

Auf der Suche nach rotierendem Lärm

Gert Herold

Schallquellen in Strömungsmaschinen lassen sich mit Mikrofonarrays messen. Mithilfe geeigneter Signalverarbeitungsalgorithmen lassen sich detaillierte Informationen über die Schallabstrahlung einzelner Komponenten ermitteln sowie auftretende Strömungsphänomene untersuchen. So kann diese Messtechnik bei der Neuentwicklung oder Wartung von Wärmepumpen, Turbofans, Windkraftanlagen oder anderen Maschinen mit rotierenden Komponenten, die mit einem Fluid interagieren, wertvolle Dienste leisten.

Worum sich's dreht

Strömungsmaschinen sind in vielen Bereichen des Alltags zu finden. Typischerweise wird hier Energie von einem Rotor auf ein Fluid übertragen, d. h. mithilfe rotierender Komponenten wird eine Strömung erzeugt. Dabei üben diese Komponenten kontinuierlich eine Kraft auf das Fluid aus, um es in Bewegung zu versetzen. Allgegenwärtige Beispiele sind Computerlüfter, Triebwerksfans oder Ventilatoren in der Wärmepumpe und der Klimaanlage. Das umgekehrte Wirkprinzip findet sich z. B. bei Windkraftanlagen oder allgemein bei mit Turbinen betriebenen Generatoren, wo einer Strömung Energie entzogen und auf einen Rotor übertragen wird. Hier wirken durch die Umströmung Kräfte auf Maschinenkomponenten, die sich dann in Bewegung setzen.

Bei all diesen Vorgängen entsteht in der Regel Schall, der je nach Anwendungsart und -ort als störender Lärm wahrgenommen werden kann. Das erzeugte Schallfeld ist sehr komplex und setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Häufig weist das Spektrum sowohl tonale als auch breitbandige Komponenten auf. Schon seit Jahrzehnten wird anhand von Experimenten, Simulationen und Modellannahmen versucht, Rückschlüsse auf die Ursache einzelner Aspekte des gemessenen Schalls zu ziehen [1–3]. Eine direkte Messung und Trennung der schallerzeugenden Mechanismen im „echten“ Betrieb der Strömungsmaschine erschien lange Zeit aufgrund der Überlagerung verschiedener Phänomene jedoch als unrealisierbar. Neben der Schallerzeugung an unterschiedlichen Orten kommt bei rotierenden Maschinen erschwerend hinzu, dass sich der Abstrahlort einiger Quellen ständig mit der Zeit verändert. Andere Quellen hingegen sind stationär, und der abgestrahlte Schall all dieser Quellen überlagert sich und wird

In search of rotating noise

Sound sources in turbomachinery can be measured with microphone arrays. By using suitable signal processing algorithms, detailed information about the sound radiation of individual components can be determined and occurring flow phenomena can be investigated. This measurement technology can thus provide valuable assistance in the new development or maintenance of heat pumps, turbofans, wind turbines or other machines with rotating components that interact with a fluid.

gleichzeitig wahrgenommen bzw. kann an einem Ort immer nur in seiner Gesamtheit gemessen werden.

Für die räumliche Trennung gleichzeitig abstrahlender Schallquellen hat sich die Anwendung von Mikrofonarrays etabliert [4–6]. Hierbei werden mehrere Mikrofone an bekannte Positionen im Raum verteilt. Wichtig ist, dass die Aufzeichnung der Signale synchron erfolgt. Durch die vorhandenen Laufzeitunterschiede in den Signalen können nun Rückschlüsse auf die zugrundeliegende Quellverteilung gezogen werden. Außerdem können Schallsignale entsprechend des Abstrahlortes der zugehörigen Quellen gefiltert werden. Ein exemplarischer Messaufbau mit 64 Mikrofonen für einen Ventilator mit 9 Schaufeln ist in Abbildung 1 gezeigt.

Bei breitbandigen Signalen wie Rauschen ist es sinnvoll, über einen längeren Zeitraum zu messen.

Abb. 1: Messaufbau eines Axialventilators mit dem Mikrofonarray auf der Saugseite [7] (Ventilatorprüfstand, FAU Erlangen-Nürnberg).



