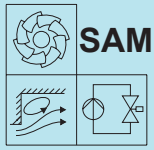




TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Lehrstuhl für
Strömungsmechanik und
Strömungsmaschinen - SAM



Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

SAM - Fortschrittsberichte

Band 22

Rebecca Schäfer

**Lattice-Boltzmann-Methode zur
aeroakustischen Untersuchung
tonaler und breitbandiger Schall-
quellen eines Radialventilators**

Lattice-Boltzmann-Methode zur aeroakustischen Untersuchung tonaler und breitbandiger Schallquellen eines Radialventilators

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Frau

Dipl.-Ing. Rebecca Schäfer

geb. in Zweibrücken

| | |
|-----------------------------|--|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 18. November 2021 |
| Dekan: | Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck |
| Vorsitzender: | Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski |
| Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus |

SAM-Fortschrittsberichte

Band 22

Rebecca Schäfer

**Lattice-Boltzmann-Methode zur aeroakustischen
Untersuchung tonaler und breitbandiger
Schallquellen eines Radialventilators**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8514-3

ISSN 2191-8031

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM) der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK).

Zuallererst möchte ich meinen herzlichen Dank an meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, dem Leiter des Lehrstuhls SAM, aussprechen. Durch sein Engagement hat er mir die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht und mich während meiner Zeit am Lehrstuhl unterstützt. Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus für seine Tätigkeit als zweiter Berichterstatter und bei Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ich bedanke mich ebenfalls bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen für Ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung. Besonderer Dank gilt hier Anika Witzenhausen, Thomas Reviol und Andreas Baum. Die gemeinsam geführten fachlichen Diskussionen, Gespräche und Ratschläge waren mir immer eine sehr große Hilfe und haben mich immer wieder motiviert. Weiterhin danke ich allen studentischen Hilfskräften - insbesondere Felix und Janik Röckel - sowie meinen Studien-, Bachelor- und Diplomarbeitern, die durch ihre Einsatzbereitschaft und Motivation ihren Beitrag zu der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Ein großer Teil der durchgeführten Untersuchungen dieser Arbeit sind im Rahmen des FLT-Forschungsvorhabens L270 „Validierung der Lattice-Boltzmann Methode zur Simulation der Strömung und Akustik in Radialventilatoren“ entstanden. Das Vorhaben wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter der Nummer IGF-Nr. 19382-N gefördert. Ich danke der finanziellen Unterstützung. Das Vorhaben wurde ebenso von einem Arbeitskreis der FLT begleitet - den Mitgliedern dieses Arbeitskreises gebührt mein Dank für die große Unterstützung und die geführten fachlichen Diskussionen.

Bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich mich herzlich dafür bedanken, dass sie immer verständnisvoll waren, mich stets motiviert und nie an mir gezweifelt haben. Insbesondere meinen Eltern danke ich für ihre stete Unterstützung. Sie haben immer an mich geglaubt und nur durch sie konnte ich den Weg einschlagen, der mich bis hierhin geführt hat. Auch meiner Schwester Katharina möchte ich mich für die mentale Unterstützung und das immer offene Ohr bedanken.

