

Bewertung der Breitbandlärmanregung eines Axialventilators mittels Radialmodenanalyse

Benjamin Pardowitz, Ulf Tapken, Maximilian Behn, Lars Enghardt

DLR, Institut für Antriebstechnik, Abt. Triebwerksakustik, 10623 Berlin,

E-Mail: Benjamin.Pardowitz@dlr.de

Einleitung

Bei der akustischen Bewertung von Ventilatoren und axialen Fan-Stufen wird neben den tonalen Anteilen auch die Quantifizierung des Breitbandlärms immer wichtiger. Ziel einer aktuellen Studie ist die Zerlegung des breitbandigen Geräusches eines Axialfans in die Beiträge der einzelnen Radialmoden, um gängige Modellannahmen zu überprüfen:

1. bezüglich der Verteilung der Energie über alle ausbreitungsfähigen Moden, so stellt z.B. das Modell gleicher modaler Energiedichte EME die Grundlage für vereinfachte Schalleistungsschätzverfahren [1, 2] dar,
2. bezüglich der Korrelationen aller Moden, z.B. wird die vollständige Unkorreliertheit aller Moden für die Anwendung der Analyseverfahren der Referenzen [3] und [4] vorausgesetzt.

Experimenteller Aufbau

Als Untersuchungsobjekt diente der in Abbildung 1 dargestellte Axialventilator. Das Kennfeld des mit 18 Rotorblättern und 32 Statorschaufeln ausgestatteten Ventilators ist in Abbildung 2 zu sehen. Für die vorliegende Studie wurden Messungen bei einer festen Drehzahl von 3000 Umdrehungen/Minute und drei verschiedenen Schaufelbelastungen durchgeführt. Die dimensionslosen Lieferzahlen der untersuchten Betriebspunkte betragen $\varphi=0.18, 0.19$ und 0.20 und wurden durch Justierung einer Drossel im Austritt des Versuchsstands eingestellt. Zur Gewährleistung einer möglichst störungsfreien Anströmung wurde ein Turbulenzschirm vor der Einlaufdüse installiert. Für die akustischen Messungen wurde das in Abbildung 1 gekennzeichnete Rohrsegment mit insgesamt 198 $\frac{1}{4}$ " Kondensatormikrofonen ausgestattet.

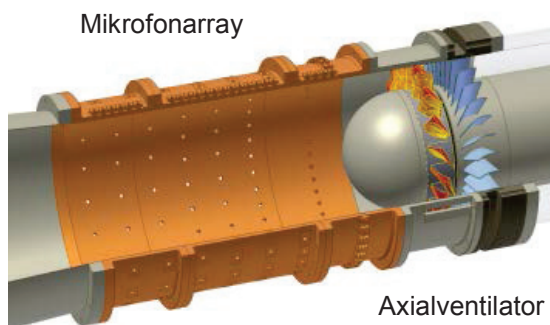


Abbildung 1: Das vom Axialventilator in den Einlauf abgestrahlte Geräusch wurde durch ringförmig angeordnete Mikrofone an sechs axialen Positionen erfasst.

Radialmodenanalyse-Verfahren

Für die Zerlegung des Schallfelds im Ansaugkanal in die Radialmodenamplituden wurde die in Referenz [5] beschriebene Methode eingesetzt. Das Verfahren basiert auf der Lösung der Helmholtzgleichung mittels eines Modenansatzes und benötigt als Eingangsdaten Schalldruck-Kreuzspektren für alle Kombinationen von Messpositionen auf einem in den azimuthalen und axialen/radialen Koordinaten regelmäßig aufgebauten Gitters. Im vorliegenden Fall wurde ein Sub-Array des in Abbildung 1 gezeigten Messgitters verwendet: Es setzte sich aus den sechs stromauf liegenden Mikrofonringen zusammen. In den Ringen waren 18 / 18 / 18 / 24 / 24 / 36 Mikrofone jeweils äquidistant über den Umfang installiert. Die axialen Abstände der Mikrofone wurden mittels einer Konditionsanalyse optimiert [6]. Als Analyseergebnisse liefert das Verfahren Erwartungswerte für die Amplituden aller ausbreitungsfähigen Moden, mit deren Hilfe die durch jede Mode transportierte Schalleistung berechnet werden kann. Des Weiteren wird die Kohärenz für alle Modenpaarungen ausgewertet, d.h. das Verfahren kann auf Schallfelder mit beliebigen Modenkohärenzen angewandt werden.