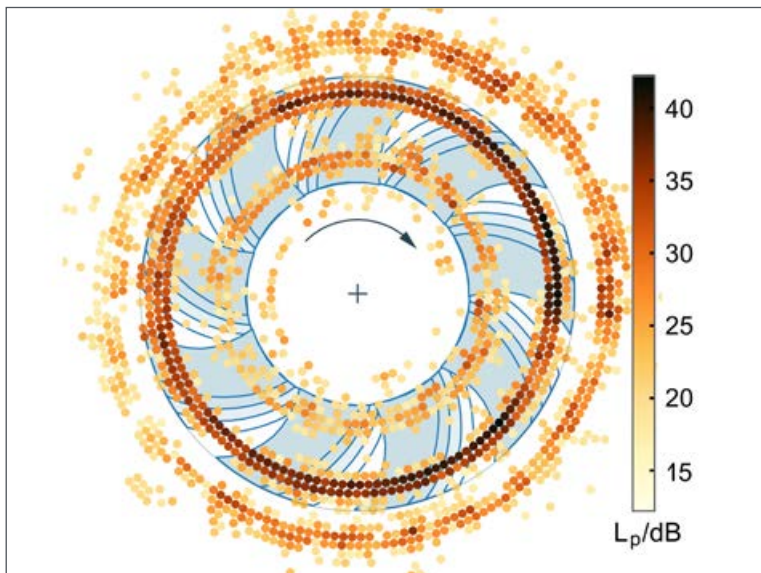
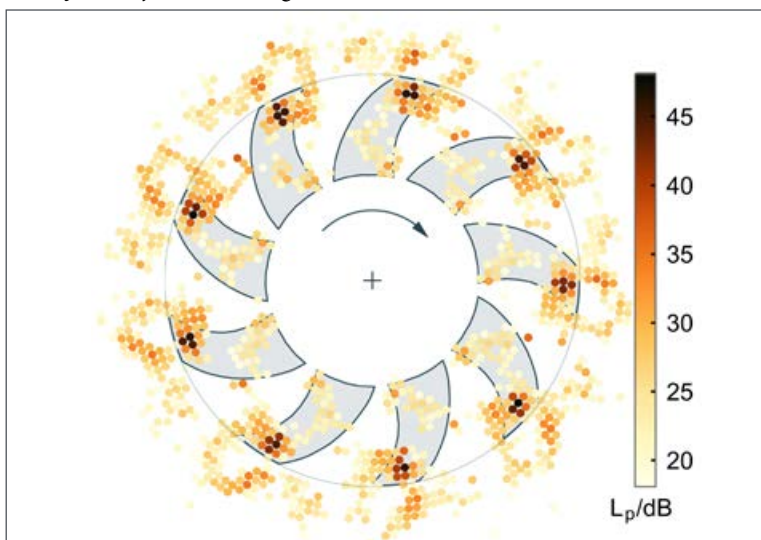


Abb. 2: Schallkartierung eines Ventilators mit 9 Schaufeln unter Annahme stehender Quellen (Auswertung Terzband bei 4 kHz)

So können die stochastischen Schwankungen des Schalldrucks ausreichend lang energetisch gemittelt werden. Viele hochauflösende Verfahren zur Auswertung von Mikrofonarraymessungen setzen dabei jedoch stationäre Schallquellen voraus [8–11]. Bei der Anwendung auf Objekte mit bewegten Komponenten wie z. B. einen Ventilator werden diese dann verwischt dargestellt.

Dies ist beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt: Entlang der rotierenden Schaufeln des Ventilators wird ein Ring detektiert, da die Schallenergie durch die Rotation über den Umfang verteilt wird. Hiermit lässt sich lediglich eine grobe radiale Schalldruckverteilung ermitteln, jedoch bleiben Informationen zur Quellverteilung in Umfangsrichtung verborgen.

Abb. 3: Schallkartierung eines Ventilators mit dem virtuell rotierenden Mikrofonarray (Auswertung Terzband bei 4 kHz) [17]



Alles dreht sich

Um auch Schallquellen auf den Ventilatorschaufeln sichtbar zu machen gibt es mehrere Möglichkeiten: So kann die Auswertung auf einen so kurzen Zeitraum beschränkt werden, dass sich die Position der Blätter nicht signifikant verändert. Dadurch würde wieder der auswertbare Zeitraum beschränkt werden – und damit die zur Mittelung verfügbare Datenmenge. Eine weitere Möglichkeit ist es, im Auswertalgorithmus kontinuierlich die sich entsprechend der Bewegung verändernden Signallaufzeitdifferenzen zu berücksichtigen. Diese Variante findet in der Praxis durchaus Anwendung [12], da sie eine flexible Anordnung der Mikrofone relativ zum Messobjekt erlaubt. Jedoch ist die Auswahl der hochauflösenden Verfahren, die mit diesem Prinzip arbeiten, sehr beschränkt [13], und der Rechenaufwand ist um Größenordnungen höher als bei den für stationäre Quellen geeigneten Verfahren.

Eine dritte Möglichkeit ist es, das Mikrofonarray synchron mit den Quellen mitzubewegen, sodass diese relativ dazu als stehend erscheinen. Auch wenn eine tatsächliche Mitrotation des Arrays prinzipiell realisiert werden kann [14], ist der konstruktive und messtechnische Aufwand hier sehr hoch. Einfacher und in der Anwendung flexibler ist es, das Mikrofonarray „virtuell“ mitzurotieren [15]. Das bedeutet, dass ausgehend von einer geeigneten ortsfesten Sensoranordnung die gemessenen Signale so untereinander interpoliert werden, dass sie den Signalen eines gedachten mitbewegten Mikrofonarrays entsprechen. Ein zusätzlicher Vorteil des virtuellen Arrays gegenüber einem real mitrotierenden ist, dass die Rotation nachträglich angepasst werden kann. Das ist etwa dann wichtig, wenn in einem System unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten oder sowohl stehende als auch rotierende Quellen vorkommen und betrachtet werden sollen. Voraussetzung für eine gute „Virtualisierung“ eines Mikrofonarrays ist jedoch eine ausreichende Abdeckung des Bereichs, in dem sich virtuelle Mikrofone befinden sollen, mit physikalischen Mikrofonen. Das ist prinzipiell mit beliebigen Anordnungen möglich [16]. Für eine Implementierung einer Rotation mit möglichst wenigen Mikrofonen hat sich allerdings eine ringförmige Anordnung der Mikrofone als vorteilhaft erwiesen. Der Fall des rotierenden Ventilators ist in Abbildung 3 noch einmal mit einem virtuell mitrotierenden Array ausgewertet. Es sind mehrere Schallquellen erkennbar, die sich klar verschiedenen Positionen auf den Ventilatorschaufeln zuordnen lassen. Mit der Möglichkeit der örtlichen Trennung der Schallquellen lassen sich auch komponentenspezifische Schalldruckspektren erzeugen. Das ist exemplarisch in Abbildung 4 für die Schallabstrahlung der Vorder-