Größter Dank gilt meinem Verlobten Sebastian, der immer für mich da ist, mich bei diversen handwerklichen Tätigkeiten unterstützt und mir stets den Rücken freigehalten hat. Er hat immer an mich geglaubt und bestärkt - ohne dessen Unterstützung wäre diese Arbeit in dieser Form nicht entstanden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | XIII |
| Nomenklatur | XV |
| Kurzfassung | XIX |
| Abstract | XXI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Hintergrund und Motivation | 1 |
| 1.2 Literaturübersicht | 2 |
| 1.2.1 Studien mittels Navier-Stokes basierender Methoden | 4 |
| 1.2.2 Studien mittels der Lattice-Boltzmann-Methode | 8 |
| 1.3 Zielsetzung und Arbeitshypothesen | 10 |
| 1.4 Aufbau der Arbeit | 11 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 12 |
| 2.1 Ventilatoren | 12 |
| 2.1.1 Aufgaben von Ventilatoren | 12 |
| 2.1.2 Klassifizierung von Ventilatoren | 12 |
| 2.1.3 Kenngrößen von Ventilatoren | 14 |
| 2.1.4 Kennlinien von Ventilatoren | 16 |
| 2.2 Akustik | 17 |
| 2.2.1 Grundbegriffe der Akustik | 18 |
| 2.2.2 Signalverarbeitung | 19 |
| 2.3 Grundlagen der Schallentstehung | 22 |
| 2.3.1 Aerodynamische Schallentstehung und Elementarstrahler | 22 |
| 2.3.2 Schallquellen und -entstehungsmechanismen bei Ventilatoren | 23 |
| 2.4 Lattice-Boltzmann-Methode | 28 |
| 2.5 Grundlagen der Öl-Anstrich-Methodik | 31 |
| 2.5.1 Bestandteile einer Anstrichfarbe | 32 |
| 2.5.2 Mischverhältnis der Anstrichfarbe | 32 |
| 2.5.3 Interpretationstechnik der Anstrichbilder | 33 |
| 3 Experimenteller Aufbau | 34 |
| 3.1 Versuchsaufbau des Radialventilatorprüfstands | 34 |
| 3.2 Beschreibung des analysierten Radialventilators | 38 |
| 3.3 Sensorik und Datenerfassung | 40 |
| 3.4 Versuchsaufbau und -durchführung von Hochfahrttests und Resonanzversuchen | 41 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.5 | Versuchsaufbau und -durchführung zur Erstellung der Öl-Anstrichbilder . . . | 42 |
| 4 | Numerisches Setup | 44 |
| 4.1 | PowerFLOW, Release 6-2019 R2 | 44 |
| 4.1.1 | Softwaremodule | 44 |
| 4.1.2 | Simulationsablauf | 44 |
| 4.1.3 | Gittererstellung | 46 |
| 4.1.4 | Physikalische Modellierung | 47 |
| 4.2 | Simulationsmodell | 47 |
| 5 | Basisanalyse | 52 |
| 5.1 | Einfluss des numerischen Gitters | 52 |
| 5.1.1 | Untersuchte Gittervarianten | 52 |
| 5.1.2 | Ergebnisse | 55 |
| 5.1.3 | Zwischenfazit | 61 |
| 5.2 | Untersuchung der Simulationsmachzahl | 61 |
| 5.2.1 | Untersuchte Machzahlen | 61 |
| 5.2.2 | Ergebnisse | 62 |
| 5.2.3 | Zwischenfazit | 64 |
| 5.3 | Variation der Betriebspunkte | 64 |
| 5.3.1 | Ergebnisse | 64 |
| 5.3.2 | Zwischenfazit | 69 |
| 6 | Tonale Analyse | 70 |
| 6.1 | Erweiterte Gitterstudie mit Spiralgehäuse | 70 |
| 6.1.1 | Untersuchte Gittervarianten | 70 |
| 6.1.2 | Ergebnisse | 73 |
| 6.2 | Variation der Zungengeometrie und Betriebspunkte | 78 |
| 6.2.1 | Untersuchte Zungenvarianten | 78 |
| 6.2.2 | Ergebnisse | 79 |
| 6.3 | Analyse der tonalen Schallkomponenten | 86 |
| 6.4 | Visuelle Analyse mit Spiralgehäuse | 90 |
| 6.5 | Zwischenfazit | 99 |
| 7 | Breitbandige Analyse | 100 |
| 7.1 | Untersuchte Einbauvarianten im Zuströmbereich | 100 |
| 7.2 | Erweiterte Gitterstudie mit Installationseffekt | 101 |
| 7.2.1 | Untersuchte Gittervarianten | 101 |
| 7.2.2 | Ergebnisse | 102 |
| 7.3 | Variation der Betriebspunkte mit Installationseffekt | 112 |
| 7.3.1 | Ergebnisse | 112 |
| 7.4 | Visuelle Analyse mit Installationseffekt | 119 |
| 7.5 | Zwischenfazit | 122 |
| 8 | Analyse der Simulationsergebnisse | 123 |
| 8.1 | Strömungstopologie | 123 |
| 8.1.1 | Einfluss des Volumenstroms | 123 |
| 8.1.2 | Detaillierte Betrachtung der Strömung im Optimalpunkt | 127 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8.2 | Schallquellen und -entstehungsmechanismen | 134 |
| 8.2.1 | Übersicht der zu analysierenden Frequenzbereiche | 135 |
| 8.2.2 | Schallquellenlokalisierung | 136 |
| 8.2.3 | Schallentstehungsmechanismen | 147 |
| 9 | Zusammenfassung | 151 |
| 10 | Ausblick | 154 |
| | Literaturverzeichnis | 156 |
| A | Volumenstrom-Messeinrichtung: FLT-Düse | 168 |
| B | Hochfahrttest | 170 |
| C | Resonanzversuche | 171 |
| D | Fehleranalyse | 173 |
| E | Untersuchung des Netzeinflusses bei Off-Design-Bedingungen | 178 |
| F | Visuelle Analyse der Simulation mittels Anstrichbilder | 180 |
| | Betreute Arbeiten | 189 |
| | Lebenslauf | 190 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | CORDIER-Diagramm | 13 |
| 2.2 | Typen von Radialaufrädern bei unterschiedlicher Schaufelkrümmung | 14 |
| 2.3 | Schematische Kennlinie eines stabil arbeitenden Radialventilators | 17 |
| 2.4 | Schematische Darstellung der Modellvorstellung der Elementarstrahler | 23 |
| 2.5 | Übersicht über die Schallentstehungsmechanismen bei Ventilatoren | 24 |
| 2.6 | Schallquelle „Ungleichmäßige instationäre Strömung“ | 26 |
| 2.7 | Schallquelle „Strömungsablösung“ durch Ablösung von der Schaufeloberfläche | 27 |
| 2.8 | Schallquelle „Strömungsablösung“ durch rotierende Instabilität | 27 |
| 2.9 | Schallquelle „Strömungsablösung“ durch Wirbelablösung | 28 |
