Direkte Schallquellenlokalisation aus numerischen Oberflächendaten

Richard Ruck[1], Philipp Dietrich[1], Marc Schneider[1], Jan W. Delfs[2]

[1] *ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, 74673 Mulfingen, richard.ruck@de.ebmpapst.com*
[2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), 38108 Braunschweig*

Einleitung

Bei der Entwicklung von Ventilatoren nehmen neben aerodynamischen auch akustische Eigenschaften einen immer wichtigeren Stellenwert ein. Zur Optimierung des emittierten Geräusches werden verstärkt numerische Berechnungsverfahren (CAA) eingesetzt, die sich meist auf spektrale Analysen der Fernfeldakustik beschränken. Für ein tiefergehendes Verständnis der Schallentstehung kann allerdings eine räumliche Lokalisation der dominanten Schallquellen von entscheidender Bedeutung sein. Zu diesem Zweck werden unter anderem Beamforming-Algorithmen eingesetzt, bei denen anhand von Mikrofonarrays und unter Annahme einer bekannten Schallausbreitung aus gemessenen oder numerisch berechneten Fernfeld-Druckfluktuationen eine Rekonstruktion der akustischen Oberflächenquellen erfolgt [1] [2].

Im Vergleich zu experimentellen Untersuchungen stehen im Zuge numerischer Berechnungen allerdings auch räumlich hochaufgelöste Druckfluktuationen auf den Oberflächen der Ventilatorschaufeln zur Verfügung. Da diese Informationen die Physik der Quellmechanismen am Ort der tatsächlichen Schallentstehung beinhalten, scheint ein Verfahren zur direkten Quelllokalisation auf Basis dieser Daten naheliegend.

Auf Grundlage des Helmholtz-Kirchhoff-Integrals wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem die abstrahlungsfähigen aeroakustischen Fluktuationen von den nicht-abstrahlungsfähigen aber dominanten hydrodynamischen Oberflächendaten getrennt und somit als akustische Quellkarte genutzt werden sollen.

Beamforming auf Basis von Fernfelddaten

Bei Ventilatoren mit üblicherweise kleinen Machzahlen stellen instationäre Kräfte auf den festen Wänden von Laufrad, Leitapparat und Gehäuse den dominanten Schallentstehungsmechanismus dar. Diese resultieren aus der Wechselwirkung zwischen der turbulenten Strömung mit den festen Begrenzungsflächen (*loading noise*). [3] [4]

Zur Lokalisation dieser Oberflächenquellen werden häufig Beamforming-Verfahren genutzt. Diese sind in ihrer Anwendung nicht nur auf experimentelle Messdaten beschränkt, sondern können auch auf Basis numerischer Daten eingesetzt werden. Ein mögliches Vorgehen besteht nach Abbildung 1 darin, dass zunächst eine hochaufgelöste Strömungssimulation (LES) des Ventilators durchgeführt wird. Auf Basis der ermittelten Fluktuationen auf den Schaufeloberflächen erfolgt anschließend eine akustische Propagation nach Analogie von Ffowcs-Williams & Hawkings (FW-H) in das akustische Fernfeld bzw. zu den Mikrofonen eines virtuellen Mikrofonarrays. Der Einsatz von Beamforming-Algorithmen führt letztendlich zu einer akustischen Quellkarte, der entnommen werden kann, welche Bereiche des Ventilators besonders dominant in der Schallabstrahlung sind.