und Hinterkanten des untersuchten Ventilators dargestellt. Eine solche Auswertung erlaubt die gezielte akustische Optimierung einzelner schallabstrahlender Komponenten. Dabei ist zu beachten, dass der sinnvoll auswertbare Frequenzbereich je nach Arraygeometrie beschränkt ist. Die obere Frequenzgrenze ist dabei gesetzt durch die verwendete Anzahl an Mikrofonen [17, 18], während für die räumliche Auflösung bei tiefen Frequenzen der Durchmesser des Arrays ausschlaggebend ist [12] – in beiden Fällen gilt, je mehr, desto besser.

Wie sich's dreht

Das Verfahren der virtuellen Rotation setzt voraus, dass die genaue Drehzahl zu jedem Zeitpunkt bekannt ist. Das bedeutet, dass diese mit einem geeigneten Verfahren – etwa mithilfe eines optischen Sensors – permanent erfasst und ebenfalls aufgezeichnet wird. Doch auch aus den akustischen Messdaten lassen sich Rückschlüsse auf vorhandene Rotationen ziehen. Weit verbreitet ist die Auswertung der Spektren hinsichtlich tonaler Anteile, deren Frequenz der Drehzahl oder Vielfachen davon entspricht. Bei Strömungsmaschinen relevant sind vor allem periodische Druckfluktuationen, die durch die Passage von Rotorblättern hervorgerufen werden. Diese Blattfolgefrequenz – also die Drehzahl multipliziert mit der Blattanzahl – und deren Vielfache sind charakteristisch für die tonalen Anteile im Spektrum.

In Abbildung 5 ist das Spektrum einer Rotor-Stator Anordnung in einem Strömungskanal dargestellt. Die Blattfolgefrequenz liegt bei 900 Hz, was bei einer Rotorblattzahl von 18 einer Drehzahl von 50 Hz oder 3 000 Umdrehungen pro Minute entspricht. Mit einer ringförmigen Mikrofonanordnung im Kanal lässt sich auch hier ein virtuell mitrotierendes Array realisieren. Das Spektrum im rotierenden Bezugssystem unterscheidet sich deutlich vom stationär betrachteten Fall und ist in Abbildung 6 dargestellt.

Hier treten unter anderem Töne bei 1 600 Hz und 3 200 Hz auf. Diese entsprechen der einfachen und doppelten Blattfolgefrequenz des fest stehenden Stators mit 32 Schaufeln, der nun relativ zu den virtuellen Mikrofonen entgegengesetzt rotiert, und somit 32 mal pro Umdrehung den Nachlauf der virtuell stationären Rotorblätter passiert. Da die virtuelle Rotation nicht auf eine bestimmte Drehzahl beschränkt ist, ist es auch möglich, Spektren für beliebige Drehzahlen zu erzeugen [20]. Dies ist in Abbildung 7 gezeigt, wo auf der senkrechten Achse die virtuelle Rotationsgeschwindigkeit kontinuierlich von stehend bis zur 12-fachen Rotordrehzahl verändert und jeweils das Spektrum im entsprechend drehenden Bezugssystem bestimmt wurde.

Die tonalen Anteile sind hier als Linien sichtbar – je

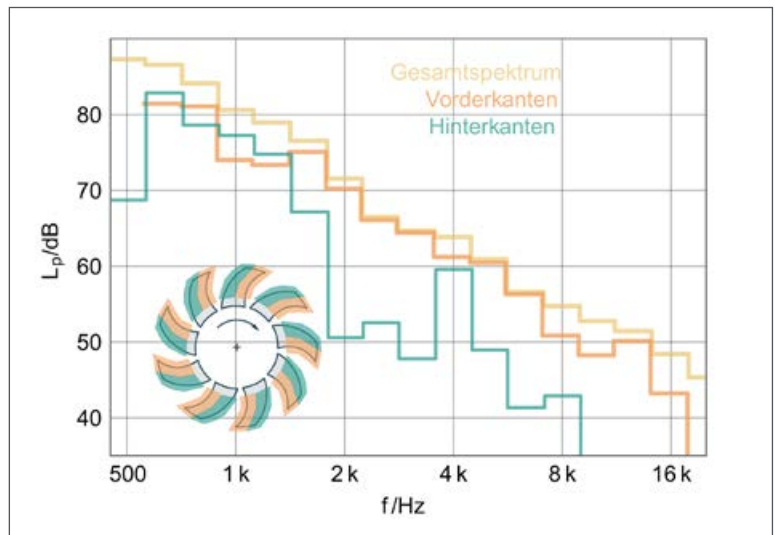


Abb. 4: Terzspektrien für Vorder- und Hinterkanten des 9-Schaufel-Ventilators [17]