| 2.10 | Phasenraum | 29 |
| 2.11 | Diskretisierung im Phasenraum | 30 |
| 3.1 | Schematischer Aufbau des Ventilatorprüfstands | 34 |
| 3.2 | CAD-Modell des Ventilatorprüfstands | 35 |
| 3.3 | Messaufbau zur Durchführung der akustischen Untersuchungen | 37 |
| 3.4 | Reales Modell des Ventilatorlaufrads | 39 |
| 3.5 | CAD-Modell des Spiralgehäuses im 3D-Schnitt | 39 |
| 4.1 | Simulationsablauf in PowerFLOW | 45 |
| 4.2 | Gittererstellung in PowerFLOW | 46 |
| 4.3 | Simulationsmodell | 48 |
| 4.4 | Gittertopologie | 49 |
| 5.1 | Geometrien zur Gitterstudie der Basisanalyse | 53 |
| 5.2 | Gittertopologie zur Gitterstudie der Basisanalyse | 54 |
| 5.3 | Plausibilitätsuntersuchung, Geschwindigkeit- und Druckplots | 56 |
| 5.4 | Plausibilitätsuntersuchung, Pseudo-Rothalpie-Plot | 56 |
| 5.5 | Kenngrößen, Netzstudie Basisanalyse | 58 |
| 5.6 | Schmalbandspektrum , Netzstudie Basisanalyse | 59 |
| 5.7 | Kenngrößen, Simulationsmachzahlstudie | 62 |
| 5.8 | Schmalbandspektrum, Simulationsmachzahlstudie | 63 |
| 5.9 | Betrachtung der Zusammenhänge bei erhöhter Simulationsmachzahl | 64 |
| 5.10 | Kenngrößen, Basisanalyse | 65 |
| 5.11 | Richtcharakteristik, Basisanalyse | 66 |
| 5.12 | Schmalbandspektrum, Basisanalyse | 67 |
| 5.13 | Terzbandspektrum, Basisanalyse | 68 |
| 5.14 | CAMPELL-Diagramm, Einbaufall „Impeller“ | 69 |
| 6.1 | Geometrien zur Gitterstudie der tonalen Analyse | 70 |
| 6.2 | Gittertopologie zur Gitterstudie der tonalen Analyse | 72 |
| 6.3 | Kenngrößen, Netzstudie tonale Analyse | 73 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.4 | Schmalbandspektrum, Netzstudie tonale Analyse, Teil 1/2 | 75 |
| 6.5 | Schmalbandspektrum, Netzstudie tonale Analyse, Teil 2/2 | 76 |
| 6.6 | Vergleich der untersuchten Zungengeometrien | 79 |
| 6.7 | Kenngrößen, tonale Analyse | 80 |
| 6.8 | Richtcharakteristik, tonale Analyse | 81 |
| 6.9 | Schmalbandspektren, tonale Analyse; 100–3000 Hz | 82 |
| 6.10 | Schmalbandspektren, tonale Analyse; 100–1000 Hz | 83 |
| 6.11 | Terzbandspektren, tonale Analyse, Einbaufall „Base“ | 84 |
| 6.12 | Terzbandspektren, tonale Analyse, Einbaufall „Mod1“ | 85 |
| 6.13 | Signifikante Abmessungen der saugseitigen Kammer | 86 |
| 6.14 | CAMPBELL-Diagramm des Hochfahrttests, Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 1.0$ | 88 |
| 6.15 | CAMPBELL-Diagramm des Resonanzversuchs, Einbaufall „Base“ | 89 |
| 6.16 | Simulative Drehzahlvariation für den Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 1.0$ | 90 |
| 6.17 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 1.0$ | 92 |
| 6.18 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 1.7$ | 94 |
| 6.19 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Mod1“, $Q/Q_{opt} = 1.0$ | 96 |
| 6.20 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Mod1“, $Q/Q_{opt} = 1.7$ | 98 |
| 7.1 | Vergleich der untersuchten Zuströmbedingungen | 100 |
| 7.2 | Geometrien zur Gitterstudie der breitbandigen Analyse | 101 |
| 7.3 | Gittertopologie zur Gitterstudie der breitbandigen Analyse | 103 |
| 7.4 | Kenngrößen; Netzstudie breitbandige Analyse | 104 |
| 7.5 | Schmalband, Netzstudie breitbandige Analyse; 100 – 3000 Hz, Teil 1/2 | 106 |
| 7.6 | Schmalband, Netzstudie breitbandige Analyse; 100 – 3000 Hz, Teil 2/2 | 107 |
| 7.7 | Schmalband, Netzstudie breitbandige Analyse; 100 – 1000 Hz, Teil 1/2 | 108 |
| 7.8 | Schmalband, Netzstudie breitbandige Analyse; 100 – 1000 Hz, Teil 2/2 | 109 |
| 7.9 | Kenngrößen, breitbandige Analyse | 112 |
| 7.10 | Richtcharakteristik, breitbandige Analyse | 113 |
| 7.11 | Schmalbandspektren, breitbandige Analyse, 100–3000 Hz | 115 |
| 7.12 | Schmalbandspektren, breitbandige Analyse, 100–1000 Hz | 116 |
| 7.13 | Terzbandspektren, breitbandige Analyse, Einbaufall „Base“ | 117 |
| 7.14 | Terzbandspektren, breitbandige Analyse, Einbaufall „Install“ | 118 |
| 7.15 | Anstrichbilder, breitbandige Analyse, Einbaufall „Install“, $Q/Q_{opt} = 1.0$ | 120 |
| 7.16 | Anstrichbilder, breitbandige Analyse, Einbaufall „Install“, $Q/Q_{opt} = 1.7$ | 121 |
| 8.1 | Auswerteebene auf einem axialen Schnitt durch die Laufradmitte | 124 |
| 8.2 | Momentane Geschwindigkeit, axialer Schnitt durch die Laufradmitte | 125 |
| 8.3 | Momentane Wirbelstärke, axialer Schnitt durch die Laufradmitte | 126 |
| 8.4 | Auswerteebene auf einem axialen Schnitt durch die Spaltmitte | 127 |
| 8.5 | Momentane Axialgeschwindigkeit, axialer Schnitt durch die Spaltmitte | 128 |
| 8.6 | Auswerteebene auf einem planaren Schnitt durch die Laufradmitte | 129 |
| 8.7 | Momentane Wirbelstärke, planarer Schnitt durch die Laufradmitte | 130 |
| 8.8 | Auswerteebene auf einem planaren Detailschnitt durch die Laufradmitte | 131 |
| 8.9 | Momentane Absolutgeschwindigkeit, planarer Schnitt durch die Laufradmitte | 132 |
| 8.10 | Momentanaufnahme der Isofläche des λ_2 -Kriteriums | 134 |
| 8.11 | Festlegung der signifikanten Frequenzbänder zur Analyse der Schallquellen | 135 |
| 8.12 | Isofläche der Druckfluktuation mittels des Schalldruckpegels | 138 |
| 8.13 | Isofläche der Druckfluktuation mittels des Schalldruckpegels („Mod1“) | 139 |