Eine aus praktischer Sicht große Beschränkung des Verfahrens liegt in der Anzahl benötigter Messpositionen, die mit zunehmender Frequenz ansteigt. Mit der genannten Mikrofonanordnung können Radialmodenanalysen bis 2000 Hz realisiert werden, wobei die obere Frequenzgrenze einer Helmholtzzahl von $kR=8.3$ mit höchster azimuthaler Ordnung $m=6$ und höchster radialer Ordnung $n=2$ entspricht.

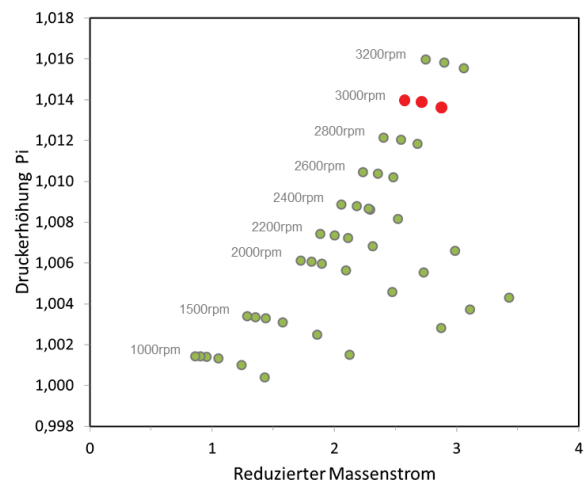


Abbildung 2: Kennfeld des Axialventilators. Für die vorliegende Studie wurden die rot markierten Betriebspunkte analysiert.

Ergebnisse für den Betriebspunkt $\varphi=0.18$

In Abbildung 3 ist das vom Axialventilator bei der Lieferzahl $\varphi=0.18$ angeregte Schalldruckspektrum dargestellt. Es resultiert aus einer Mittelung der Autoleistungsspektren aller Mikrofone. Neben der Grundharmonischen der Blattpassierfrequenz (BPF) bei 900 Hz und der zugehörigen höheren Harmonischen bei 1800 Hz weist das Spektrum zahlreiche schmal- und breitbandige Peaks auf. Die breitbandigen Peaks stehen mit den Cut-on-Frequenzen der Moden in Verbindung. Das Ergebnis der Radialmodenanalyse in Abbildung 4 belegt dies. Es ist bekannt, dass eine Mode nahe der Cut-on-Grenze durch eine Schallquelle resonanzartig überhört angeregt wird. Die vom Axialventilator erzeugte Quellverteilung regt

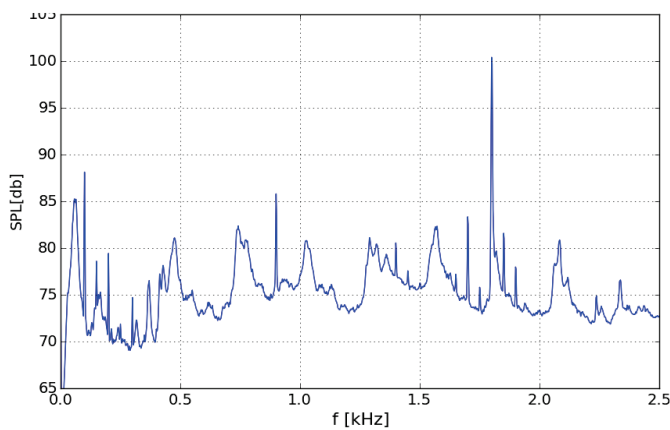


Abbildung 3: Vom Ventilator angeregtes Autoleistungsspektrum bei einer Drehzahl von 3000 rpm und einer Lieferzahl von $\varphi=0.18$ (Mittelung über alle Array-Mikrofone).

