

Aeroakustische Untersuchung eines Radialventilators mit einer Lattice-Boltzmann Methode und Abgleich mit PIV-Messungen

Investigation of the aeroacoustics of a centrifugal fan with Lattice-Boltzmann methods and comparison with PIV measurements

R. Schäfer, A. Theis, T. Zaremba, T. Reviol, M. Böhle

Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen, Gottlieb-Daimler Straße, Gebäude 44, 67663 Kaiserslautern

Schlagworte: Aeroakustik, Lasermesstechnik, Lattice-Boltzmann Methode

Key words: Aeroacoustics, Laser measurement, Lattice-Boltzmann method

Abstract

Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Abgleich numerischer und experimenteller Methoden zur Bestimmung des aeroakustischen Verhaltens von Strömungsmaschinen, um zukünftig die aufwendigen experimentellen Messmethoden durch vergleichsweise zeitsparende numerische Methoden zu ersetzen. Hierzu wird in diesem Beitrag das aeroakustische Verhalten eines Radialventilators untersucht. Zunächst wird die Untersuchung des aerodynamischen Verhaltens des Radialventilators durchgeführt. Hierzu wird im ersten Schritt das Abströmfeld mittels PIV-Messungen betrachtet. Im zweiten Schritt erfolgt die Untersuchung der Maschine in einem schallarmen Raum, um das akustische Verhalten zu beurteilen. Der Radialventilator wird in zwei Konfigurationen untersucht. Anschließend wird der Abgleich mit numerischen Untersuchungen durchgeführt. Da sich die üblicherweise eingesetzten Navier-Stokes Löser als zu zeitintensiv herausgestellt haben, wird in der vorliegenden Untersuchung ein Lattice-Boltzmann Löser eingesetzt. Abschließend werden die Ergebnisse verglichen. Die Qualität der Ergebnisse lässt den Schluss zu, dass die Lattice-Boltzmann Methode (LBM) zur numerischen Untersuchung geeignet ist.

Einleitung

Durch die gestiegenen Anforderungen an das Geräuschverhalten von Strömungsmaschinen gewinnt die Akustik neben der Effizienz eine immer größere Bedeutung. Dies lässt sich insbesondere durch die Unterdrückung oder den vollständigen Ausschluss anderer Geräuschquellen erklären, wie dies z.B. im Bereich der Elektromobilität der Fall ist. Hierdurch tritt die Akustik einzelner Komponenten vermehrt in den Vordergrund und wird stärker wahrgenommen. Somit wird die Geräuschentwicklung zu einem zentralen Qualitätsmerkmal. Daher ist es von großer Bedeutung bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess Aussagen über die spätere Geräuschentwicklung tätigen zu können.

Der aktuelle Stand der Technik (Sanjose et al., 2017, Marsan and Moreau, 2018) sieht hierzu eine vorgelagerte Navier-Stokes basierte CFD-Simulation der Strömungsmaschine vor. Da die akustischen Größen allerdings in den üblicherweise angesetzten RANS-Simulationen nicht ausreichend korrekt berechnet werden können, ist in der Regel nur eine äußerst zeitintensive Large Eddy (LES)-Simulation zielführend (Carolus et al., 2006, Sorguven et al, 2009). Anschließend muss i.d.R. noch ein separates Akustikmodell eingesetzt werden, das basierend

auf den CFD-Ergebnisse das Akustikverhalten bewertet. Zum Abgleich erfolgt am Ende des Produktentwicklungsprozesses der Aufbau eines Prototyps zur akustischen Vermessung im reflexionsarmen Raum. Häufig folgt das Ergebnis, dass die simulierten Ergebnisse nur unzureichend genau bestimmt wurden – insbesondere, wenn aus Zeitgründen statt eines LES-Modells nur ein RANS-Ansatz verwendet wurde.

Motivation

Die äußerst zeitintensive numerische Untersuchung mit Navier-Stokes Solvern stellt sich als Problem bei der frühzeitig im Entwicklungsprozess positionierten Beurteilung des akustischen Verhaltens heraus. Hierzu soll in der vorliegenden Arbeit zur aeroakustischen Berechnung die LB-Methode eingesetzt werden. Die LBM kann als vielversprechender Ansatz zur aeroakustischen Berechnung angesehen werden, da im Rahmen dieser Berechnungsmethode kein zusätzliches Akustikmodell benötigt wird. Aus einer LBM-Berechnung lässt sich so neben der Strömung auch die Akustik direkt auswerten. Als weiterer gewichtiger Vorteil ist zu nennen, dass die Methode numerisch stabiler und zeitlich weit weniger intensiv ist, als Navier-Stokes basierte Berechnungsprogramme. Allerdings liegen durch die noch geringe Verbreitung der LBM weit weniger Erfahrungswerte bezüglich der Qualität einer solchen Berechnung vor. Daher soll in dieser Arbeit die Eignung der LBM an einem praxisnahen Beispiel nachgewiesen werden.