| | | |
|------|--|-----|
| 8.14 | Druckfluktuation in Form von dB Maps (Tragscheibe) | 140 |
| 8.15 | Druckfluktuation in Form von dB Maps (Deckscheibe) | 141 |
| 8.16 | Zeitlicher Verlauf des Wechseldrucks, Frequenzband f_1 , „Base“ | 144 |
| 8.17 | Zeitlicher Verlauf des Wechseldrucks, Frequenzband f_1 , „Mod1“ | 145 |
| 8.18 | Zeitlicher Verlauf des Wechseldrucks, Frequenzband f_1 , „Install“ | 146 |
| 8.19 | Zeitlicher Verlauf des Wechseldrucks, Frequenzband f_1 , „Impeller“ | 147 |
| 8.20 | Überlagerung der Isofläche des λ_2 -Kriteriums und des Schalldruckpegels | 148 |
| | | |
| A.1 | Schematischer Aufbau der FLT-Düse | 168 |
| | | |
| B.1 | CAMPBELL-Diagramm des Hochfahrttests, Einbaufall „Mod1“ | 170 |
| B.2 | CAMPBELL-Diagramm des Hochfahrttests, Einbaufall „Install“ | 170 |
| | | |
| C.1 | CAMPBELL-Diagramm des Resonanzversuchs, Einbaufall „Mod1“ | 171 |
| C.2 | CAMPBELL-Diagramm des Resonanzversuchs, Einbaufall „Install“ | 172 |
| | | |
| D.1 | Absolute Gesamtmessunsicherheit | 176 |
| D.2 | Relative Gesamtmessunsicherheit | 177 |
| | | |
| E.1 | Kenngrößen, Netzstudie Off-Design-Bedingungen | 178 |
| | | |
| F.1 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 0.7$ | 180 |
| F.2 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 1.2$ | 181 |
| F.3 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Base“, $Q/Q_{opt} = 1.5$ | 182 |
| F.4 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Mod1“, $Q/Q_{opt} = 0.7$ | 183 |
| F.5 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Mod1“, $Q/Q_{opt} = 1.2$ | 184 |
| F.6 | Anstrichbilder, tonale Analyse, Einbaufall „Mod1“, $Q/Q_{opt} = 1.5$ | 185 |
| F.7 | Anstrichbilder, breitbandige Analyse, Einbaufall „Install“, $Q/Q_{opt} = 0.7$ | 186 |
| F.8 | Anstrichbilder, breitbandige Analyse, Einbaufall „Install“, $Q/Q_{opt} = 1.2$ | 187 |
| F.9 | Anstrichbilder, breitbandige Analyse, Einbaufall „Install“, $Q/Q_{opt} = 1.5$ | 188 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Literaturübersicht aeroakustischer Simulationen von Radialventilatoren . . . | 3 |
| 2.1 | Mischverhältnisse der Anstrichfarbe angegeben in der Literatur | 33 |
| 3.1 | Koordinaten der Messstellen | 37 |
| 3.2 | Technische Daten des Radialventilators | 38 |
| 3.3 | Übersicht der untersuchten Einbauvarianten | 40 |
| 3.4 | FFT-Parameter | 40 |
| 3.5 | Verbaute Sensorik | 41 |
| 3.6 | Übersicht der verwendeten Mischverhältnisse der Anstrichfarbe | 43 |
| 5.1 | Übersicht über Varianten der Gitterstudie der Basisanalyse | 55 |
| 5.2 | Übersicht, Netzstudie Basisanalyse | 60 |
| 5.3 | Netztopologie im Bereich der feinsten Gitterzonen | 61 |
| 6.1 | Übersicht über Varianten der Gitterstudie mit Spiralgehäuse | 71 |
| 6.2 | Übersicht, Netzstudie tonale Analyse | 77 |
| 6.3 | Übersicht analytisch berechneter Axialmodenfrequenzen | 87 |
| 7.1 | Übersicht über Varianten der Gitterstudie mit Installationseffekt | 102 |
| 7.2 | Übersicht, Netzstudie breitbandige Analyse | 111 |
| 8.1 | Übersicht über Mittenfrequenzen der zu analysierenden Frequenzbändern . | 136 |
| 8.2 | Übersicht über Schallquellen, Entstehungsmechanismen und Abstrahlcharakter | 149 |
| E.1 | Übersicht, Netzstudie Off-Design-Bedingungen | 179 |