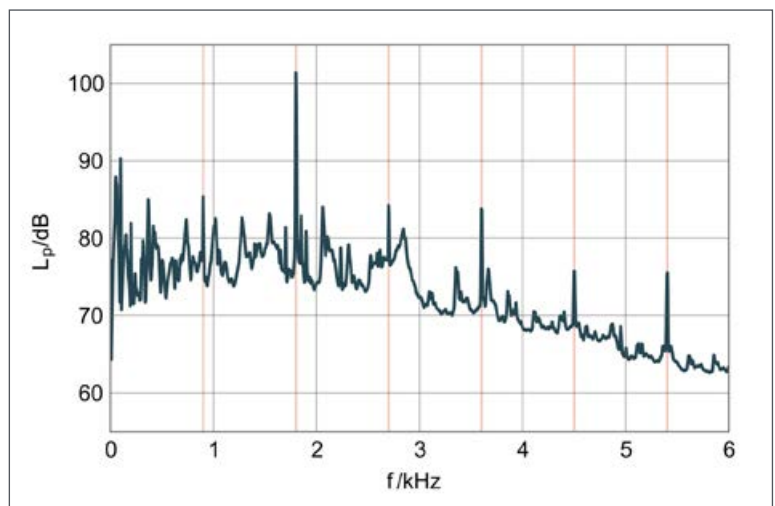


Abb. 5: Schmalbandspektrum einer Rotor Stator-Anordnung im Strömungskanal [19]. Die Blattfolgefrequenzen des Rotors sind rot markiert.

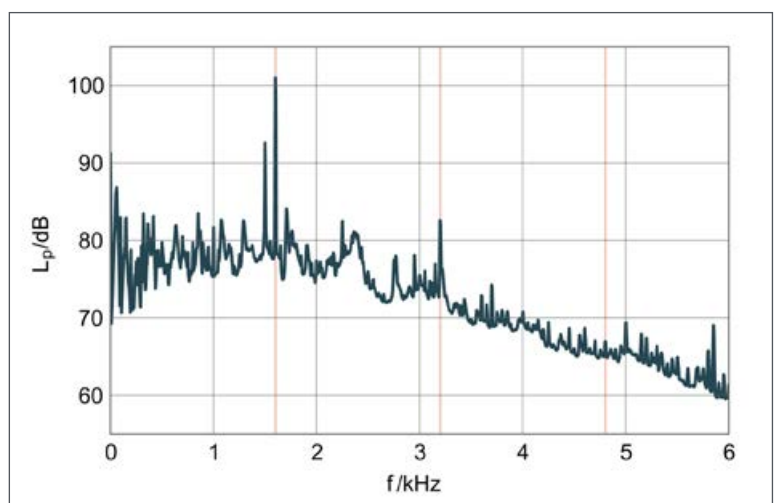


Abb. 6: Schmalbandspektrum einer Rotor Stator-Anordnung im Strömungskanal mit virtueller Rotation [17]. Die Blattfolgefrequenzen des Stators sind rot markiert.

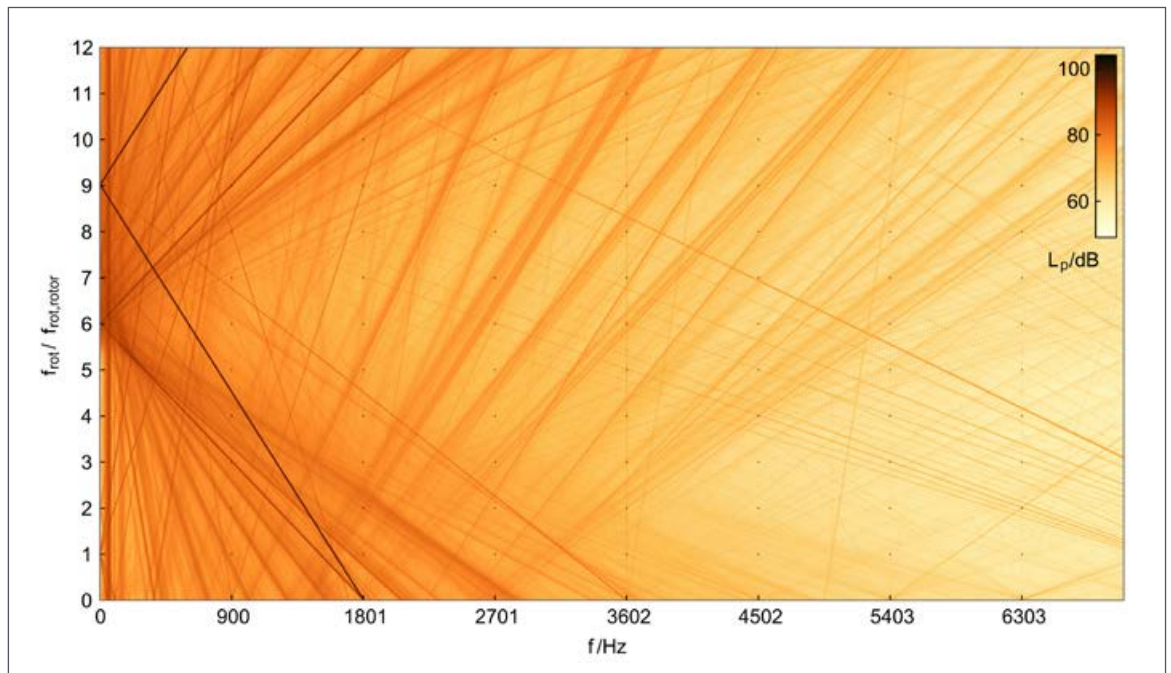


Abb. 7: f_{rot} - f -Diagramm für eine Rotor-Stator-Anordnung im zylindrischen Strömungskanal