Vorgehen

In dieser Arbeit wird ein Radialverdichter auf sein aeroakustisches Verhalten untersucht. Wie zuvor erwähnt, kommt zur akustischen Berechnung anstatt eines klassischen Navier-Stokes-Lösers die noch relativ gering verbreitete LBM zum Einsatz. Der Radialventilator wird in zwei Konfigurationen untersucht. In der ersten Konfiguration wird der Radialventilator ohne Leiteinrichtung untersucht, das heißt, es wird die freie Abströmung aus dem Laufrad zugelassen. In der zweiten Konfiguration erfolgt die Untersuchung des Radialventilators mit Leiteinrichtung in Form eines Spiralgehäuses. Beide Konfigurationen sehen die abstrakte Untersuchung des Ventilators vor, ohne die spätere Einbausituation zu berücksichtigen. Allerdings erlaubt der Vergleich beider Konfigurationen Rückschlüsse auf die Auswirkung der Leiteinrichtung auf das akustische Verhalten der Gesamtmaschine, da sich insbesondere das Strömungsverhalten bei Ablösung, wie diese z.B. im Bereich der Zungengeometrie der Laufradspirale auftreten können, als akustisch kritisch erweist.

Das Vorgehen sieht zunächst die experimentelle Untersuchung des Ventilators vor, die im zweiten Schritt mit numerischen Untersuchungen abgeglichen wird. Die experimentelle Untersuchung beinhaltet die Ermittlung des aerodynamischen Abströmfeldes und die Vermessung des akustischen Verhaltens. Die Erfassung des Strömungsfeldes wird mittels PIV-Messmethoden durchgeführt, während die akustischen Untersuchungen in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die numerische Untersuchung. Hierzu kommt der kommerzielle Code PowerFLOW der Firma ExaCorp zum Einsatz. Ziel ist es, das aeroakustische Verhalten direkt zu berechnen. Die Validierung der Simulation durch das Experiment ist nötig, da die LBM bislang nicht weit verbreitet ist und nur wenige Untersuchungsfälle existieren. Insbesondere Radialventilatoren wurden trotz ihrer weiten Verbreitung bislang nur selten untersucht.

Grundlagen zur Lattice Boltzmann Methode

Die LBM basiert im Gegensatz zu den Navier-Stokes-Gleichungen auf einem mesoskopischen und nicht auf einem makroskopischen Ansatz. Dieser betrachtet die Strömungsvorgänge auf der molekularen Ebene, wobei Molekülbewegungen statistisch beschrieben werden. Mit Hilfe

einer Verteilungsfunktion wird die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt, ein Molekül mit einer bestimmten Geschwindigkeit an einer bestimmten Stelle im Raum zu finden. Diese Verteilungsfunktion ist gemäß Gleichung 1 definiert.

$$f(x, \zeta, t) = \frac{dN}{dV \cdot d\zeta} \quad (1)$$

Hierin steht dN für die Anzahl der Moleküle im Ortsvolumen dV und im Geschwindigkeitsbereich $d\zeta$, wobei das Ortsvolumen und der Geschwindigkeitsraum als Phasenvolumen zusammengefasst werden. Mit Hilfe der Boltzmann-Gleichung kann die Verteilungsfunktion f schließlich ermittelt werden. Diese leitet sich aus der Erhaltung der Partikel im Phasenvolumen her und ist in Tensornotation nach Gleichung 2 definiert

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \zeta_i \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{F_i}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \zeta_i} = \Omega_K(f) \quad (2)$$

Gleichung 2 kann in den Transportterm (linke Seite) und in den Kollisionsterm (rechte Seite) unterteilt werden. Der Transportterm beinhaltet die zeitliche, sowie konvektive Änderung der Verteilungsfunktion im Orts- und Geschwindigkeitsraum, während sich der Kollisionsterm aus einem komplexen Integral zusammensetzt. (Hänel 2004) Dieser muss daher durch einen wesentlichen einfacheren mathematischen Ansatz approximiert werden. Häufig wird hierzu das sogenannten BGK-Modell nach Bhatnagar, Gross und Krook zu Grunde gelegt. Dieses geht davon aus, dass jeder Nichtgleichgewichtszustand einen Gleichgewichtszustand anstrebt. Der Kollisionsterm ist wie folgt definiert, vgl. Gleichung 3.

$$\Omega_K(f) = -\omega \cdot (f - f^{eq}) \quad (3)$$

In Gleichung 3 beschreibt ω die Kollisionsfrequenz auf molekularer Ebene und gibt die Zeitspanne an, in der der Übergang vom Nichtgleichgewichts- zum Gleichgewichtszustand erfolgt. Die Nichtgleichgewichtsverteilung wird hierzu mit f und die lokale Gleichgewichtsverteilung mit f^{eq} beschrieben. Letztere wird mit Hilfe der Maxwell-Verteilung beschrieben. (Guo und Shu, 2013)