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Name/ Bedeutung |
|-----------------|------------|--|
| a_s | m/s | Schallgeschwindigkeit |
| c_{char} | m/s | charakteristische Geschwindigkeit |
| c_s | m/s | isotherme Schallgeschwindigkeit |
| c | m/s | Absolutgeschwindigkeit |
| d_0 | mm | Durchmesser an der Einlaufdüse |
| D | mm | Durchmesser am Laufradaustritt |
| f | Hz | Frequenz |
| f_{samp} | Hz | Abtastrate |
| f_{max} | Hz | maximal auszuwertende Frequenz |
| f | $m^{-4}s$ | Geschwindigkeitsverteilungsfunktion |
| f^{eq} | $m^{-4}s$ | Gleichgewichtsverteilung |
| g | m/s^2 | Erdbeschleunigung |
| h | J/kg | spezifische Enthalpie |
| i | - | Laufvariable der Messstellen |
| i | - | imaginäre Einheit |
| i | - | Laufvariable der Geschwindigkeitsrichtungen |
| j | - | Laufvariable der Frequenzbänder |
| k | - | Laufvariable der Frequenzlinien |
| l | m | charakteristische Länge |
| L_p | dB | Schalldruckpegel |
| \bar{L}_p | dB | Gesamtschalldruckpegel |
| $L_{p,e}$ | dB | energetisch gemittelter Schalldruckpegel |
| $\bar{L}_{p,e}$ | dB | energetisch gemittelter Gesamtschalldruckpegel |
| Ma | - | MACH-Zahl |
| n | min^{-1} | Drehzahl |
| N | - | Anzahl der Abtastwerte |
| N | - | Molekülanzahl |
| p | Pa | Druck |
| \tilde{p} | Pa | Wechseldruck |
| p_{ref} | Pa | Referenzdruck |
| $p(t)$ | Pa | Drucksignal |
| $p(t + \tau)$ | Pa | um τ zeitlich verschobenes Drucksignal |
| P | kW | Leistung |
| $P(f)$ | W | Schalleistung im Frequenzband f |
| Q | m^3/h | Volumenstrom |

