungen	37
3.5	Interpolation der Strömungsergebnisse	37
3.5.1	Zeitliche Interpolation	38
3.5.2	Örtliche Interpolation	39
3.5.3	Behandlung von Randeffekten	40
4	Verifizierung der hybriden Vorhersagemethode	43
4.1	Querangeströmter Kreiszylinder	43
4.2	Zweidimensionales Strömungsmodell	45
4.2.1	Strömungssimulation	45
4.2.2	Strömungsergebnisse	46
4.3	Simulation der Schallabstrahlung	48
4.3.1	Stehendes CFD- und CAA-Gitter	48
4.3.2	Stehendes CFD- und rotierendes CAA-Gitter	59
4.3.3	Rotierendes CFD- und CAA-Gitter	62
4.4	Diskussion und Fazit	66
5	Aeroakustische Untersuchung von Axialventilatoren	69
5.1	Benchmark-Fall eines Niederdruck-Axialventilators	69
5.2	Modellierung der Strömungsmechanik	71
5.2.1	Modellbildung und Annahmen	71
5.2.2	Strömungssimulation	74
5.2.3	Strömungsergebnisse	75
5.3	Modellierung der Aeroakustik	81
5.3.1	Modellbildung und Annahmen	81
5.3.2	Aeroakustische Simulationen	84
5.3.3	Aeroakustische Ergebnisse	86
5.4	Diskussion und Fazit	99
6	Hydroakustische Untersuchung von Radialpumpen	101
6.1	Einstufige Radialpumpe im Einbauszustand	101
6.1.1	Bereitstellung der Strömungsergebnisse	103
6.1.2	Übertragung und Interpolation der Strömungsergebnisse	105
6.2	Modellierung der Hydroakustik	106
6.2.1	Modellbildung und Annahmen	106

6.2.2	Hydroakustische Simulationen	109
6.2.3	Hydroakustische Ergebnisse	110
6.3	Diskussion und Fazit	130
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
7.1	Zusammenfassung	133
7.2	Ausblick	135
	Literaturverzeichnis	137

Nomenklatur

Funktionen und Skalare

Die Auflistung der Funktionen und Skalare beinhaltet keine Zählvariablen. Diese werden an den entsprechenden Stellen in der Arbeit eingeführt und erläutert.

a	Koeffizient des Runge-Kutta-Verfahrens
b	Koeffizient des Runge-Kutta-Verfahrens
c	Schallgeschwindigkeit
d	Durchmesser
e	Spezifische innere Energiedichte
f	Frequenz
g	Modellgröße des Runge-Kutta-Verfahrens
k	Turbulente kinetische Energie
l	Infinitesimale Länge
n	Drehzahl
p	Druck
r	Betragsmäßiger Abstand, Distanz
r	Radius
s	Anzahl der Stufen des Runge-Kutta-Verfahrens
s	Beliebige skalare oder vektorielle Störungsgröße
t	Zeit
u	Skalare Geschwindigkeitskomponente
v	Skalare Hilfsvariable der PML-Randbedingung
x	Lokale Wegkoordinate
x	Kartesische Wegkoordinate
y	Kartesische Wegkoordinate
y^+	Dimensionsloser Zellwert in Wandnormalenrichtung
z	Kartesische Wegkoordinate

A	Oberfläche
C	Zeitlich konstanter Funktionsausdruck
C	Dimensionsloser Beiwert eines umströmten Körpers
Co	Courant-Zahl
F	Funktionsauswertung des Runge-Kutta-Verfahrens
F	Kraft
L	Länge, Dicke
M	Mach-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
S	Entropie
St	Strouhal-Zahl
T	Zeitsignallänge, Dauer
U	Skalare Anströmgeschwindigkeit
V	Volumen
α	Koeffizient der nicht-reflektierenden Randbedingung
β	Koeffizient der nicht-reflektierenden Randbedingung
β	Exponent der Dämpfungsfunktion der nicht-reflekt. Randbedingung
γ	Isentropenexponent
γ	Koeffizient des Runge-Kutta-Verfahrens
γ	Koeffizient der nicht-reflektierenden Randbedingung
δ	Inkrementelle Änderung, diskreter Abstand
ϵ	Relativer Fehler
λ	Akustische Wellenlänge
μ	Dynamische Viskosität des Fluids
ν	Kinematische Viskosität des Fluids
ρ	Dichte
σ	Dämpfungskoeffizient der nicht-reflektierenden Randbedingung
ϕ	Fluss durch eine Oberfläche
ϕ	Skalares Potenzial
ψ	Skalares Potenzial (im Kontext der Wellengleichungen)
ω	Turbulenzfrequenz
ω	Winkelgeschwindigkeit
Φ	Potenzialfunktion

Matrizen und Vektoren

Die Matrizen, Vektoren und Tensoren sind in der Arbeit fett dargestellt.

$\boldsymbol{n}$	Normalenvektor
$\boldsymbol{q}$	Vektor der Wärmestromdichte
$\boldsymbol{u}$	Geschwindigkeitsvektor
$\boldsymbol{w}$	Vektorielle Hilfsvariable der PML-Randbedingung
$\boldsymbol{x}$	Ortsvektor
$\boldsymbol{A}$	Modellmatrix der PML-Randbedingung
$\boldsymbol{B}$	Modellmatrix der PML-Randbedingung
$\boldsymbol{C}$	Modellmatrix der PML-Randbedingung
$\boldsymbol{E}$	Einheitsmatrix
$\boldsymbol{\tau}$	Spannungstensor
$\boldsymbol{\Psi}$	Vektorielles Potenzial
$\boldsymbol{\Omega}$	Vektor der Wirbelstärke

Indizes

Eine Unterscheidung von Variablen wird durch hochgestellte oder tiefgestellte Indizes deklariert. Die Auflistungen beinhalten keine Zählindizes.

