Lokalisierung von Schallquellen aus numerischen Daten

Philipp Dietrich, Marius Dörr, Marc Schneider
ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG,
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Deutschland,
Email: philipp.dietrich@de.ebmpapst.com

Kurzzusammenfassung

Bei der Entwicklung neuer Ventilatoren ist neben den aerodynamischen Eigenschaften das erzeugte Geräusch von großer Bedeutung. Zur Optimierung des emittierten Geräusches spielt das Verständnis der Schallerzeugungsmechanismen als auch die Lokalisierung der Schallquellen eine bedeutende Rolle. Zur Lokalisierung von Schallquellen wird im Experiment häufig ein Mikrophon-Array verwendet. Neben der experimentellen Untersuchung der Akustik von Ventilatoren gewinnen numerische Verfahren (CAA – Computational Aero Acoustics) zunehmend an Bedeutung. Auf Basis der numerischen Daten kann ebenfalls ein Mikrophon-Array erzeugt und mit dem Beamforming-Verfahren Schallquellen lokalisiert werden.

Zwar können mit numerischen Verfahren, aufgrund des hohen Rechenaufwands, typischerweise nur sehr kurze Zeitreihen untersucht werden; allerdings haben bestimmte experimentelle Randbedingungen einen untergeordneten bzw. vernachlässigbaren Einfluss. So können beispielsweise sehr große Arrays mit einer Vielzahl an Mikrophonen oder auch mit dem Ventilator mitrotierende Arrays realisiert werden. Dadurch lassen sich unterschiedliche Arrays einfach vergleichen und auch kombinieren.

Neben der Anordnung der Mikrophone lassen sich auch die akustisch aktiven Oberflächen beeinflussen. So wurde eine Ventilatorschaufel in mehrere Teilflächen unterteilt und die Spektren sowie das Beamforming-Ergebnis einzeln ausgewertet. Über diese Methode können die Qualität des verwendeten Mikrophon-Arrays getestet und Schallentstehungsmechanismen analysiert werden.

Einleitung

Besonders bei Geräten, die in der Nähe von Menschen betrieben werden (z.B. Klimaanlagen, Dunstabzugshauben, etc.), ist es wichtig das abgestrahlte Geräusch zu minimieren. Einen großen Einfluss auf das abgestrahlte Geräusch hat der in der Applikation eingesetzte Ventilator. Für die Entwicklung neuer akustisch optimierter Ventilatoren ist das Verständnis der Mechanismen und des Ortes der Schallentstehung von großer Bedeutung. Für die experimentelle Lokalisierung von Schallquellen wird bei ebm-papst ein Mikrophon-Array eingesetzt. Im Rahmen von vorherigen Arbeiten (Lucius et al. [1]) wurde dieses Verfahren auch auf numerisch erzeugte Daten angewandt.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt die Schallquellenlokalisation aus numerischen Daten mittels Mikrophon-Array zu verbessern und Schallentstehungsmechanismen zu analysieren. Diese Untersuchungen werden anhand der Simulation eines Schaufelkanals eines Axialventilators durchgeführt. Das jeweils verwendete Mikrophon-Array wurde in einem schaufelfesten Koordinatensystem definiert. In Abbildung 1 ist der Vergleich der spektralen Leistungsdichte des Schalldrucks für ein saugseitiges Mikrophon mit der Messung gezeigt.

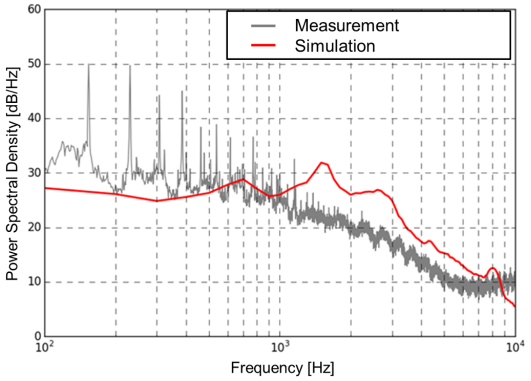

Abbildung 1: Vergleich der spektralen Leistungsdichte des Schalldrucks der Simulation (rot) mit der Messung (grau) für ein saugseitiges Mikrophon bei einem Axialventilator mit ca. 1 m Durchmesser