| | | |
|-------------|-----|----------------------------------|
| Q/Q_{opt} | - | Volumenstromrate |
| R | J | Rothalpie |
| \bar{R} | Pa | Pseudo-Rothalpie |
| $R(\tau)$ | - | Autokorrelationsfunktion |
| $S(f)$ | - | kontinuierliche Frequenzfunktion |
| $s(t)$ | - | kontinuierliches Zeitsignal |
| $S(k)$ | - | diskrete Frequenzfunktion |
| $s(n)$ | - | diskretes Zeitsignal |
| T | K | Temperatur |
| t | s | Zeit |
| u | m/s | Umfangsgeschwindigkeit |
| v | m/s | Schallschnelle |
| w | m/s | Relativgeschwindigkeit |
| x, y, z | m | Kartesische Koordinaten |

Griechische Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Name/ Bedeutung |
|------------------|-------------------|---|
| α_0 | - | Durchflusszahl der Volumenstrom-Messeinrichtung |
| β | ° | Schaufelwinkel |
| Δp | Pa | Druckdifferenz bzw. statische Druckerhöhung |
| Δf | Hz | Frequenzauflösung oder -bandbreite |
| Δt | s | Zeitschrittgröße |
| Δx | m | Gittergröße |
| Δx_{mic} | m | Gittergröße im Bereich der Mikrofonpositionen |
| δ | - | Durchmesserzahl |
| ϵ_0 | - | Expansionszahl |
| η | - | Wirkungsgrad |
| θ | - | Winkel der Laufradstellung |
| Λ | m | integrales Längenmaß |
| Π | - | Druckverhältnis |
| ρ | kg/m ³ | Dichte |
| σ | s | Schnelllaufzahl |
| τ | - | molekulare Relaxationszeit |
| φ | - | Durchflusszahl bzw. Lieferzahl |
| ψ | - | Druckkoeffizient bzw. Druckzahl |
| ξ_i | m/s | Partikelgeschwindigkeit der jeweiligen Geschwindigkeitsrichtung i |
| Ω_K | - | Kollisionsterm |
| ω | Hz | Kreisfrequenz |