nach betrachteter Drehzahl liegen die meisten Töne offensichtlich bei einer anderen Frequenz. Bei den Drehzahlen, an denen die „Tonlinien“ die Frequenz 0 Hz erreichen, sind sie nicht mehr als Ton vorhan-

den. Das ist im gezeigten Diagramm für einige dominante Töne bei der sechsfachen sowie bei der neunfachen Rotordrehzahl der Fall. Dies deutet auf Druckschwankungen hin, die mit dem entspre-

HEAD acoustics

kühl, nicht
brummig

Innovative Haustechnik
braucht akustischen Komfort

REAL-LIFE-PROOF.

www.head-acoustics.de



chenden Vielfachen der Drehzahl umlaufen. Solche Phänomene treten typischerweise in Rotor-Stator-Anordnungen auf. Druckschwankungen im Nachlauf des Rotors interagieren mit den Statorschaufeln, wodurch Schall abgestrahlt wird. Bei unterschiedlichen Anzahlen an Schaufeln kommt es vor, dass die auf eine Interaktion folgende nächste Interaktion ein anderes Rotor-Stator-Schaufelpaar betrifft [1] und damit die „Rotation“ der Quelle schneller erscheint als die tatsächliche Drehzahl.

Nicht immer sind schallerzeugende rotierende Phänomene tonal sichtbar oder so fest an die Drehzahl gekoppelt. Diese sind dennoch mithilfe eines ringförmigen Mikrofonarrays detektierbar, indem damit nach breitbandigen rotierenden und kurzzeitig kohärenten Strukturen gesucht wird [21]. Dies wird im Folgenden mit dem eingangs gezeigten Ventilator demonstriert, der mit knapp 1500 Umdrehungen pro Minute rotiert. Auftretende Drehzahlen in zwei Betriebspunkten werden untersucht.

Bei der in Abbildung 8 gezeigten akustischen Drehzahlauswertung arbeitet der Ventilator unter optimalen Bedingungen. Der Algorithmus findet über die gesamte Messzeit nur stehende Quellen ($f_{rot} = 0$ Hz) und Quellen, die mit der Drehzahl rotieren ($f_{rot} = -25$ Hz, das negative Vorzeichen kennzeichnet eine Drehrichtung im Uhrzeigersinn). Wird der Betriebspunkt bzw. werden die Druckverhältnisse bei gleicher Drehzahl so verändert, dass die Strömung der Schaufelkontur nicht mehr folgen kann und regelmäßig abreißt, geht dies auch mit erhöhter Schallabstrahlung einher. Die sich ausbildenden „Ablöseblasen“ rotieren mit geringerer Geschwindigkeit als der Lüfter und stellen sich akustisch als transientes Phänomen dar. Dies ist in Abbildung 9 zu sehen, wo über die gesamte Messzeit immer wieder Rotationsgeschwindigkeiten mit etwas unter der halben nominellen Drehzahl auftreten.

Mit der Mikrofonarray-Technologie lassen sich so auch kritische Betriebszustände direkt detektieren und quantifizieren.

Wieviel sich dreht

Es wurde gezeigt, dass in rotierenden Strömungsmaschinen unterschiedlich rotierende (und stehende) Schallquellen gleichzeitig auftreten können bzw. in der Regel auch auftreten. Mit der virtuellen Rotation ist es möglich, jeweils auf Quellen mit einer konkreten Drehzahl zu fokussieren. Die anderen Quellen sind allerdings nach wie vor in der Schallkarte enthalten. Sie werden, wie anfangs gezeigt, zwar über den Umfang als Ring „verschmiert“, überlagern jedoch immer noch das Ergebnis. Mit geeigneten Algorithmen lässt sich der Einfluss der Schallquellen, die im jeweils verwendeten Bezugssystem nicht stehen

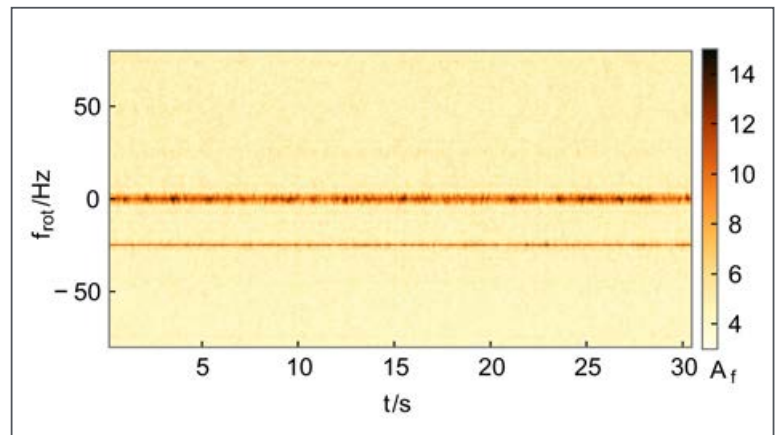


Abb. 8: Zeitabhängige Drehzahldetektion aus Breitband-Signalen für einen Ventilator im Auslegungspunkt [17]