In diesem Fall können Abweichungen zwischen Messung und Simulation erkannt werden. Diese wurden bereits im Rahmen einer studentischen Arbeit bei ebm-papst untersucht (Gutte [2]) und konnten der verwendeten Simulationstechnik zugeordnet werden. Da bei diesen Untersuchungen der Fokus auf der Weiterentwicklung der Schallquellenlokalisation bei Ventilatoren liegt, wurde diese Simulation trotz der gefundenen Abweichungen für die weiteren Arbeiten verwendet.

Die hier vorgestellten Untersuchungen basieren ebenfalls auf einer bei ebm-papst durchgeführten studentischen Arbeit (Dörr [3]). Im Rahmen dieser Arbeit wurden 2 verschiedene Ansätze die Schallquellenlokalisation auf Basis von numerischen Daten analysiert und bewertet.

1. Teilflächenanalyse:
   Betrachtung der Schallabstrahlung von einzelnen Teilen der Schaufeloberfläche

2. Beamforming mit 3D-Array:
   Verwendung eines dreidimensionalen Arrays und Auswertung nach Evans et al. [4]

Teilflächenanalyse

Für die Analyse der Schallabstrahlung von Teilbereichen der Ventilatorschaufel, wurde diese in 101 Teilflächen unterteilt. Diese Aufteilung ist in Abbildung 2 dargestellt.

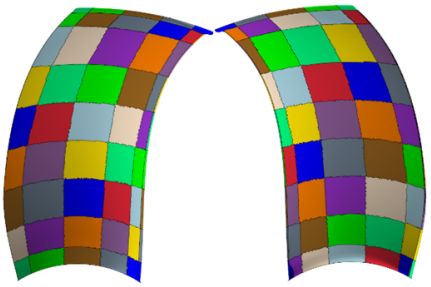

Abbildung 2: Aufteilung der Oberfläche der Ventilatorschaufel in 101 Teilflächen

Durch diese Unterteilung kann nun die Schallabstrahlung von jeder einzelnen Teilfläche zu einem Mikrophon bzw. einem Mikrophon-Array berechnet und der frequenzabhängige Pegel direkt auf der Schaufel dargestellt werden. Die Schallausbreitung von der Oberfläche zu den Mikrophonen wurde nach Ffowcs-Williams und Hawkings berechnet. Für ein saugseitig platziertes Mikrophon-Array ist in Abbildung 3 der Vergleich der Schallquellenlokalisation zwischen Simulation und Messung dargestellt.

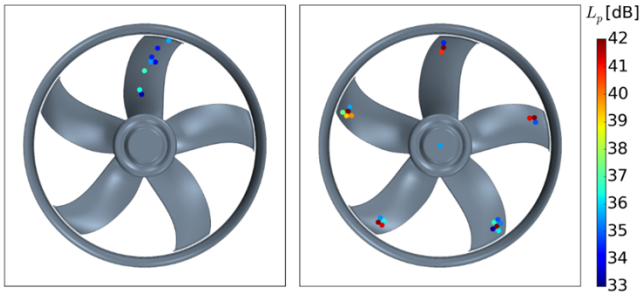

Abbildung 3: Vergleich der Schallquellenlokalisation mit CLEAN-SC zwischen Simulation (links) und Messung (rechts) für ein saugseitiges Mikrophon-Array für das Terzband bei 1 000 Hz

Wie bereits in Abbildung 1 gezeigt weist die Simulation Abweichungen zur Messung auf, die sich auch in der Schallquellenlokalisation mit Beamforming widerspiegeln. Durch die Aufteilung in Teilflächen ist es nun möglich die einzelnen Bereiche der Schaufel separat zu den Mikrophonen auszubreiten. So konnte bestätigt werden, dass die mittels Mikrophon-Array gefundenen Schallquellen aus dem mittleren Bereich der Schaufel abgestrahlt werden und nicht durch ein Zusammenspiel von Schallquellen aus Vorder- und Hinterkante der Schaufel entstehen. Durch die Analyse der einzelnen Teilflächen für ein saugseitiges Mikrophon (vgl. Abbildung 4) ist zudem zu erkennen, dass auf der Saugseite die Quellen im Bereich größerer Radien liegen. Auf der Druckseite sind die Quellen entlang der mittleren Sektion der Schaufel verteilt.