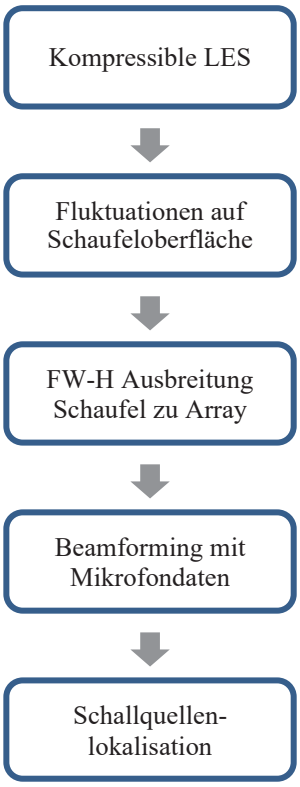

Abbildung 1: Vorgehensweise numerisches Beamforming

Direkte Schallquellenlokalisation aus numerischen Oberflächendaten

Bei genauerer Betrachtung dieses Vorgehens ist ersichtlich, dass sämtliche zur Ermittlung der Schallquellen benötigten Informationen am Ort der tatsächlichen Schallentstehung (d.h. die Fluktuationen auf der Schaufeloberfläche) bereits der Strömungssimulation entnommen werden können. Aus diesem Grund scheint ein Ansatz für eine direkte Quelllokalisation naheliegend, der ohne eine Ausbreitung in das akustische Fernfeld sowie die anschließende Rekonstruktion der Oberflächenquellen durch Beamforming-Verfahren auskommt.

Da die Oberflächendaten allerdings durch Effekte des akustischen Nahfeldes dominiert werden, eignen sich diese

nicht direkt für eine akustische Bewertung. Dies zeigt bspw. ein Vergleich zwischen den LES-Oberflächenfluktuationen eines typischen Axialventilators und einer aus diesen nach Vorbild von Abbildung 1 ermittelten akustischen Quellkarte. So sind hohe Druckfluktuationen hauptsächlich im Bereich von Vorderkante und Schaufelmitte zu sehen, während sich die dominanten Schallquellen im Bereich der Hinterkante befinden. Eine direkte Assoziation zwischen den beiden Größen ist demnach nicht möglich. (Vgl. Abbildung 2)

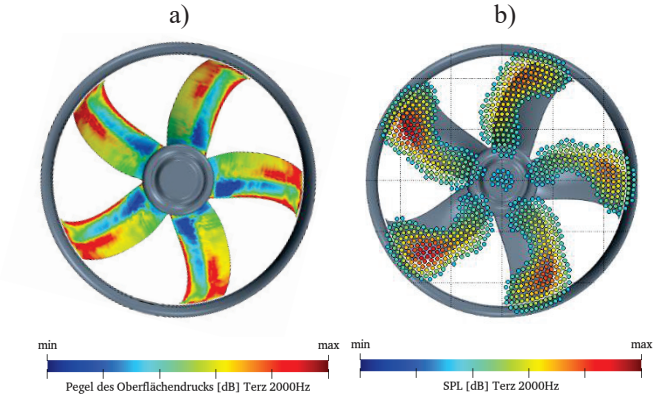

Abbildung 2: a) Oberflächendruck und
b) aus Simulationsdaten erzeugte Beamforming-Ergebnisse

Aus diesem Umstand ergibt sich die Notwendigkeit, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die dominanten hydrodynamischen aber nicht-abstrahlungsfähigen von den akustisch abstrahlungsfähigen Fluktuationen getrennt werden können. Diese Trennung erfolgte bisher durch die Propagation ins akustische Fernfeld.

Solch ein bereinigter akustischer Oberflächendruck $\hat{p}_{acoustic}$ kann als Differenz zwischen kompressiblem $\hat{p}_{comp}$ und inkompressiblem Oberflächendruck $\hat{p}_{incomp}$ definiert werden. So beinhalten beide Felder hydrodynamische Anteile, während die akustischen Anteile ausschließlich im kompressiblen Oberflächendruck enthalten sind. Diese Größe könnte ähnlich wie Beamforming-Ergebnisse eine Aussage darüber ermöglichen, welche Bereiche des Ventilators besonders relevant für die Schallabstrahlung sind.

$$\hat{p}_{acoustic} = \hat{p}_{comp} - \hat{p}_{incomp} \tag{1}$$

Da in der Regel nur einer der beiden Bestandteile aus einer Simulation bekannt ist, ist dessen Ermittlung zunächst nicht möglich. Im Fall des nach Abbildung 1 beschriebenen Vorgehens, besteht die Herausforderung deshalb darin, den unbekannten inkompressiblen Oberflächendruck aus dem aus der kompressiblen LES bekannten kompressiblen Oberflächendruck zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird ein Ansatz über ein akustisches Streuproblem (*Incident Scattering Problem*) vorgeschlagen.