Zur Lösung der BGK-Boltzmann-Gleichung muss eine Diskretisierung in Zeit, Ortsraum und Geschwindigkeitsraum erfolgen. Die diskrete BGK-Boltzmann-Gleichung, die in Gleichung 4 dargestellt ist, wird als Lattice-BGK-Gleichung (LBGK-Gleichung) bezeichnet.

$$f_i(x + \zeta_i \cdot \partial t, t + \partial t) = f_i(x, t) + \omega \cdot \partial t \cdot (f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t)) \quad (4)$$

Wie in Gleichung 4 zu sehen ist, setzt sich ein Berechnungsschritt aus dem Transportschritt $f_i(x, t)$ und dem Kollisionsschritt $\omega \cdot \partial t \cdot (f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t))$ zusammen. Im numerischen Algorithmus werden beiden Schritte meist einzeln für jede Geschwindigkeit ζ_i in jedem Gitterpunkt sowie Zeitschritt berechnet. Durch eine explizite Zeitintegration kann die Verteilungsfunktionen $f_i(x, t + \partial t)$ für den nächsten Zeitschritt $t + \partial t$ bestimmt werden. (Hänel 2004)

Ist die Verteilungsfunktion $f(x, \zeta, t)$ bekannt, kann mit Hilfe der Bestimmung der Momente die interessierenden makroskopischen Größen ermittelt werden. Die Gleichungen 5, bzw. 6 zeigen beispielhaft die Momente für die Berechnung der Dichte und der Geschwindigkeit auf makroskopischer Ebene.

$$\rho(x, t) = \sum_{i=1}^{q-1} f_i(x, t) \quad (5)$$

$$\rho \cdot u(x, t) = \sum_{i=1}^{q-1} \zeta_i \cdot f_i(x, t) \quad (6)$$

Versuchsaufbau und Experimentelle Untersuchungen

Strömungsuntersuchung

Zur Strömungsuntersuchung wird der Ventilator in einer Vorrichtung aufgebaut, in der eine freie Abströmung gewährleistet werden kann, siehe Abbildung 1. Der Versuchsaufbau wird so gewählt, dass dieser auch in den nachfolgenden Akustikuntersuchungen eingesetzt werden kann.

Die Strömungsuntersuchung der Versuchsanordnung wird mit Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen durchgeführt. Das eingesetzte Lasersystem ist von der Firma DANTEC Dynamics. Bei dem Laser handelt es sich um einen Nd-Yag Dual Power Laser mit einer Pulsdauer von 5 ns. Der PIV-Laser wird so ausgerichtet, dass eine Ebene parallel zur Laufradebene aufgespannt werden kann. Die Ebene wird dabei so ausgerichtet, dass diese ca. bei halber Laufradaustrittsbreite, bzw. bei halbem Austrittsdurchmesser der Spirale auf den Versuchsaufbau trifft. Der Laser wird in einem Abstand von ca. 550 mm zum Austritt aus der Strömungsmaschine aufgestellt. Die erzeugte Laserlichtebene hat eine ungefähre Dicke von 2 mm. Die für die Lasermessungen eingesetzten Partikel werden durch Zerstäubung von Nebelfluid mit Druckluft erzeugt und über den Saugmund des Ventilators in die Strömung eingebracht. Die erzeugten Partikel haben eine ungefähre Größe von $2\ \mu\text{m}$.

Die Überwachung mit der CCD Kamera erfolgt mit Blick auf die Eintrittsöffnung des Ventilators. Die eingesetzte CCD-Kamera ist vom Typ Flow Sense EO 4MPixel mit einem Objektiv von Nikon (Brennweite 35 mm). Die Kamera wird in einem Abstand von ca. 500 mm zur Saugmundöffnung des Ventilators ausgerichtet. Die Aufnahmen werden mit einer mittleren Blende von 8 durchgeführt.

Das Postprocessing wird mit dem Programm Dynamic Studio 2015a durchgeführt. Zur Berechnung eines Vektorplots wird für jedes zu untersuchende Gebiet eine Größe von 32×32 Pixel gewählt. Die Überlappung zwischen den einzelnen Gebieten beträgt 50 %. Als Resultat wird ein Konturplot für die Geschwindigkeit erstellt, der mit den gemittelten Ergebnissen aus der Simulation verglichen werden kann.