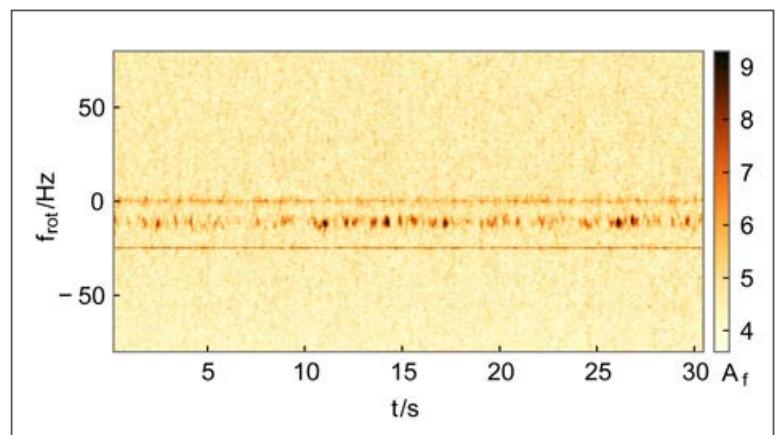


Abb. 9: Zeitabhängige Drehzahldetektion aus Breitband-Signalen für einen Ventilator in einem Betriebspunkt mit Strömungsabrissen [17]

(also verschmieren), herausmitteln. Damit kann der bei einer bestimmten Drehzahl rotierende Schallanteil besser von anderen Quellen getrennt und quantifiziert werden [17, 22].

In Abbildung 10 wird ein Prinzipexperiment ausgewertet, bei dem direkt vor dem Ventilator eine Stange installiert wurde, die von rechts in den Zustrom hineinragt. Die hierdurch verursachten Turbulenzen sorgen für einen deutlich erhöhten messbaren Schalldruckpegel gegenüber dem Betrieb des Lüfters ohne Zustromstörung. Dabei sind sowohl rotierende als auch stehende Quellen an der Schallabstrahlung beteiligt. Eine einfache Schallkartierung im ruhenden wie im rotierenden Bezugssystem lokalisiert zwar die dominanten Quellen, allerdings ist die erreichbare Dynamik sehr gering.

Werden die im jeweiligen Bezugssystem rotierenden Quellen herausgemittelt – also im rotierenden Bezugssystem die stehenden Quellen und umgekehrt – kann ein wesentlich besserer Signal-Rausch-Abstand realisiert werden, wobei das „Rauschen“ hier auch die durch rotierende Quellen beigetragenen breitbandigen Schallanteile umfasst.

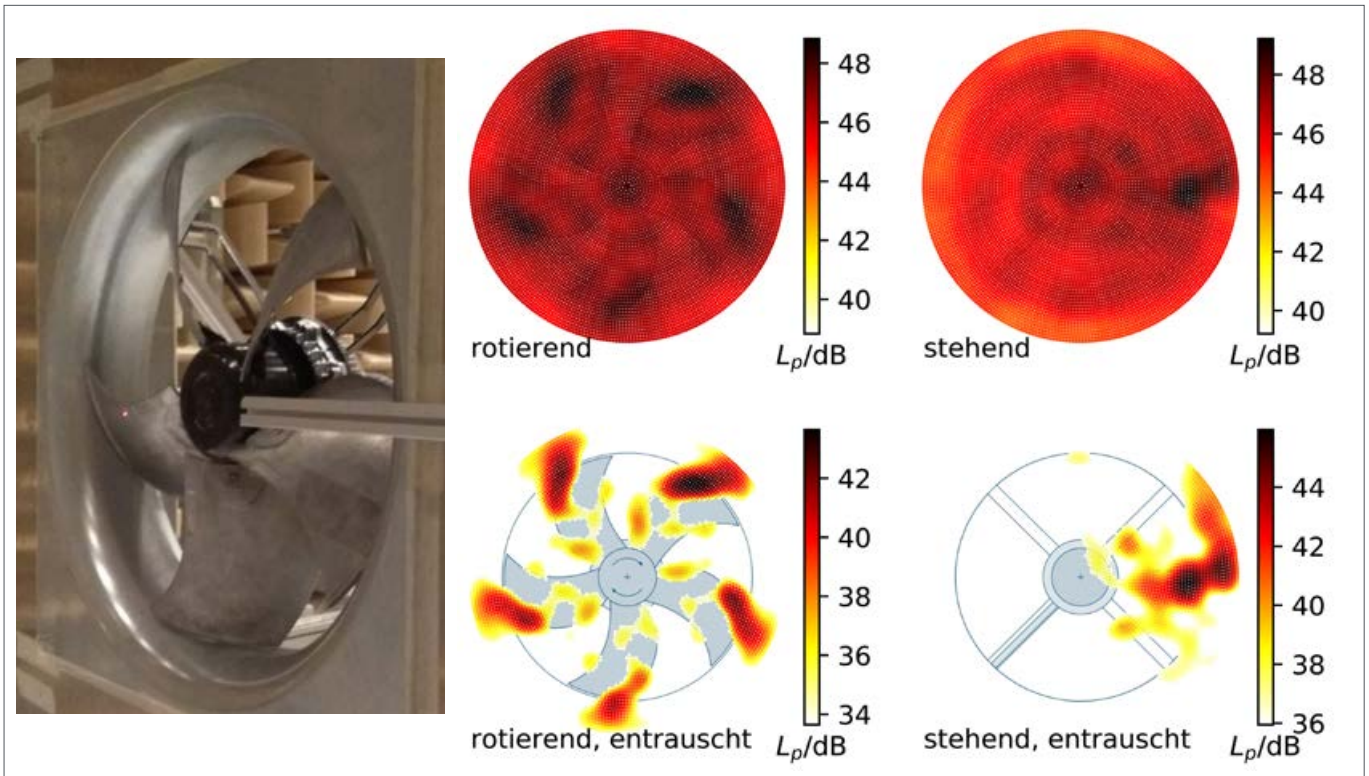
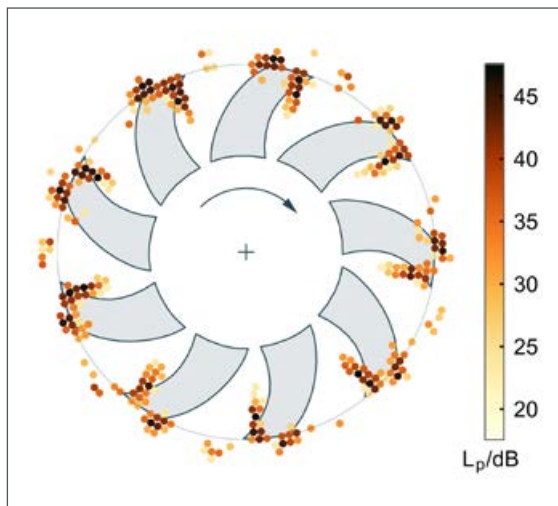