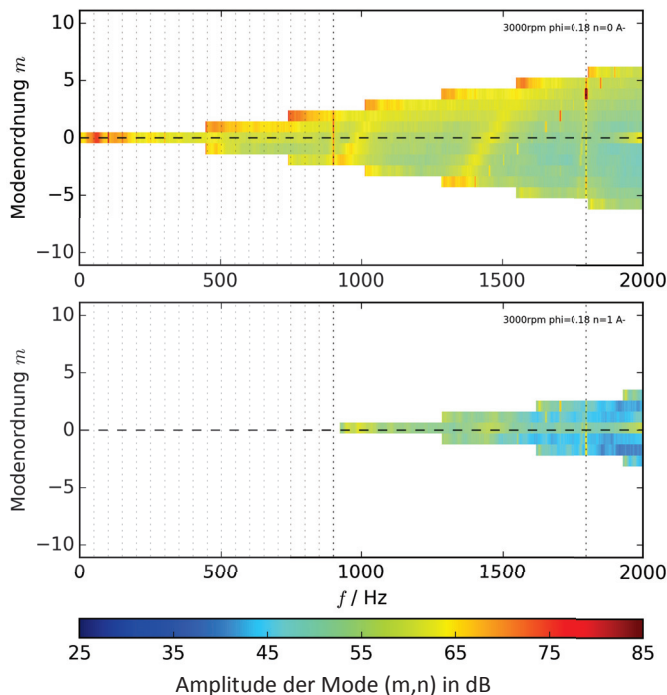


Abbildung 4: Erwartungswerte der Amplituden für alle stromauf abgestrahlten Moden der radialen Ordnungen $n=0$ (oberes Diagramm) und $n=1$ (unteres Diagramm) bei einer Drehzahl von 3000 rpm und einer Lieferzahl von $\varphi=0.18$.

dabei offenbar verstärkt Moden der radialen Ordnung $n=0$ an. Allerdings wird für die positiven azimuthalen Ordnungen im Vergleich zu den negativen Ordnungen ein deutlich höherer Pegel detektiert. Mögliche Erklärungen sind eine Abschirmung der am Stator angeregten Moden negativer azimuthaler Ordnungen aufgrund des gegenüber dem Rotor entgegen gesetzten Drehsinns oder eine unsymmetrische Modenanregung durch die Dipolverteilung auf den angewinkelten Rotorschaukeln. Weiterhin auffällig sind schmalbandige Peaks der Modenordnungen $m=-4,-3, \dots, +6$, die in aufsteigender Folge bei den Wellendrehharmonischen $EO=28, 29, \dots, 38$ (dies entspricht Frequenzen 1400, 1450, $\dots, 1900$ Hz) auftreten und sich entsprechend der für Rotor-Stator-Interaktion gültigen Formel von Tyler und Sofrin [7] durch $m=EO-kV$ mit $k=1$ berechnen lassen. $EO=36$ beschreibt hierbei die 2-fache Blattpassierfrequenz.

Die Unsymmetrie der azimuthalen Ordnungen wird in Abbildung 5 noch weiter verdeutlicht. Für die Darstellung wurden die Schallleistungen der einzelnen Moden berechnet und getrennt für alle Moden der azimuthalen Ordnungen $m<0$, $m=0$ beziehungsweise $m>0$ addiert. Bis auf schmale Frequenzbänder um 940 Hz und um 1400 Hz dominieren die Moden positiver azimuthaler Ordnungen. Die genannten Überhöhungen der negativen azimuthalen Ordnungen sind auch im oberen Diagramm von Abbildung 4 sichtbar und lassen eine Resonanz der Quellverteilung mit dem Kanal vermuten, die noch nicht näher verstanden ist. Abbildung 6 zeigt eine Auswertung der Kohärenzen der stromauf laufenden Moden $(0,0)$, $(0,1)$ und $(0,2)$ paarweise untereinander sowie jeweils mit allen anderen Modenordnungen. Die Moden $(0,0)$ und $(0,1)$ sind über den gesamten Frequenzbereich fast vollständig korreliert und auch die Korrelationen der Moden $(0,0)$ und $(0,2)$ bzw. $(0,1)$ und $(0,2)$ sind signifikant. Eine Korrelation von Moden unterschiedlicher azimuthaler Ordnungen ist hingegen nicht feststellbar.

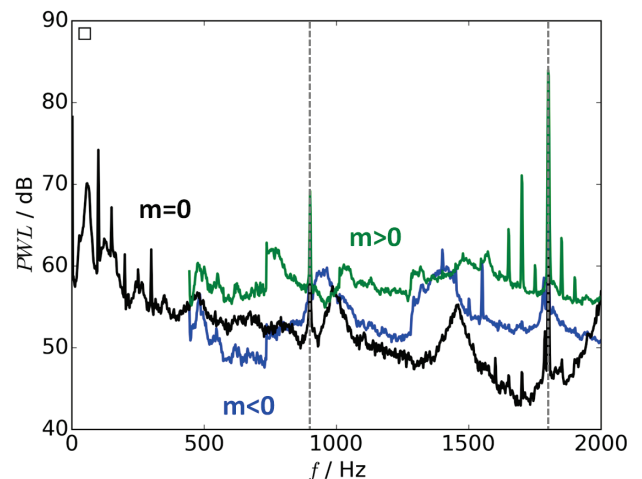


Abbildung 5: Addierte Schallleistungen aller Moden mit positiver / nullter / negativer azimuthaler Ordnung.