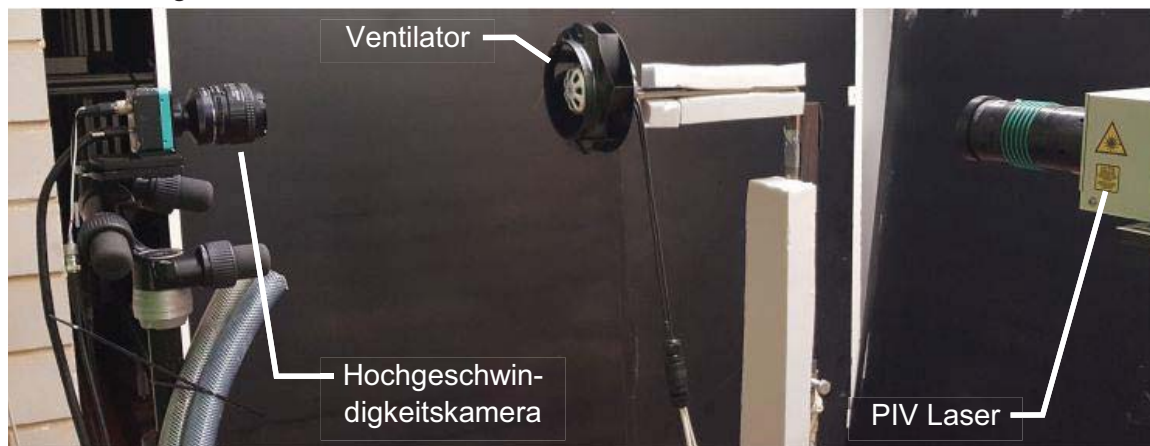
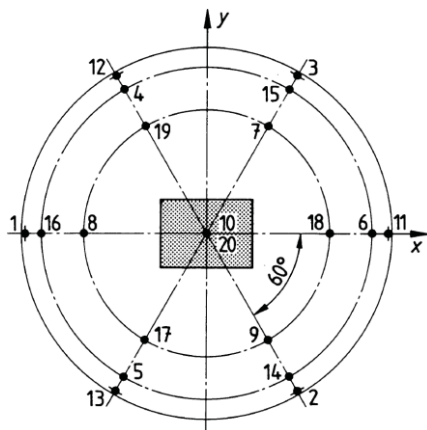


Abbildung 1: Versuchsanordnung der PIV Messung, bestehend aus Hochgeschwindigkeitskamera, PIV-Laser und Ventilator (Darstellung ohne Leiteinrichtung)

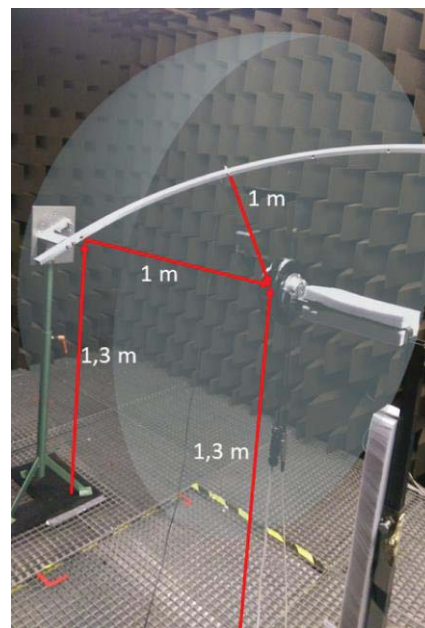
Akustikuntersuchung

Die Akustikuntersuchungen werden in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt. Die nutzbare Raumgröße beträgt ca. $3,02\ \text{m} \times 3,12\ \text{m} \times 5,45\ \text{m}$. Zur Schalldämpfung und -absorption ist der Raum von innen mit einer ca. $0,69\ \text{m}$ dicken Schaumstoffschicht, bestehend aus Schaumstoffkeilen verkleidet. Die Schwingungsisolierung des Raumes ist mit einer Aufhängung an Stahlfedern realisiert. Die so ausgeführte Konstruktion führt zu einer unteren theoretischen Grenzfrequenz von ca. 124 Hz. Mittig im Raum befindet sich eine Positionierungsmöglichkeit zum variablen Aufbau von Versuchsständen.

Die Ventilatoranordnungen mit und ohne Leiteinrichtung werden nach DIN 45635-01 vermessen. Bei der Messung von Schalldruck und Schalleistung kommt das Hüllflächenverfahren zum Einsatz. Hierzu werden mit einem Mikrofon verschiedene Koordinaten auf einer Halbkugel-Messfläche angefahren und dort der Schalldruckpegel gemessen. Abbildung 2a zeigt die schematische Anordnung der Messpositionen, verteilt um eine mittig gelegene Schallquelle, während in Abbildung 2b eine fotografische Darstellung des Versuchsaufbaus zu sehen ist. Am rechten Bildrand ist der Ventilatoraufbau zu erkennen (Darstellung ohne Leiteinrichtung), am linken und oberen Bildrand befindet sich die Applikation der Messeinrichtung. Hierzu wurde ein Mikrofon an einem kreisförmig gebogenen Messarm befestigt, dessen Kreismittelpunkt im Mittelpunkt der Ventilatorebene liegt. Der Radius beträgt 1 m. Auf diese Weise können die Messpositionen unkompliziert angefahren und vermessen werden. Je Messpunkt wird eine Messdauer von 10 s gewählt. Die eingesetzte Messtechnik ist von der Firma Müller-BBM. Die anschließende Auswertung erfolgt mit der PAK Software der Firma Müller-BBM in der Version 5.10. Anzumerken ist, dass zur Auswertung nur die Messpositionen 1-10 untersucht werden.