Abb. 10: Prinzipexperiment eines Ventilators mit Zustromstörung (reflexionsarmer Raum, TU Berlin). Schallkarten im rotierenden und stehenden Bezugssystem, ohne und mit Entfernung von „Rotationsrauschen“ (Auswertung Terzband bei 2 kHz) [22].

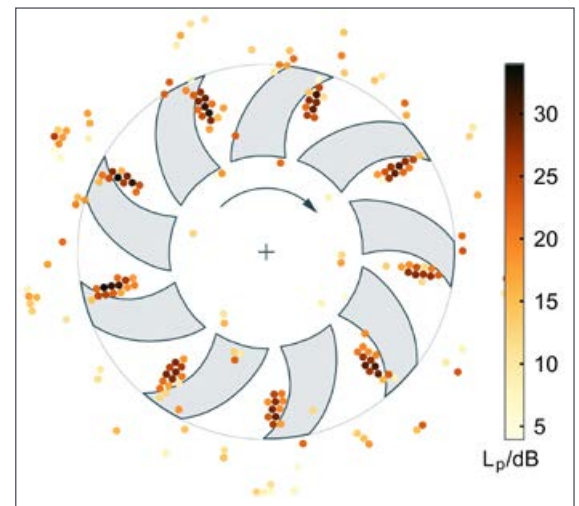
In den entrauschten Schallkarten in Abbildung 10 lassen sich einzelne Bereiche mit unterschiedlicher Schallabstrahlung an den Ventilatorschaufeln nun deutlich erkennen, und im stehenden System werden neben dem Bereich der Stange auch Quellen an den Statorstreben auf der Ventilatordruckseite sichtbar. Als weiteres Beispiel wird hier noch einmal der Ventilator mit 9 Schaufeln im Betriebspunkt mit Strömungsabriss betrachtet. Die einfache Schallkartierung im rotierenden Bezugssystem (Abb. 11) zeigt

Abb. 11: Schallkartierung eines Ventilators im Strömungsabriss mit 9 Schaufeln (Auswertung Terzband bei 4 kHz) [17].



Quellen an den Vorder- und Hinterkanten der Ventilatorschaufeln, besonders im Bereich der Schaufelspitzen. Mit Entfernen des Rotationsrauschens (Abb. 12) werden nur noch die Vorderkanten als Hauptquellen bei 4 kHz erkannt. Dies lässt darauf schließen, dass sich im Bereich der Schaufelspitzen zu einem hohen Anteil die Schallquellen finden, die mit einer anderen Geschwindigkeit als der Ventilator drehzahl rotieren. Quellbereiche an den Schaufelhinterkanten können durchaus noch vorhanden

Abb. 12: Rotationsentrauschte Schallkartierung eines Ventilators im Strömungsabriss mit 9 Schaufeln (Auswertung Terzband bei 4 kHz) [17].



sein, stellen jedoch keine Hauptquelle dar, d. h. Maßnahmen zu deren akustischer Optimierung würden möglicherweise gar nicht den erwünschten Effekt erbringen, da andere Quellmechanismen wesentlich stärker zur Schallemission beitragen.