Indizes

| Zeichen | Name/ Bedeutung |
|---------|---|
| 0 | Stelle an der Einlaufdüse |
| 1 | Stelle an der Druckmessebene der Ventilator druckerhöhung |

| | |
|----------|--|
| 2 | Stelle hinter dem Ventilator bzw. am Laufradaußendurchmesser |
| A | Antriebs- |
| acous | akustisch |
| amb | ambient (Umgebungs-) |
| char | charakteristische |
| D | Druckseite |
| E | elektrisch |
| e | energetisch gemittelt |
| eq | Equilibrium |
| EXP | Experiment |
| i | Laufzahl der akustischen Messstellen |
| j | Laufzahl der Frequenzbänder |
| m | Motor |
| max | maximal |
| opt | Optimum |
| ref | Referenz |
| real | real |
| S | Saugseite |
| samp | sampling |
| sim, SIM | Simulation |
| st | statisch |
| turb | turbulent |

Abkürzungen

| Zeichen | Name/ Bedeutung |
|----------------|--|
| BEM | Boundary Element Method |
| BPF | Blade Passing Frequency |
| BGK | Bhatnagar, Gross und Krook |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DES | Detached Eddy Simulation |
| DVM | Discret Vortex Method |
| EXP | Experiment |
| FEM | Finite Element Methode |
| FFT | Fast Fourier Transformation |
| FIND | Flow Induced Noise Detection |
| FLT | Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V. |
| FSO | Full Scale Output |
| FW-H | Ffowcs Williams und Hawkings |
| GUI | Graphical User Interface |
| k.A. | keine Angabe |
| KMU | kleine und mittlere Unternehmen |
| LBM | Lattice Boltzmann Methode |
| LES | Large Eddy Simulation |
| LRF | Local Reference Frame |
| MS | Messstelle |

| | |
|--------|--|
| RANS | Reynolds-averaged Navier-Stokes |
| RNG | hochmoderne Renormierungsgruppenform |
| SIM | Simulation |
| SAS | Scale-Adaptive Simulation |
| SBES | Stress-Blended Eddy Simulation |
| URANS | Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes |
| VR | Variable Resolution |
| w. Tr. | wenige Tropfen |