(a) Schematische Darstellung der Halbkugel-Messfläche, Messungen durchgeführt an den Positionen 1-10



(b) Fotografische Darstellung des Versuchsaufbaus (bestehend aus Messinstrumentierung und Ventilator ohne Spiralgehäuse) und Markierung der Position der Hüllfläche mit Angabe der geometrischen Ausbreitung

Abbildung 2: Versuchsaufbau als schematische und fotografische Darstellung

Numerische Untersuchungen

Die numerischen Untersuchungen werden mit dem Softwarepaket PowerFLOW der Firma ExaCorp in der Version 5.5c durchgeführt. Die Softwaresuite ermöglicht das vollständige Pre-processing und die Berechnung des Simulationsfalls mit der LBM und die anschließende Visualisierung der Strömung mittels eigener Postprocessing-Tools. Da die LBM keine Akustikmodelle zur Berechnung akustischer Größen benötigt, fallen diese Größen ebenfalls mit der Simulation an. Zur Auswertung dieser Größen wird das Postprocessing Tool PowerACOUSTICS eingesetzt. Das Diskretisierungsgebiet des numerischen Modells bildet den Ver-

suchsstand zur akustischen Untersuchung (vgl. Abbildung 2) als ideales Modell ab. Die Aufhängung des Ventilators wird hierbei vernachlässigt. Die Ausbreitung des reflexionsarmen Raums inklusive der Schaumstoffverkleidung sind in das numerische Modell integriert – die keilförmigen Schaumstoffelemente werden hierzu als sogenannte Sponge-Zones modelliert. Abbildung 3 zeigt eine schematische Übersicht über das Simulationsmodell. Die quaderförmigen Bereiche dienen der Definition der Sponge-Zones, sowie verschiedener Verfeinerungen – ebenso die kleineren Kugelstrukturen. Die größte Kugelstruktur gibt die halbkugelförmige Messfläche inklusive der Messpositionen wieder.

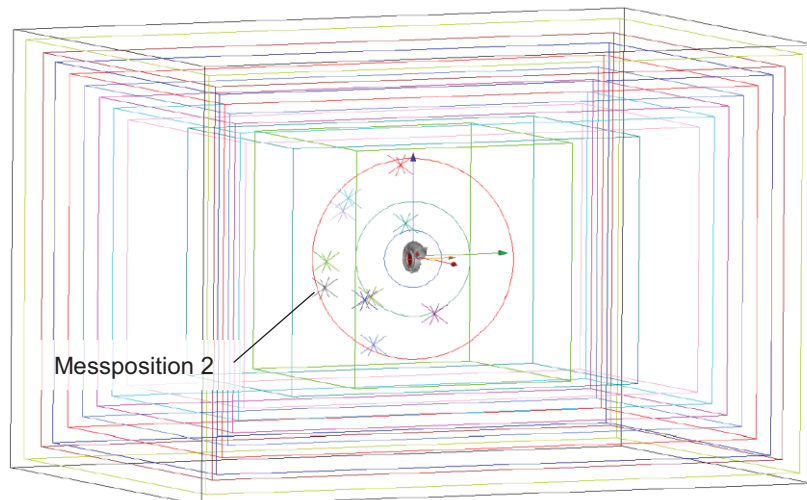


Abbildung 3: Schematische Darstellung des numerischen Simulationsmodells, Markierung von Schaumstoffverkleidungen (vgl. Experiment) und Verfeinerungsregionen durch Zonen, inkl. Angabe der Auswertepositionen auf Halbkugelfläche

Das Berechnungsgebiet wird in zwei Verfeinerungsvarianten simuliert: Resolution 190 und Resolution 380. Die Bezeichnungen erfolgen in Anlehnung an die Wahl der charakteristischen Länge, die als $1/100$ des Außendurchmessers des Ventilators von $d = 190\text{mm}$ gewählt wird. Die Verfeinerung Resolution 380 verfügt somit über eine Halbierung der Voxelgröße. Durch das Einstellen der Resolution von 190 beträgt die Abmessung eines Voxels in der feinsten Gitterzone $1,0 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$. Die Gesamtvoxelanzahl beträgt ca. 39.400.050 für die Variante ohne Leiteinrichtung und 39.406.231 für den Fall mit Spiralgehäuse. Die Resolution 380 wird mit 50.002.724 Voxel (ohne Leiteinrichtung), bzw. mit 49.988.400 Voxel (mit Spiralgehäuse) diskretisiert. Die kleinste Voxelgröße beträgt in diesem Fall $0,5 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$. In beiden Untersuchungsvarianten erfolgt insbesondere die Diskretisierung des Laufrades mit großem Aufwand.