Incident Scattering Problem

Die Ausbreitung akustischer Wellen ist für eingeschwungene harmonische Zustände und bei Annahme ruhender Medien durch die Helmholtz-Gleichung gegeben.

$$\Delta\hat{p}_x + k^2\hat{p}_x = 0 \tag{2}$$

Dabei beschreibt Δ den Laplace-Operator, k die Wellenzahl und $\hat{p}_x$ den Fourier-Koeffizienten des zeitabhängigen Schallwechseldrucks p'_x am Ort $\boldsymbol{x}$.

Für die ungestörte Ausbreitung (*freefield*) von monopolartigen Kugelwellen existiert mit der Greenschen Funktion $G_H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})$ eine Fundamentallösung der Helmholtz-Gleichung.

$$G_H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) = \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \quad \text{mit} \quad r = |\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}| \tag{3}$$

Hierbei beschreibt $\boldsymbol{x}$ den Quellort, $\boldsymbol{\xi}$ einen Beobachterpunkt.

Für den Fall, dass sich im betrachteten Gebiet ein beliebiger Körper B mit der geschlossenen Oberfläche ∂V_B befindet, steht eine solche Lösung im Allgemeinen nicht zur Verfügung. Das durch Beugungs- und Reflexionseffekte geprägte Schallfeld $\hat{p}_x$ (*scattered field*) wird durch das Helmholtz-Kirchhoff-Integral des Streuproblems beschrieben. Eine detaillierte Herleitung findet sich in [5].

$$c\cdot\hat{p}_x = \hat{p}_{freefield,x} + \int_{\partial V_B}\left[\hat{p}_\xi\cdot\frac{\partial G_H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})}{\partial n_\xi} - \frac{\partial\hat{p}_\xi}{\partial n_\xi}\cdot G_H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})\right]dS(\xi) \tag{4}$$

Die Konstante c ist 0, wenn sich x im Inneren des Körpers B befindet und 1, wenn sich $\boldsymbol{x}$ außerhalb befindet. Wenn sich $\boldsymbol{x}$ auf der Oberfläche ∂V_B befindet, nimmt c den Wert $1/2$ an. n_ξ bezeichnet den nach außen gerichteten Oberflächen-Normalenvektor (Vgl. Abbildung 3) und $\hat{p}_{freefield,x}$ beschreibt das ungestörte Schallfeld, wenn keine Berandung durch ∂V_B existiert. Für Streuprobleme mit bspw. monopolartigen Quellen kann die Berechnung des Freifeldes anhand von Gleichung (3) erfolgen.

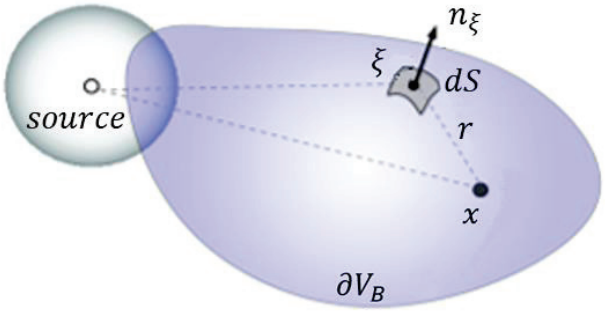

Abbildung 3: Prinzipskizze Incident Scattering Problem

Gleichung (4) stellt somit eine Möglichkeit zur Berechnung gestörter Schallausbreitung dar. Deren Lösung erfolgt typischerweise durch Randelementverfahren (BEM), bei denen die Oberfläche ∂V_B diskretisiert und in ein lineares Gleichungssystem überführt wird. Numerische Details können [6] und [7] entnommen werden.

Ermittlung des akustischen Oberflächendrucks

Zur Berechnung des zur Schallquellenlokalisation nach Gleichung (1) definierten akustischen Oberflächendrucks bzw. des dazu benötigten inkompressiblen Oberflächendrucks kann das mit Gleichung (4) eingeführte Helmholtz-Kirchhoff-Integral genutzt werden. Für die Auswertung auf einer undurchlässigen bzw. schallharten ($\partial\hat{p}_\xi/\partial n_\xi = 0$) Oberfläche ($c = 1/2$) ergibt sich

$$\frac{1}{2}\cdot\hat{p}_{incomp,\boldsymbol{x}} = \hat{p}_{freefield,incomp,\boldsymbol{x}} + \int_{\partial V_B}\left[\hat{p}_{incomp,\xi}\cdot\frac{\partial G_L(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})}{\partial n_\xi}\right]dS(\xi) \tag{5}$$