Kurzfassung

Neben der Energieeffizienz gewinnt die Geräuschemission von Ventilatoren immer mehr an Bedeutung. Neue Forschungsansätze in der Schallreduzierung können mit der Kenntnis über die genauen Schallentstehungsmechanismen von Ventilatoren wachsen. Numerische Simulationsmethoden helfen diese detailliert zu analysieren und reduzieren damit die Anzahl kosten- und zeitintensiver Experimente deutlich. Die Lattice-Boltzmann-Methode eignet sich aufgrund einer gering vorliegenden Dissipation für eine direkte Berechnung der Aerodynamik und Akustik.

Bislang fehlt es an Kenntnissen, inwieweit die Lattice-Boltzmann-Methode geeignet ist, die Aerodynamik und Akustik eines Radialventilators zu modellieren. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Fragestellung und beantwortet sie durch weitreichende Analysen. Diese berücksichtigen neben der Variation der Betriebspunkte auch unterschiedliche Einbauzustände, die spezielle Eigenschaften hinsichtlich der tonalen und breitbandigen Schallabstrahlung aufweisen. Darüber hinaus werden mittels der Simulationsergebnisse die Schallquellen des vorliegenden Radialventilators lokalisiert und deren Entstehungsmechanismus herausgearbeitet.

Die integralen Kenngrößen sowie die visuellen Analysen mittels Stromlinienverläufen zeigen bei allen Einbauzuständen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und dem Experiment. Beim Betrieb des Ventilators in starker Überlast zeigt sich eine etwas höhere Abweichungen aufgrund der nicht aufgelösten Grenzschicht, aber durch Erhöhung der numerischen Netzauflösung ist auch hier ein Verbesserungspotential vorhanden. Bemerkenswert ist die sehr gute Modellierung der akustischen Schmalbandspektren. Harmonische des Drehtons werden zwar geringfügig unterschätzt. Dafür werden aber sowohl der Drehton als auch der Pegel der breitbandigen Schallkomponenten sowie die sich im Prüfstand ergebenden Moden drehzahlabhängiger und -unabhängiger Natur von der Simulation nahezu perfekt wiedergegeben. Basierend auf diesen Ergebnissen werden tonale Schallquellen im Zungenbereich und im Spaltbereich zwischen Lauftrad und Spiralgehäuse sowie breitbandige Schallquellen im Schaufelkanal mittels der Simulation detektiert.

Abstract

In addition to energy efficiency, the noise emission of fans is becoming increasingly more important. New research approaches in noise reduction may expand with the knowledge about the exact noise generation mechanisms of fans. Numerical simulation methods help to analyze these in detail and significantly reduce the number of cost- and time-intensive experiments. The Lattice Boltzmann method is appropriate for a direct calculation of aerodynamics and acoustics due to a low dissipation.

Sofar, there is a lack of knowledge to what extend the Lattice Boltzmann method is suitable to model the aerodynamics and acoustics of a centrifugal fan. The presented thesis addresses this question and answers it by means of extensive analyzes. Beside the variation of the operating points, also different installation conditions are considered, which have special characteristics with respect to tonal and broadband sound radiation. Furthermore, the simulation results are used to localize the sound sources of the presented centrifugal fan and to figure out their generation mechanism.

The integral characteristics as well as the visual analyzes using streamlines show very good agreement between the simulation and the experiment for all installation conditions. Running the fan in strong overload of the fan's characteristic curve shows a slightly higher deviation due to the unresolved boundary layer, but by increasing the numerical mesh resolution there is also a potential for improvement. The very good modelling of the acoustic narrowband spectra is remarkable. Higher harmonics of the blade passing frequency are slightly unpredicted. However, both the fundamental tones at blade passing frequency and the level of the broadband sound components, as well as the modes of a rotational speed-dependent and -independent nature that arise in the test rig, are reproduced almost perfectly by the simulation. Based on these results, tonal sound sources in the tongue area and in the gap area between impeller and spiral housing as well as broadband sound sources in the blade passages are detected by means of the simulation.