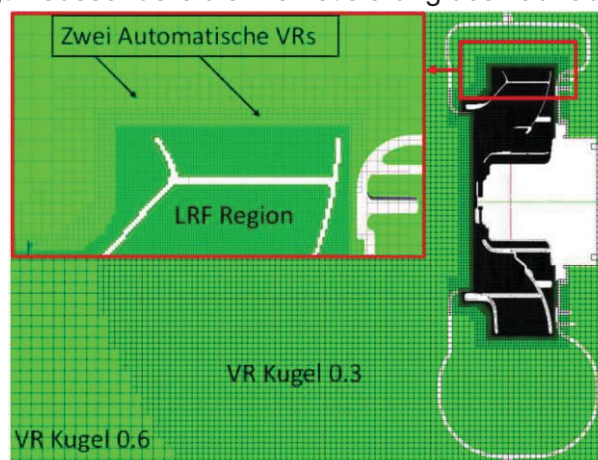


Abbildung 4: Schnitt durch das Berechnungsgebiet zur Visualisierung des Laufrades inklusive Detaildarstellung des Außenkantenbereichs des Laufrades, Darstellung inklusive Verfeinerungsregionen (VR)

Abbildung 4 zeigt exemplarisch einen Schnitt durch das Berechnungsgebiet im Bereich des Laufrades inklusive einer Detaildarstellung des Laufradaustrittes. Zu sehen sind außerdem einige Verfeinerungsregionen (VR), die in Abbildung 3 schematisch dargestellt sind. Diese Verfeinerungen sind im Bereich des Laufrades einerseits nötig, da dieses mit der Sliding-Mesh Variante modelliert wird und somit in diesem Bereich Interfaceberandungen eingesetzt werden müssen, aber auch andererseits wegen der erwarteten Strömungstopologie im Innern des Laufrades.

Die Randbedingungen werden gemäß der im Experiment anzutreffenden Bedingungen gesetzt. Deshalb werden die Sponge-Zones so modelliert, dass diese über ähnliche Viskositätsfaktoren verfügen, wie die Schaumstoffkeile. Freie Wände hingegen werden als Standard Wall modelliert. Die maximale Laufradgeschwindigkeit beträgt ca. $38,4 \text{ m/s}$ im Fall ohne Leitvorrichtung und ca. $37,7 \text{ m/s}$ im Fall mit Spiralgehäuse. Diese wurden im Experiment ermittelt und entsprechen einer Drehzahl von $3854,9 \text{ 1/min}$ bzw. ca. $3789,6 \text{ 1/min}$. Um ähnliche Ergebnisse, wie im Experiment zu erzielen, werden die Simulationen mit denselben Machzahlen durchgeführt ($Ma = 0,110$ ohne Leiteinheit und $Ma = 0,109$ mit Spiralgehäuse, Werte im Experiment ermittelt). Turbulenz wird im Rahmen der Simulation modelliert.