Hierbei stellt $G_L(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})$ die Greensche Funktion der Laplace-Gleichung dar, die unter Annahme von Inkompressibilitätsbedingungen mit $k = 0$ aus Gleichung (3) resultiert.

$$G_L(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{4\pi r} \quad \text{mit} \quad r = |\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}| \tag{6}$$

Damit steht mit (5) eine Gleichung zur Verfügung, die den gesuchten inkompressiblen Oberflächendruck beschreibt. Da das inkompressible Freifeld $\hat{p}_{freefield,incomp,\boldsymbol{x}}$ allerdings unbekannt ist, ist eine Lösung dieser Gleichung zunächst nicht möglich.

Zu diesem Zweck kann erneut das Helmholtz-Kirchhoff-Integral (4) genutzt werden. Mit $c = 1/2$ und $\partial\hat{p}_\xi/\partial n_\xi = 0$ sowie unter Annahme von Kompressibilitätsbedingungen ($k \neq 0$) ergibt sich für das kompressible Freifeld

$$\hat{p}_{freefield,comp,\boldsymbol{x}} = \frac{1}{2}\cdot\hat{p}_{comp,\boldsymbol{x}} - \int_{\partial V_B}\left[\hat{p}_{comp,\xi}\cdot\frac{\partial G_H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})}{\partial n_\xi}\right]dS(\xi) \tag{7}$$

Im Vergleich zu Gleichung (5) kann diese Gleichung durch Auswertung des Oberflächenintegrals direkt gelöst werden, da der kompressible Oberflächendruck $\hat{p}_{comp}$ aus der Strömungssimulation bekannt ist. Dies ermöglicht eine Berechnung des kompressiblen Freifeld-Anteils auf Basis der vorhandenen CFD-Simulationsdaten.

Vom kompressiblen zum inkompressiblen Oberflächendruck

Nach allgemein akzeptierter Ansicht resultiert die dominante Schallabstrahlung eines Ventilators aus der Wechselwirkung zwischen der turbulenten Strömung und den Ventilatoroberflächen. Eine Schallerzeugung durch turbulente Scherspannungen in der freien Strömung (Quadrupolstrahlung) und durch Volumenverdrängungseffekte (Monopolstrahlung) stellt bei den üblicherweise kleinen Machzahlen einen vernachlässigbaren Effekt dar. [3] [4]

Daraus lässt sich in direkter Konsequenz ableiten, dass in dem nach Gleichung (7) berechneten theoretischen Freifeld sämtliche aeroakustische Schallentstehungsmechanismen vernachlässigt werden können, da eine Oberfläche in diesem Fall nicht mehr existiert und gleichzeitig eine Strömung mit kleinen Machzahlen vorliegt. Aus diesem Grund sind Kompressibilitätseffekte hier vernachlässigbar klein und die Annahme

$$\hat{p}_{freefield,comp} \cong \hat{p}_{freefield,incomp} \tag{8}$$

stellt eine zulässige Näherung dar. Das aus dem kompressiblen CFD-Oberflächendruck berechnete Freifeld kann somit als eine abstrakte Hilfsgröße verstanden werden, mit der dieser in einen inkompressiblen Oberflächendruck überführt werden kann.

Diese Festlegung ermöglicht eine Substitution von Gleichung (7) in Gleichung (5), wodurch diese durch einen numerischen Ansatz (bspw. per Randelementverfahren) gelöst werden kann. Dieses Vorgehen führt letztendlich zum gesuchten inkompressiblen Oberflächendruck, aus dem nach Gleichung (1) wiederum der zur Schallquellenlokalisation gesuchte akustische Oberflächendruck berechnet werden kann. Eine Zusammenfassung des beschriebenen Vorgehens findet sich in Abbildung 4.