Hochgestellte Indizes

Zur Unterscheidung werden folgende hochgestellte Indizes verwendet.

a	Kompressibler, akustischer Anteil
ic	Inkompressibler, strömungsmechanischer Anteil
n	Zeitschritt
sa	Wert der/gegenüber der semianalytischen Lösung
sim	Wert aus der numerischen Simulation
w	Quell-/Senkenfreier Wirbelanteil

Tiefgestellte Indizes

Zur Unterscheidung werden folgende tiefgestellte Indizes verwendet.

0	Konstanter, ambierter Referenzwert
0	Startwert
a	Äußerer Rand des akustischen Gebiets
abl	Bezogen auf die Wirbelablösung
alt	Alter Wert
d	Bezogen auf den Widerstand
damp	Dämpfungszone
ein	Wert am Einlass
end	Endwert
exp	Experiment, Messung
f	Oberflächenmittelpunktwert
kor	Korrekturanteil
l	Bezogen auf den Auftrieb
max	Maximaler Wert
neu	Neuer, aktualisierter Wert
q	Quell-/Senkenfreier Anteil
r	Rotationsfreier Anteil
rel	Relativer Anteil
rms	Root-Mean-Square-Wert
rot	Rotatorischer Anteil
s	Abgespeicherter Wert
sim	Simulation, numerische Vorhersage
x	Bezogen auf die x -Richtung
y	Bezogen auf die y -Richtung
z	Bezogen auf die z -Richtung
BEP	Ausgewertet am Bestpunkt (BEP)
BPF	Ausgewertet bei der Blattpassierfrequenz
CFD	Bezogen auf die CFD-Simulation/-Ergebnisse
Gitter	Bezogen auf das Rechengitter
KV	Bezogen auf ein Kontrollvolumen/eine Zelle
LR	Bezogen auf das Laufrad
Luft	Bezogen auf Luft bei Umgebungsbedingungen
P	Bezogen auf die Lösung der Poisson-Gleichung

PML	Modellgröße, Koeffizient der PML-Randbedingung
Rohr	Bezogen auf das Rohr
Rotor	Bezogen auf den Rotor
SBES	Bezogen auf die CFD-SBES-Simulation/-Ergebnisse
SPFC	Bezogen auf das Gebiet der SPFC
SST	Bezogen auf die CFD-SST-Simulation/-Ergebnisse
Wasser	Bezogen auf Wasser bei Umgebungsbedingungen
Z	Zellmittelpunktwert
Ziel	Zielwert

Operatoren und sonstige Symbole

∇	Nabla-Operator
Δ	Laplace-Operator mit $\Delta = \nabla^2$
$\delta(\cdot)$	Inkrementelle Änderung von $(\cdot)$
$(\cdot)^T$	Transposition von $(\cdot)$
$(\bar{\cdot})$	Zeitlich gemittelte Größe von $(\cdot)$
$(\cdot)'$	Zeitliche Störungsgröße von $(\cdot)$
$\mathcal{O}(\cdot)$	Skalierung in Abhängigkeit von $(\cdot)$
$\int(\cdot)d\eta$	Integral von $(\cdot)$ über η
$ \cdot $	Betrag/Euklidische Norm von $(\cdot)$
$\max(\cdot)$	Maximaler Wert von $(\cdot)$
$f(\cdot, t), F(\cdot, t)$	Funktionsvorschrift in Abhängigkeit von $(\cdot)$ und t
$\frac{\partial}{\partial t}(\cdot)$	Partielle Zeitableitung von $(\cdot)$
$\frac{D}{Dt}(\cdot)$	Materialableitung von $(\cdot)$
$\frac{D^2}{Dt^2}(\cdot)$	Zweifache Materialableitung von $(\cdot)$
$(\cdot)_s$	$(\cdot)$ entlang konstanter Entropie S

Abkürzungen

AFSI	Akustik-Fluid-Struktur-Interaktion
ALE	Arbitrary-Lagrangian-Eulerian
AMI	Arbitrary-Mesh-Interface
APE	Acoustic-Perturbation-Equations

APE-2	Acoustic-Perturbation-Equations in der zweiten Variante
AWE	Aeroacoustic-Wave-Equation
BEM	Boundary-Elemente-Methode
BEP	Best-Efficiency-Point
BGBL	Bundesgesetzblatt
BPF	Blattpassierfrequenz
CAA	Computational-Aeroacoustics
CFD	Computational-Fluid-Dynamics
CFL	Courant, Friedrichs und Lewy
DES	Detached-Eddy-Simulation
DNS	Direkte numerische Simulation
EIF	Expansion-About-Incompressible-Flow
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
HAS	Hydrodynamic/Acoustic-Splitting
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IDDES	Improved-Delayed-Detached-Eddy-Simulation
KV	Kontrollvolumen
LBM	Lattice-Boltzmann-Methode
LEE	Linearisierte Euler Gleichungen
LES	Large-Eddy-Simulation
LPCE	Linearized-Perturbed-Compressible-Equations
LUST	Linear-Upwind-Stabilised-Transport
MPI	Massage-Passage-Interface
PCE	Perturbed-Compressible-Equations
PCWE	Perturbed-Convective-Wave-Equation
PML	Perfectly-Matched-Layer
PSD	Power-Spectral-Density
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes
RMS	Root-Mean-Square
SAS	Scale-Adaptive-Simulation
SBES	Stress-Blended-Eddy-Simulation
SPFC	Simplified-Pressure-Field-Continuation
SPL	Schalldruckpegel
SST	Shear-Stress-Transport
uRANS	unsteady-Reynolds-Averaged-Navier-Stokes