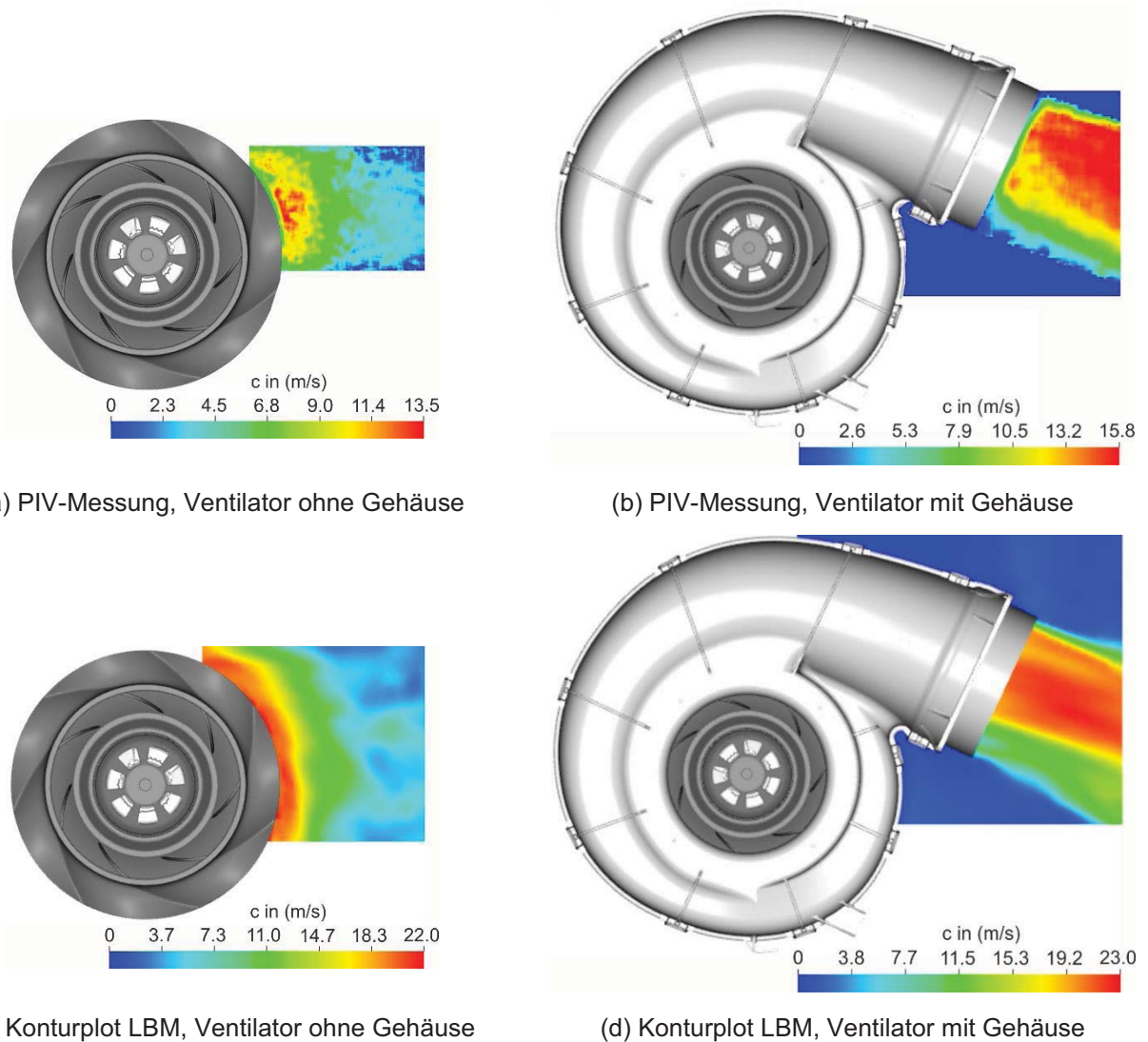


Abbildung 5: Ergebnisse der Strömungsuntersuchungen, Darstellung der PIV-Messung ((a) Ventilator ohne Spiralgehäuse und (b) Ventilator mit Spiralgehäuse) versus Konturplots der LBM-Berechnung ((c) Ventilator ohne Spiralgehäuse und (d) Ventilator mit Spiralgehäuse)

Ergebnisse

Strömungsuntersuchung

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Strömungsuntersuchung. In der linken Spalte sind jeweils die Ergebnisse der Untersuchungen ohne Spiralgehäuse dargestellt. Die rechte Spalte zeigt die Variante mit Leiteinrichtung. Die erste Zeile beinhaltet die Ergebnisse der PIV-Messung, während die zweite Zeile jeweils die Ergebnisse der numerischen Berechnung illustriert.

Der charakteristische Vergleich zwischen PIV-Messung und LBM-Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Insbesondere in der Variante mit Spiralgehäuse ist die durch die Spiralgeometrie verursachte Strömungsablösung im unteren Austrittsbereich in Experiment und Simulation sehr gut zu erkennen.

Die Ergebnisse weichen in ihrer Größenordnung allerdings voneinander ab. Dies liegt daran, dass in der Simulation nur eine Umdrehung erfasst und gemittelt wurde, während die Messung eine größere Anzahl an Umdrehungen berücksichtigt. Durch die Mittelung sind instationäre Effekte nicht aufgelöst – in der LBM ist die Mittelungsdauer jedoch geringer, als im Experiment. Unter Vernachlässigung der Maxima und bei Betrachtung der Strahlränder ist zu erkennen, dass Experiment und LBM nahezu gleiche Werte aufweisen. Der Abgleich zwischen Experiment und Simulation ist daher als funktional zu bewerten und es ist zu erwarten, dass die LBM die Strömungsvorgänge, die die Akustik beeinflussen in guter Genauigkeit abbilden kann.

Akustikuntersuchung

Wie die gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Strömungsuntersuchung vermuten lässt, sind die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Akustikuntersuchung ebenfalls sehr ähnlich. Tabelle 1 fasst die ermittelten Werte für Messflächenschalldruckpegel \bar{L}'_p und Schalleistung L_W von Experiment und LBM-Berechnung zusammen.

Tabelle 1: Messflächenschalldruckpegel \bar{L}'_p und Schalleistung L_W von Experiment und LBM-Berechnung, Ergebnisse für Konfiguration ohne und mit Spiralgehäuse

	Messflächenschalldruckpegel \bar{L}'_p		Schalleistung L_W	
	Ohne Gehäuse	Mit Gehäuse	Ohne Gehäuse	Mit Gehäuse
Experiment	73,56 dB	72,10 dB	81,54 dB	80,08 dB
LBM Resolution 190	65,23 dB	71,18 dB	73,21 dB	79,16 dB
LBM Resolution 380	66,55 dB	69,44 dB	74,54 dB	77,42 dB

Bei der Untersuchung der Konfiguration ohne Spiralgehäuse beträgt der Unterschied 7-8 dB, wohingegen die Konfiguration mit Leiteinrichtung nur über Abweichungen von ca. 3 dB verfügt. Die Ergebnisse der LBM decken die experimentellen Ergebnisse somit in sehr guter Genauigkeit ab.

Zusätzlich zum Schalldruckpegel und zur Schalleistung werden die Frequenzspektren aller Messpositionen untersucht. Exemplarisch ist in Abbildung 6 das Ergebnis von Messposition 2 dargestellt (vgl. Abbildung 3). Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung sind in blau, die der LBM-Berechnung (Resolution 380) in orange dargestellt. In Abbildung 6a ist die Konfiguration ohne Leiteinrichtung dargestellt, während Abbildung 6b die Variante mit Spiralgehäuse zeigt.