Fazit

Mithilfe der Radialmodenanalyse konnte das breitbandige Geräusch eines Axialventilators hochauflösend bis zur Frequenz $kR=8.3$ und maximalen Modenordnungen $|m|=6$

und $n=2$ analysiert werden. Die Berechnung der Schallleistung jeder Mode ermöglicht die detaillierte und quantitative Bewertung von Schallanregungsmechanismen und Schallausbreitungseffekten, wie z.B. die akustische Abschirmwirkung des Rotors. Die für die Ansaugseite des Axialventilators festgestellte unsymmetrische Verteilung der modalen Schallleistungen steht im Widerspruch zu oft verwendeten einfachen Modellen mit gleichförmigen Verteilungen (vgl. Punkt 1. der Einleitung). Des Weiteren stehen die festgestellten Korrelationen von Moden identischer azimuthaler Ordnungen im Widerspruch zu der vielfach verwendeten Annahme vollständig unkorrelierter Moden (vgl. Punkt 2. der Einleitung). Diese Erkenntnisse ermöglichen eine Weiterentwicklung von Methoden zur genaueren Breitbandlärm-Bewertung.

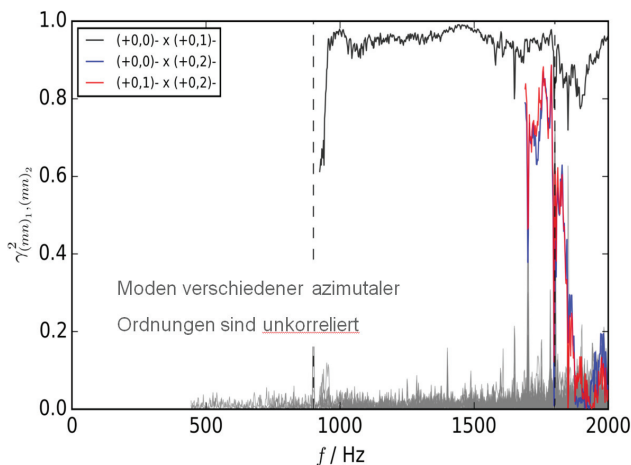


Abbildung 6: Kohärenzen der Moden (0,0), (0,1) und (0,2) paarweise untereinander sowie mit allen anderen Modenordnungen.

Literatur

- [1] ISO 5136: Determination of sound power radiated into a duct by fans and other air moving devices - In-duct method. (revision of ISO 5136:1990), 2003
- [2] Joseph, P.F., Morfey, C.L. and Lewis, C. (2003) Multi-mode sound transmission in ducts with flow *Journal of Sound and Vibration*, 264, (3), pp. 523-544.
- [3] C.R. Lewis, P.F. Joseph, A.J. Kempton, Estimation of the far-field directivity of broadband aeroengine fan noise using an in-duct axial microphone array, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 329, Issue 19, 13 September 2010, Pages 3940-3957
- [4] Tapken, Ulf, Gutsche, Dominic und Enghardt, Lars: Radial mode analysis of broadband noise in flow ducts using a combined axial and azimuthal sensor array. In: *AIAA Aviation - 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 16.-20.06.2014, Atlanta, USA, Paper No. 3318
- [5] Jürgens, W., Tapken, U., Pardowitz, B., Kausche, P., Bennett, G. J. und Enghardt, L.: Technique to Analyze Characteristics of Turbomachinery Broadband Noise Sources. In: *Proceedings 16th AIAA/CEAS*

Aeroacoustics Conference, 07.-09. Juni 2010, Stockholm, Schweden, Paper No. 2010-3979

- [6] Tapken, U. und Enghardt, L. (2006) Optimisation of sensor arrays for radial mode analysis in flow ducts. In: *Proceedings 12th AIAA/CEAS- Aeroacoustics Conference*, 2006-05-08 - 2006-05-10, Cambridge, MA (USA), Paper No. 2006-2638.
- [7] Tyler, J.M., Sofrin, T.G.: "Axial flow compressor noise", *SAE Transaction* 70, pp- 309-332, 1962