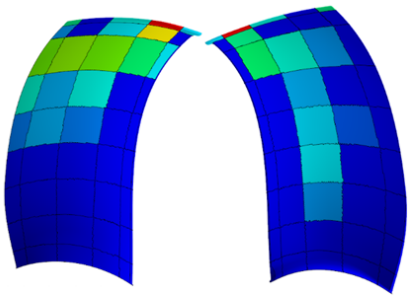

Abbildung 4: Einfärbung der einzelnen Teilflächen auf Saug- (links) und Druckseite (rechts) nach Schalldruckpegel für ein saugseitiges Mikrophon für das Terzband bei 1 000 Hz

Die in Abbildung 3 gezeigten zusätzlichen Quellen in der Simulation bei kleinen Radien können durch die Analyse der Teilflächen der Druckseite zugeordnet werden. Durch die Lokalisation dieser Schallquellen im unteren Bereich der Schaufel ist es nun durch die Aufteilung in Teilflächen möglich diesen Teil für die Ausbreitung auszublenden. Die Teilflächenanalyse für die Saugseite für diesen Teil sowie das dazu gehörige Beamforming-Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

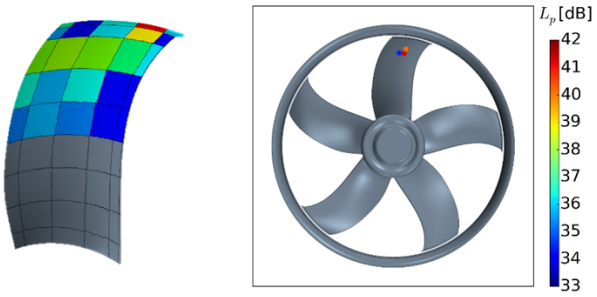

Abbildung 5: Schallquellenlokalisation (rechts) von einem Teil der Schaufel (links) für das Terzband bei 1 000 Hz

Es ist zu erkennen, dass durch die Ausblendung der zusätzlichen Quellen in der Simulation die Quellen bei deutlich größeren Radien gefunden werden. Dies passt zur Lokalisation der Schallquellen mittels der Teilflächenanalyse und ist in guter Übereinstimmung mit der Messung. Auch ist zu erkennen, dass im Vergleich zur ursprünglichen Lokalisation (Abbildung 3) die Quellen im äußeren Bereich nun höhere Pegel aufweisen. Dies wird durch die Messung ebenfalls bestätigt. Dies deutet auf eine destruktive Interferenz zwischen den Quellen in den berücksichtigten und nicht berücksichtigten Bereichen der Ventilatorschaufel hin.

Durch die Aufteilung der Schaufel in einzelne Teilflächen ist es möglich den Beitrag einzelner Bereiche der Schaufel auf die Schallentstehung genauer zu analysieren. So können beispielsweise einzelne Phänomene bestimmten Bereichen der Schaufel zugeordnet werden. Im Vergleich zum traditionellen saugseitigen Beamforming ist es zudem möglich druck- und saugseitige Effekte zu trennen. Auch können mit dieser Methode einzelne Bereiche ausgeblendet werden und das Verhalten auf die Schallabstrahlung untersucht werden. Dadurch lassen

sich z.B. Bereiche konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz identifizieren.

Beamforming mit 3D-Array

Neben der Möglichkeit unterschiedliche Bereiche der Ventilatorschaufel separat zu betrachten, bietet die numerische Simulation die Möglichkeit sehr große Mikrophon-Arrays mit sehr vielen Mikrophonen zu realisieren. Evans et al. [4] entwickelten basierend auf CAA-Daten eines Fahrzeug Außenspiegels eine Technik, mehrere dreidimensionale Mikrophon-Arrays gleichzeitig zur Lokalisierung von Schallquellen zu verwenden. Die Idee besteht darin, die Quellverteilung der einzelnen Mikrophon-Arrays zu überlagern und Fehllokalisierungen, z.B. durch Nebenkeulen der einzelnen Arrays, herauszufiltern. Diese Technik wird im Folgenden auf die bereits im vorherigen Kapitel verwendete Simulation der Ventilatorschaufel angewandt.

In Anlehnung an Evans et al. [4] wurde ein neues dreidimensionales Mikrophon-Array entwickelt. Dazu wurden insgesamt 20 000 Mikrophone zufällig in einer Hohlkugel (R = 12 - 16.5 m) verteilt. Die Ausbreitung der Simulationsdaten zu den einzelnen Mikrophonen erfolgte wiederum nach Ffowcs-Williams und Hawkings. Im Rahmen von Voruntersuchungen anhand zufällig in einer Ebene verteilter Monopolquellen konnte gezeigt werden, dass eine Aufteilung der Mikrophone in 25 Unterarrays mit jeweils 800 Mikrophonen eine optimale Reduktion der Nebenquellen im Verhältnis zur Genauigkeit der Lokalisierung darstellt. Abbildung 6 zeigt die sich ergebende Quellverteilung auf der Schaufeloberfläche für das Terzband bei 1 000 Hz.

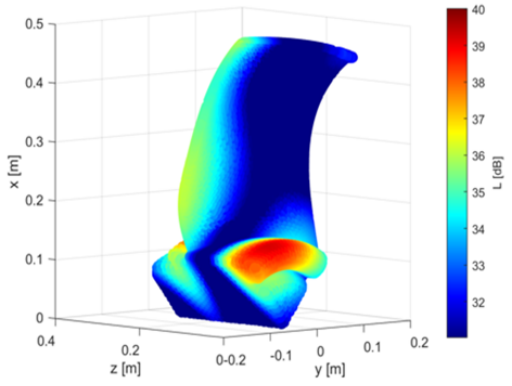

Abbildung 6: Schallquellenlokalisation mit 3D-Array (25 Unterarrays mit je 800 Mikrophonen) auf Schaufeloberfläche für das Terzband bei 1 000 Hz

Es ist zu erkennen, dass die größten Schallquellen im Nabenbereich gefunden werden, wohingegen in der Mitte der Schaufel (vgl. Messung in Abbildung 3) keine Quellen gefunden werden. Bei der Betrachtung des 3D-Fokusgebiets um die Schaufel, wie in Abbildung 7 dargestellt, lässt sich der Grund für diese Verteilung erkennen.

Für die Lokalisierung mit dem verwendeten Beamformer werden Monopolquellen angenommen. Für Ventilatoren bei niedrigen Machzahlen dominieren dipolartige Schall-

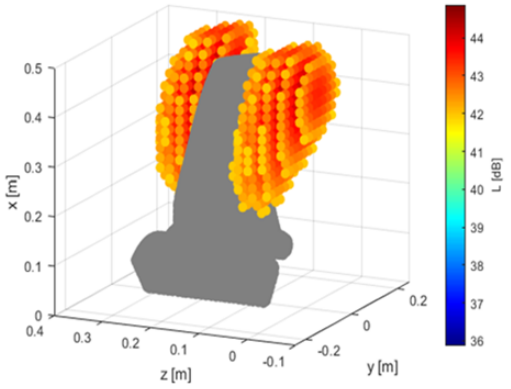

Abbildung 7: Schallquellenlokalisation mit 3D-Array (25 Unterarrays mit je 800 Mikrophonen) auf einem 3D-Fokusgitter um die Schaufel für das Terzband bei 1 000 Hz

quellen die entstehende Akustik. Dieser Effekt tritt nun auf, da das dreidimensionale Array von allen Seiten auf die Quelle fokussiert. Anders als ein Monopol besitzt das Schallfeld eines Dipols eine Richtcharakteristik. Diese ist normal zur jeweiligen Oberfläche orientiert. Ein saugseitiges Mikrophon-Array, wie es beispielsweise in der Messung verwendet wird, ist annähernd parallel zur Saug- bzw. Druckseite ausgerichtet, sodass alle Mikrophone in der Hauptabstrahlrichtung des Dipols liegen und somit die Annahme einer Monopol-Quelle möglich ist. Wie in Abbildung 7 gezeigt, entsteht druck- und saugseitig der Schaufel jeweils 1 Quellgebiet. Der Mittelpunkt der Verbindungslinie der beiden Quellgebiete befindet sich direkt auf der Schaufel. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Schallquellen durch dipolartige Quellen hervorgerufen werden, da sich ein Dipol durch 2 gegenphasige Monopole im Abstand von $\frac{\lambda}{2}$ darstellen lässt. λ steht dabei für die akustische Wellenlänge.

Nach Evans et al. [4] muss die Green'sche Funktion für diesen Fall auf einen Dipol angepasst werden. Dies geschieht prinzipiell, in dem die Richtungsableitung der Green'schen Funktion für einen Monopol nach dem jeweiligen Oberflächennormalenvektor (f_p) gebildet wird. Wird zusätzlich wie von Evans vorgeschlagen berücksichtigt, dass entgegen der Annahme nach Ffowcs-Williams und Hawkings eine Ausbreitung durch die Schaufel nicht möglich ist, ergibt sich neben der angepassten (tailored) Green'schen Funktion noch eine weitere Nebenbedingung. Diese sieht vor, dass die Mikrophone, die keinen direkten Ausbreitungspfad zum Fokuspunkt aufweisen für die Berechnung der Quellstärke für diesen Fokuspunkt nicht berücksichtigt werden. Mit diesen beiden Anpassungen ergibt sich für einen Fokuspunkt auf der Oberfläche der Schaufel die in Abbildung 8 schematisch dargestellte Abstrahlung.

Der Winkel α wurde in Anlehnung an Evans zu 15° gewählt. Unter Verwendung der Anpassungen für dipolartige Schallquellen ergibt sich für das Terzband um 1 000 Hz die in Abbildung 9 dargestellte Quellverteilung auf der Schaufeloberfläche.

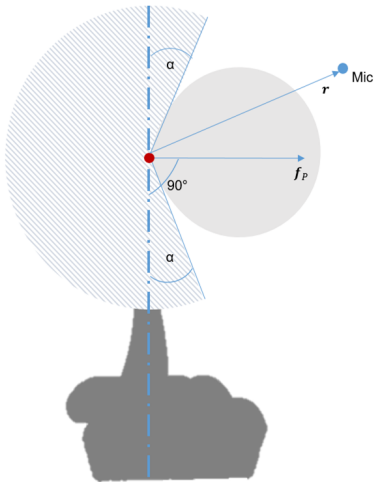

Abbildung 8: Schematische Darstellung der Ausbreitung eines Dipols von der Oberfläche der Ventilatorschaufel

Durch die Berücksichtigung der Abstrahlcharakteristik ist eine ähnliche Quellverteilung wie in der Messung (ref. Abbildung 3) zu beobachten. Die im vorherigen Kapitel gezeigte dominantere Saugseite im Vergleich zur Druckseite ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Die Hinterkante weist eine im Vergleich zur restlichen Schaufel deutlich geringere Quellstärke auf. Dies lässt sich durch die Abstrahlcharakteristik des Dipols erklären, wie sie beispielsweise auch bei der Akustik von Hinterkantenschall am Tragflügel beobachtet werden kann. Im Vergleich zur Messung bzw. dem Pegel im Spektrum bei 1 000 Hz wird der Pegel als deutlich zu niedrig wiedergegeben. Dies erlaubt aktuell nur eine qualitative und keine quantitative Analyse der Daten.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 2 Ansätze gezeigt, Schallquellen auf Basis numerischer Simulationen von Axialventilatoren zu lokalisieren bzw. Schallentstehungsmechanismen zu untersuchen. Mit der Teilflächenanalyse lassen sich einzelne Bereiche der Ventilatorschaufel bezüglich der Schallabstrahlung separieren und vergleichen. Dadurch können Schallquellen isoliert werden und Schallentstehungsmechanismen wie konstruktive und destruktive Interferenz untersucht werden.

Mit der 3D-Beamforming Methode wurde eine Analyse aufgebaut und getestet, die eine dreidimensionale Quelllokalisierung auf der Schaufel erlaubt. Im vorliegenden Fall einer Ventilatorschaufel muss aufgrund der dominanten dipolartigen Quellen die Green'sche Funktion angepasst und die tatsächliche Abstrahlcharakteristik eines Dipols an einer Oberfläche berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen und der von Evans et al. [4] entwickelten Methode mehrerer Unterarrays anstatt eines großen Arrays zu verwenden, können unterschiedliche Schallentstehungsgebiete auf der Schaufel geortet werden.

Beide Methoden wurden in dieser Arbeit anhand einer ausgesuchten Ventilatorsimulation getestet. Zukünftig

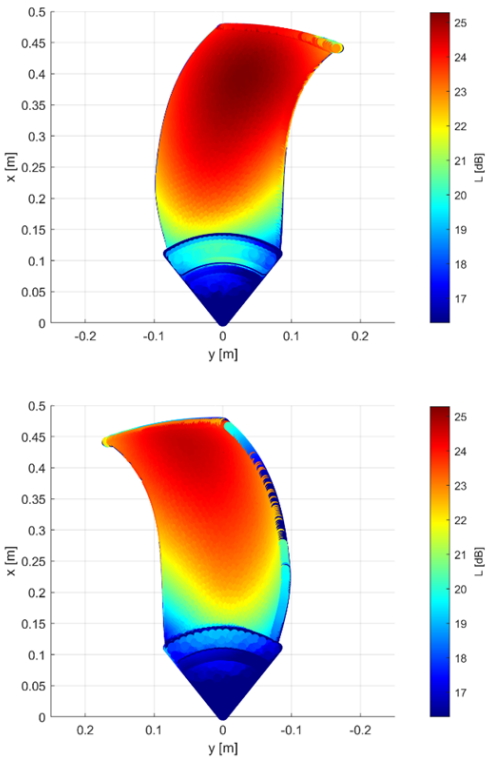

Abbildung 9: Quellverteilung auf Saug- (oben) und Druckseite (unten) der Ventilatorschaufel mit 3D-Beamforming mit 25 Unterarrays mit je 800 Mikrophonen und angepasster Green'scher Funktion für das Terzband bei 1 000 Hz

sollen diese Methoden auf weitere Fälle angewendet werden. Die Teilflächenanalyse kann dazu verwendet werden, Schallentstehungsmechanismen genauer zu verstehen und dazu dienen leisere Ventilatoren zu entwickeln. Für das 3D-Beamforming muss neben der Reduktion des sehr hohen Rechenaufwands auch die Gewichtung der Pegel untersucht werden, da diese aktuell deutlich zu niedrig bestimmt werden. Auch kann der Einsatz höherwertiger Entfaltungsalgorithmen untersucht werden, um die Lokalisation weiter zu verbessern.

Literatur

[1] Lucius, A., Dietrich, P., Schneider, M., Geyer, T.: Schallquellenlokalisation aus CAA-Simulationen von Ventilatorflügeln mit Hilfe von Mikrofon-Array Techniken. DAGA2019, Rostock, 2019

[2] Gutte, S.: Acoustic sources localization using the beamforming method on aero-acoustic simulations of axial fans. Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2019

[3] Dörr, M.: Schallquellenlokalisation mit Beamforming-Verfahren auf Basis numerischer Simulationen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020

[4] Evans, D., Hartmann, M., Delfs, J.: Beamforming for point force surface sources in numerical data. Journal of Sound and Vibration (2019), 303-319