Auch in Abbildung 6 ist eine sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation zu sehen. Insbesondere der Drehklang (jeweils bei 443,8 Hz) wird für beide Varianten in der LBM korrekt berechnet. Ebenfalls zu sehen ist die gute Übereinstimmung der zweiten und dritten harmonischen Vielfachen des Drehklangs im Falle der Konfiguration mit Spiralgehäuse. Der Bereich der mittleren und hohen Frequenzen werden durch die LBM im Allgemeinen allerdings

gegenüber dem Experiment leicht unterschätzt – insbesondere für den Fall ohne Leiteinrichtung ist dies auffällig. Diese Abweichungen können z.B. durch Unterschiede zwischen Versuchsaufbau und Berechnungsmodell erklärt werden sowie durch die Einschränkung der räumlichen Auflösung im Bereich der Mikrofonpositionen in der Simulation. Der tonale Bereich wird jedoch wieder in sehr gute Genauigkeit wiedergegeben.

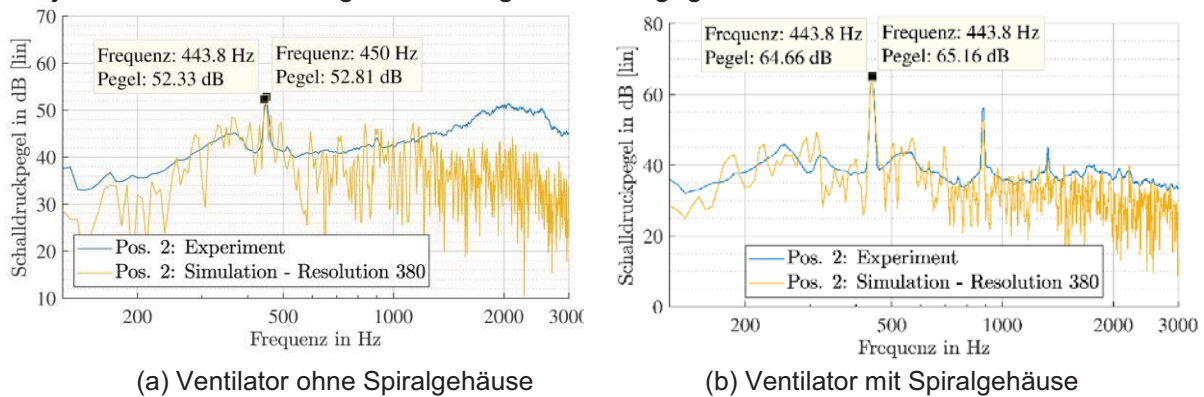


Abbildung 6: FFT-Analyse exemplarisch für Messposition 2 für beide Untersuchungskonfigurationen, Vergleich Experiment (blau) mit Simulation (orange), Simulationsergebnisse jeweils für Resolution 380

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Radialventilator mit experimentellen und numerischen Methoden untersucht, um den Einsatz der Lattice-Boltzmann-Methode als Tool zur frühzeitigen Ermittlung des aeroakustischen Verhaltens zu bewerten. Hierzu wurde zunächst das Strömungsfeld experimentell mit PIV untersucht um die Ergebnisse der LBM-Berechnung hinsichtlich des Strömungsgebietes zu validieren. Das Ergebnis zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Die daran anschließende akustische Untersuchung in einem reflexionsarmen Raum konnte ebenfalls sehr gut mit den Ergebnissen der LBM-Berechnung zur Deckung gebracht werden. Abschließend kann gesagt werden, dass die LBM eine vielversprechende Methode zur Berechnung des aeroakustischen Verhaltens darstellt.

Dankesworte

Die numerischen Untersuchungen wurden auf dem rheinland-pfälzischen Hochleistungsrechner "Elwetritsch" ausgeführt.

Literatur

- Sanjose, M., Moreau S., Gullbrand, J., 2017:** „Hybrid noise predictions of a radial notebook blower“, European Journal of Mechanics- B/Fluids, Vol. 61.
- Marsan, A., Moreau, S., 2018:** „Aeroacoustic analysis of the tonal noise of a large-scale radial blower“, Journal of Fluids Engineering, Vol. 140.
- Carolus, T., Schneider, M., Reese, H., 2007:** „Axial flow fan broad-band noise and prediction“, Journal of Sound and Vibration, Vol 300.
- Sorguven, E., Dogan, Y., Bayraktar, F., Sanliturk, K. Y., 2009:** „Noise prediction via large eddy simulation: Application to radial fans“, Noise Control Engineering Journal, Vol. 57.
- Hänel, D., 2004:** „Molekulare Gasdynamik: Einführung in die kinetische Theorie der Gase und Lattice-Boltzmann-Methoden.“, Springer.
- Guo Z., Shu, C., 2013:** „Lattice Boltzmann Method and Its Applications in Engineering“. World Scientific Publishing Company.