Anschaulich gesprochen kann die Lösung von Gleichung (7) als eine Art inkompressibles Incident Scattering Problem interpretiert werden. Dieses beschreibt die Interaktion der turbulenten Fluktuationen mit der tatsächlichen Geometrie, was den für Ventilatoren üblicherweise dominanten Schallentstehungsmechanismus abbildet (*loading noise*).

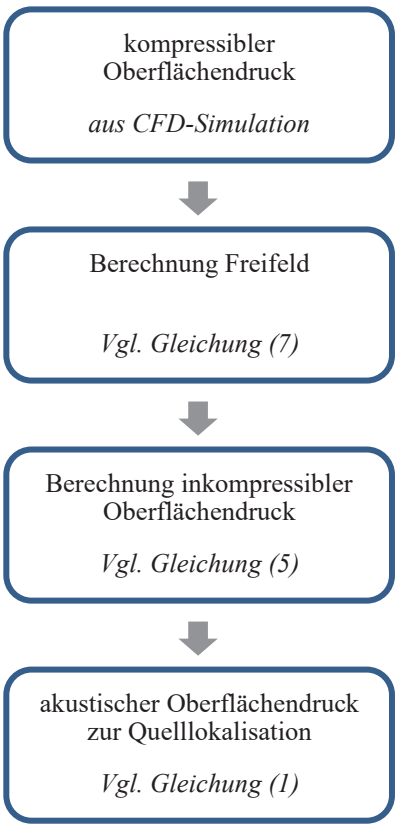

Abbildung 4: Vorgehensweise zur Berechnung des akustischen Oberflächendrucks auf Basis des bekannten kompressiblen Oberflächendrucks

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Ansatz vorgestellt, mit dem die akustisch abstrahlungsfähigen Druckfluktuationen aus den nicht-abstrahlungsfähigen, aber dominanten hydrodynamischen

Oberflächendaten einer kompressiblen Strömungssimulation (LES) extrahiert werden sollen. Die Grundlage hierzu stellt das Helmholtz-Kirchhoff-Integral eines Incident Scattering Problems dar sowie die Annahme, dass aeroakustische Effekte in einem theoretischen Freifeld vernachlässigt werden können. Diese Näherung ist ausschließlich unter den genannten Annahmen zulässig und der vorgestellte Ansatz ist somit auf entsprechende Anwendungsfälle beschränkt.

Eine numerische Implementierung von Gleichung (7) zur Berechnung des Freifeldes aus Simulationsdaten konnte bereits fertiggestellt und anhand eines generischen Testfalls validiert werden. Zum derzeitigen Zeitpunkt erfolgt die Einkopplung dieser Größe in einen BEM-Code, der zur Ermittlung des inkompressiblen Oberflächendrucks nach Gleichung (5) genutzt wird. Entsprechende Anwendungen des Verfahrens auf praxisnahe Testfälle sind aktuell noch ausstehend und müssen in zukünftigen Schritten zeigen, in wie weit das vorgestellte Verfahren für die Lokalisation von aeroakustischen Schallquellen an Ventilatoren tatsächlich geeignet ist.

Literatur

[1] D. Evans, M. Hartmann und J. W. Delfs, „Beamforming for point force surface sources in numerical data,“ *Journal of Sound and Vibration 458,* pp. 303-319, 2019.

[2] P. Dietrich, M. Dörr und M. Schneider, „Lokalisierung von Schallquellen mit numerischen Daten,“ in *DAGA Hannover*, Mulfingen, 2020.

[3] W. Neise, „Aerodynamische Geräusche von Ventilatoren - Erzeugungsmechanismen und Minderungsmaßnahmen,“ Tagung des Haus der Technik e.V, Stuttgart, November 2004.

[4] J. W. Delfs, *Grundlagen der Aeroakustik - Skript zur Vorlesung,* Technische Universität Braunschweig, 2017.

[5] M. Lummer, „Aircraft noise generation and assessment,“ *CEAS Aeronautical Journal,* März 2019.

[6] S. Kirkup, The Boundary Element Method in Acoustics - A Development in Fortran, University of Central Lancashire, 2007.

[7] S. Kirkup und J. Yazdani, „A Gentle Introduction to the Boundary Element Method in Matlab/Freemat,“ School of Science and Technology, East Lancashire Institute of Higher Education, Blackburn College UK., 2008.