Auch nach vielen Jahrzehnten ist die Schallentstehung in Strömungsmaschinen noch immer ein umfangreiches und interessantes Forschungsfeld. Viele Phänomene sind bis jetzt zwar in ihren Entstehungsprinzipien verstanden, stellen aber durch die Vielzahl an Wechselwirkungen nach wie vor hohe Anforderungen an die akustische Auslegung. Die hier vorgestellten Mess- und Signalverarbeitungstechniken sind in der Lage, dabei einen wertvollen Beitrag zu leisten. Ihr Einsatz erlaubt es, bislang nur schwer erfassbare, mit Schallentstehung gekoppelte rotierende Phänomene besser zu visualisieren und quantifizieren sowie den Weg zu effektiven Lärm-minderungsmaßnahmen zu weisen.

Literatur

- [1] Tyler, J. M.; Sofrin, T. G.: Axial flow compressor noise studies. 1962.
<https://doi.org/10.4271/620532>
- [2] Sharland, I. J.: Sources of noise in axial flow fans. *Journal of Sound and Vibration* 1.3, 1964.
<https://doi.org/10.1121/1.1977649>
- [3] Wright, S. E.: The acoustic spectrum of axial flow machines. *Journal of Sound and Vibration* 45.2, 1976.
[https://doi.org/10.1016/0022-460X\(76\)90596-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(76)90596-4)
- [4] Johnson, D. H.; Dudgeon, D. E.: *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [5] Dougherty, R. P.: *Beamforming in acoustic testing. Aeroacoustic Measurements*. Hrsg. von T. J. Mueller. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-05058-3_2
- [6] Merino-Martinez, R.; Sijtsma, P.; Snellen, M.; Ahlefeldt, T.; Antoni, J.; Bahr, C. J.; Blacodon, D.; Ernst, D.; Finez, A.; Funke, S.; Geyer, T. F.; Haxter, S.; Herold, G.; Huang, X.; Humphreys, W. M.; Ledere, Q.; Malgoezar, A.; Michel, U.; Padois, T.; Pereira, A.; Picard, C.; Sarradj, E.; Siller, H.; Simons D. G.; Spehr, C.: A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays. *CEAS Aeronautical Journal* 10.1, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s13272-019-00383-4>
- [7] Herold, G.; Zenger, F.; Sarradj, E.: Influence of blade skew on axial fan component noise. *International Journal of Aeroacoustics* 16.4-5, 2017.
<https://doi.org/10.1177/1475472X17718740>
- [8] Brooks, T. F.; Humphreys, W. M.: A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration* 294, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.046>
- [9] Sijtsma, P.: CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics* 6.4, 2007.
<https://doi.org/10.1260/147547207783359459>
- [10] Yardibi, T.; Li, J.; Stoica, P.; Cattafesta, L. N.: Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123.5, 2008.
<https://doi.org/10.1121/1.2896754>
- [11] Kujawski, A.; Herold, G.; Sarradj, E.: A deep learning method for grid-free localization and quantification of sound sources. *The Journal of the Acoustical Society of America* 146.3, 2019.
<https://doi.org/10.1121/1.5126020>
- [12] Ramachandran, R. C.; Raman, G.; Dougherty, R. P.: Wind-turbine noise measurement using a compact microphone array with advanced deconvolution algorithms. *Journal of Sound and Vibration* 333.14, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.034>
- [13] Cousson, R.; Ledere, Q.; Pallas, M. A.; Berengier, M.: A time domain CLEAN approach for the identification of acoustic moving sources. *Journal of Sound and Vibration* 443, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.026>
- [14] Sutliff, D. L.: Rotating rake turbofan duct mode measurement system. *The Journal of the Acoustical Society of America* 118.3, 2005.
<https://doi.org/10.1121/1.4779000>
- [15] Herold, G.; Sarradj, E.: Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans. *Noise Control Engineering Journal* 63.6, 2015.
<https://doi.org/10.3397/1/376348>
- [16] Jekosch, S.; Sarradj, E.: An Extension of the Virtual Rotating Array Method Using Arbitrary Microphone Configurations for the Localization of Rotating Sound Sources. *Acoustics* 2.2, 2020. <https://doi.org/10.3390/acoustics2020019>
- [17] Herold, G.: One Ring to Find Them All – Detection and Separation of Rotating Acoustic Features with Circular Microphone Arrays. Technische Universität Berlin, 2021.
<https://doi.org/10.14279/depositonce-12591>
- [18] Lehmann, M.; Spehr, C.; Schneider, M.; Ernst, D.: Investigations on limitations of the virtual rotating array method. *Proceedings of the 8th Berlin Beamforming Conference*. Berlin, Germany, 2020.
- [19] Tapken, U.; Pardowitz, B.; Behn, M.: Radial mode analysis of fan broadband noise. *Proceedings of the 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. Denver, Colorado, 2017.
<https://doi.org/10.2514/6.2017-3715>
- [20] Herold, G.; Sarradj, E.: Detection and visualization of fan noise sources and excited modes in a circular duct. *Proceedings of the 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. Delft, Netherlands, 2019.
<https://doi.org/10.2514/6.2019-2441>
- [21] Herold, G.; Sarradj, E.: Detection of rotational speeds of sound sources based on array measurements. *Applied Acoustics* 157, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107002>
- [22] Herold, G.; Jekosch, S.; Jüterbock, T.; Sarradj, E.: Virtual microphone array rotation in the mode-time domain and separation of stationary and rotating sound sources in an axial fan. *Proceedings of the 9th Berlin Beamforming Conference*. Berlin, Germany, 2022. ■



Dr.-Ing. Gert Herold
TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik