

# Detektion drehzahlsynchroner und -asynchroner Schallquellen am Axialventilator mithilfe eines Mikrofonarrays

Gert Herold und Ennes Sarradj

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Technische Akustik – gert.herold@tu-berlin.de

## Einleitung

Arrayverfahren zur Lokalisierung und Quantifizierung rotierender Schallquellen haben sich als Messtechnik für Axialventilatoren etabliert [1–4]. Beim Verfahren des virtuell rotierenden Arrays werden Zeitdaten mit in einem Ring angeordneten Mikrofonen aufgenommen und anschließend in ein rotierendes Bezugssystem transformiert. Die Anwendung beschränkt sich hierbei für gewöhnlich auf Quellmechanismen, die mit der Drehzahl des Ventilators rotieren – wie etwa an den Vorder- und Hinterkanten der Schaufeln.

Je nach Betriebspunkt des Ventilators treten jedoch Quellen auf, die mit anderen Geschwindigkeiten rotieren. Zusätzlich werden bei jeder Messung auch akustische Phänomene aufgezeichnet, die nicht um die Rotorachse rotieren, wie z.B. statische oder reflektierte Quellen. Nicht oder mit abweichender Geschwindigkeit rotierende Schallquellen führen bei einer entsprechenden Schallkartierung zu über den Umfang verschmiert abgebildeten Quellanteilen. Im Folgenden wird ein auf Mikrofonarraymessungen basierendes Verfahren vorgestellt, mit Hilfe dessen die Rotationsgeschwindigkeiten auftretender Quellen ermittelt werden können.

## Theorie

### Virtuell rotierendes Array

Mikrofonarrayverfahren im Frequenzbereich setzen relativ zu den Sensorpositionen stationäre Quellen voraus. Hierfür werden die mit einem stehenden Array gemessenen Zeitdaten mitrotiert und in den Frequenzbereich transformiert. Dies kann beispielsweise durch eine Interpolation der Zeitdaten zwischen Sensorpositionen entsprechend der zeitlich veränderlichen Positionen eines rotierenden Arrays und einer anschließenden FFT geschehen [2].

Eine weitere Möglichkeit ist es, die mit  $M$  Mikrofonen aufgenommenen Zeitdaten direkt in den Frequenzbereich zu transformieren:

$$p(l, f) = \mathcal{F}(p(l, t))(f), \quad l = 1 \dots M \quad (1)$$

sowie vom Raum in den Modenbereich [1]:

$$p(m, f) = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M p(l, f) e^{-jm\varphi_l}, \quad (2)$$

mit den Azimutalmoden

$$m = -\frac{M}{2} \dots \frac{M}{2} - 1 \quad (3)$$

Die virtuelle Rotation der Daten wird nun durch eine Verschiebung der Frequenz entsprechend der Rotationsfrequenz  $f_{\text{rot}}$  sowie der betrachteten Mode  $m$  realisiert:

$$p_{\text{rot}}(m, f) = p(m, f + m \cdot f_{\text{rot}}) \quad (4)$$

Abschließend wird vom Moden- in den Raumbereich rücktransformiert:

$$p_{\text{rot}}(l, f) = \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} p_{\text{rot}}(m, f) e^{jm\varphi_l} \quad (5)$$

Mit den so erhaltenen Daten können Verfahren zur räumlichen Trennung stationärer Quellen (wie z.B. Beamforming im Frequenzbereich) angewendet werden, um Schallquellen zu charakterisieren, die genau mit  $f_{\text{rot}}$  rotieren. Üblicherweise wird die Drehzahl bei praktischen Messungen aus einem Triggersignal bestimmt (ein Ausschlag pro Umdrehung). Für das im Folgenden beschriebene Verfahren wird dieses nicht verwendet.

### Drehzahlbestimmung

Entsprechend Gleichung (4) kann eine Mode abhängig von ihrer Ordnung  $m$  und der Drehzahl  $f_{\text{rot}}$  „derotiert“ werden. Befinden sich im Schallfeld dominante, mit dieser Drehzahl rotierende Quellen, kann angenommen werden, dass die spektrale Charakteristik einer derotierten Mode der der nichtrotierenden Grundmode  $m = 0$  ähnelt. Dabei ergibt sich das jeweilige Modenspektrum aus dem Signal der Quelle, normiert durch einen durch Quellorte und die Modenordnung bestimmten Verlauf. Allgemein kann formuliert werden, dass die Spektren zweier beliebiger Moden  $a$  und  $b$ , entsprechend ihres relativen Modenabstandes  $\Delta m = b - a$  und der Rotationsfrequenz  $f_{\text{rot}}$  verschoben, ähnliche Charakteristik besitzen.

Das bedeutet, dass eine Kreuzkorrelation zweier Modenspektren

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_a^*(f) \cdot p_b(f + \Delta m f_{\text{rot}}) df \quad (6)$$

$$\equiv (p_a(f) \star p_b(f))(\Delta m f_{\text{rot}})$$

dort Maxima aufweist, wo  $f_{\text{rot}}$  der Drehzahl einer Quelle entspricht. Die Kreuzkorrelation ( $\star$ ) in Gleichung (6) lässt sich als Faltung ( $*$ ) formulieren und effizient über

eine FFT berechnen:

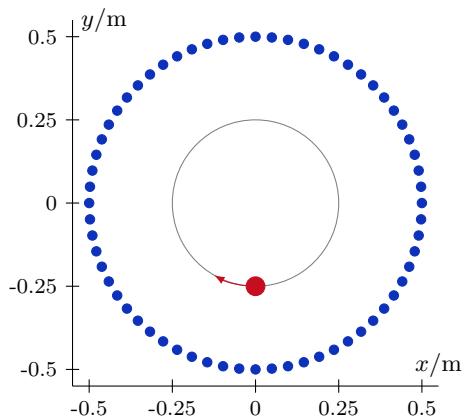
$$\begin{aligned}
 p_a(f) \star p_b(f) &= p_a(f) \star p_b^*(-f) \\
 &= p_a(f) \star p_{-b}(f) \\
 &= \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(p_a(f)) \cdot \mathcal{F}(p_{-b}(f))) \\
 &= \mathcal{F}(\mathcal{F}^{-1}(p_a(f)) \cdot \mathcal{F}^{-1}(p_{-b}(f))) \\
 &= \mathcal{F}(p_a(t) \cdot p_{-b}(t))
 \end{aligned} \tag{7}$$

Hierfür werden die Zeitsignale zuerst vom Raum- in den Modenbereich transformiert (siehe Gl. (2)), die Zeitsignale zweier Moden miteinander multipliziert und das Ergebnis schließlich per FFT in den Frequenzbereich transformiert. Durch ungünstige Quellenordnung, Tonalität des Signals sowie kohärente Quellen können je nach betrachteten Moden oder Frequenzbereichen Mehrdeutigkeiten auftreten, sodass die Drehzahl nicht korrekt bestimmt wird. Hier kann die Betrachtung von mehr als einem Modenpaar  $(a, b)$  sinnvoll sein.

## Experimente

### Simulation: Benchmark rotierende Punktquellen

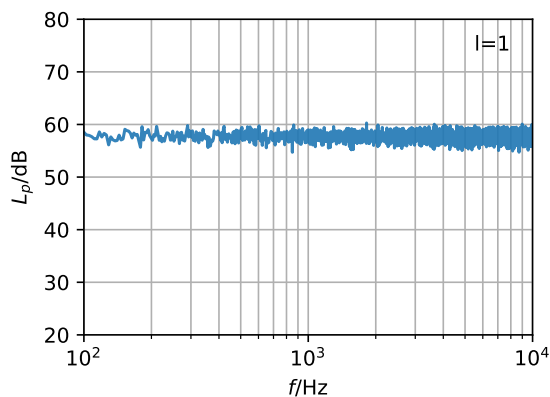
Das Verfahren wird zunächst anhand simulierter Datensätze getestet. Im ersten Fall wird eine mit konstanter Drehzahl rotierende Punktquelle betrachtet, die weißes Rauschen abstrahlt. Der verwendete Datensatz ist als Benchmark für Array-Verfahren verfügbar [5]. Simuliert werden Schalldruckmessdaten auf einem Array mit 64 gleichmäßig in einem Ring angeordneten Mikrofonen (siehe Abb. 1). Das Array hat einen Durchmesser von 1 m. Im



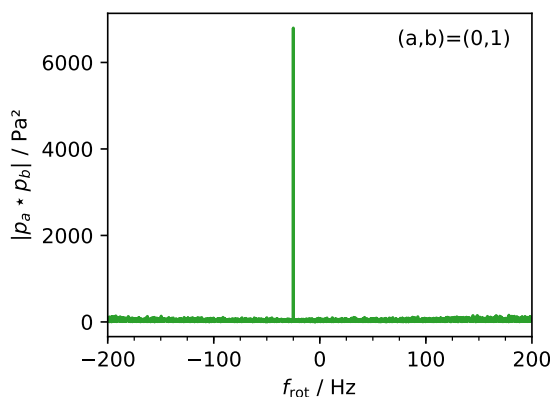
**Abbildung 1:** Simulations-Setup für eine rotierende Punktquelle (rot) und 64 Mikrofone (blau).

Abstand von 0,5 m zu der Array-Ebene rotiert die Quelle auf einem Radius von 0,25 m mit einer Drehzahl von  $f_{\text{rot}} = -25$  Hz (Rotation im Uhrzeigersinn). Das Zeitsignal dauert 10 s und ist mit einer Frequenz von 48 kHz abgetastet. Abbildung 2 zeigt das an einem der Mikrofone gemessene Spektrum. Dies entspricht dem erwarteten weißen Rauschen.

Ausgehend von den simulierten Zeitdaten wird die Signalverarbeitung entsprechend Gl. (7) durchgeführt. In Abb. 3 ist die Kreuzkorrelation der Spektren der Moden 0 und 1 dargestellt. Es wird der Betrag des komplexwertigen Ergebnisses ausgewertet. Deutlich sichtbar ist der



**Abbildung 2:** Schmalbandspektrum einer simulierten rotierenden Punktquelle an einem Mikrofon.



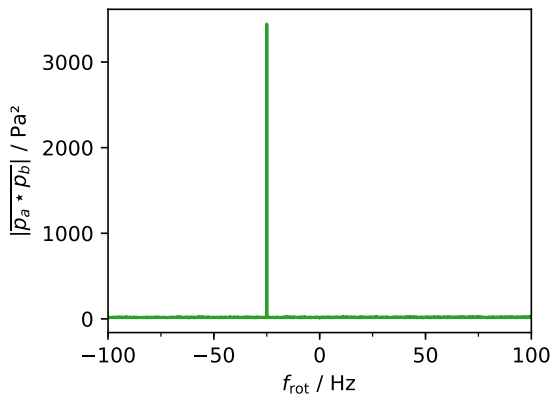
**Abbildung 3:** Betrag der Kreuzkorrelation des 0. und 1. Modenspektrums des Datensatzes mit einer Quelle.

Peak bei  $f_{\text{rot}} = -25$  Hz, der der Rotationsfrequenz entspricht. Werden alle Kreuzkorrelationen mit  $\Delta m = 1$ , also  $(a, b) = (0, 1), (1, 2), \dots, (31, 32)$  berechnet und geometrisch gemittelt, wird das Rauschen bei nicht auftretenden  $f_{\text{rot}}$  vermindert (siehe Abb. 4).

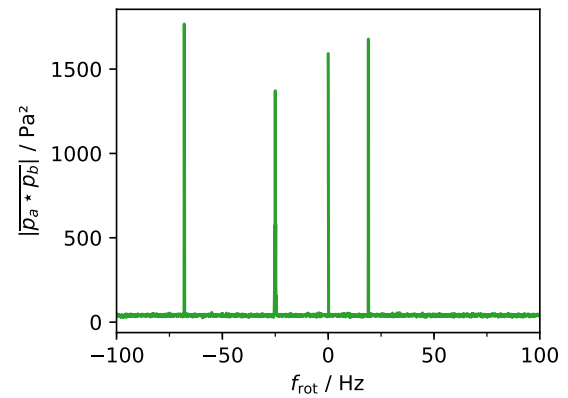
Im zweiten betrachteten Datensatz werden vier unterschiedlich rotierende Punktquellen simuliert. Alle Quellen strahlen gleich starkes, unkorreliertes weißes Rauschen ab und befinden sich auf demselben Radius. Wie in Abb. 5 schematisch dargestellt ist dabei jeweils eine Quelle:

- stehend
- rotierend mit  $f_{\text{rot}} = -25$  Hz, zeitlich leicht schwankende Drehzahl ( $\pm 1\%$ )
- konstant rotierend mit  $f_{\text{rot}} = -68$  Hz
- konstant rotierend mit  $f_{\text{rot}} = 19$  Hz

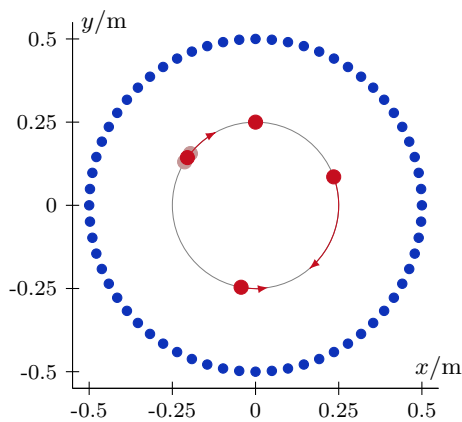
Das Ergebnis der Kreuzkorrelation der Modenspektren ist in Abb. 6 aufgetragen. Die vier Rotationsfrequenzen treten wieder deutlich hervor, wobei die Werte der Peaks in derselben Größenordnung liegen. Die leicht schwankende Drehzahl der Quelle mit  $f_{\text{rot}} = -25$  Hz resultiert



**Abbildung 4:** Eine rotierende Punktquelle: Betrag des geometrischen Mittels der Kreuzkorrelation aller Modenspektren mit  $\Delta m = 1$ .



**Abbildung 6:** 4 rotierende Quellen: Betrag des geom. Mittels der Kreuzkorrelation aller Modenspektren mit  $\Delta m = 1$ .



**Abbildung 5:** Simulations-Setup für 4 unterschiedlich rotierende Punktquellen.

in einem geringfügig breiteren Peak mit niedrigerem Maximalwert.

### Messung am Axialventilator

Zur experimentellen Validierung des Verfahrens werden Array-Messungen eines vorwärts gesichelten Ventilators ausgewertet [6]. Die Messungen fanden im Ventilatorprüfstand der Universität Erlangen-Nürnberg statt [7]. Der prinzipielle Messaufbau entspricht annähernd dem der obigen Simulationen, mit 64 auf einem Ring ( $d_{\text{Array}} = 1$  m) angeordneten Mikrofonen (siehe Abb. 7).

Der Ventilator hat 9 vorwärts gesichelte Schaufeln und einen Durchmesser von  $d_{\text{Vent}} = 0,495$  m. Er wird mit einer Drehzahl von  $f_{\text{rot}} = -24,8$  Hz betrieben. Hier werden zwei Betriebspunkte betrachtet: eine Lieferzahl von  $\phi = 0,18$ , was dem Auslegungspunkt des Ventilators entspricht, sowie eine Lieferzahl von  $\phi = 0,105$ , was einem Volumenfluss entspricht, bei dem mit Strömungsabrissen an den Schaufelvorderkanten zu rechnen ist.

Die gemessenen Spektren sind in Abb. 8 dargestellt und bestehen aus tonalen und breitbandigen Komponenten, wobei bei  $\phi = 0,105$  die Breitbandanteile stark überwiegen und tonale Komponenten wie Blattfolgefre-



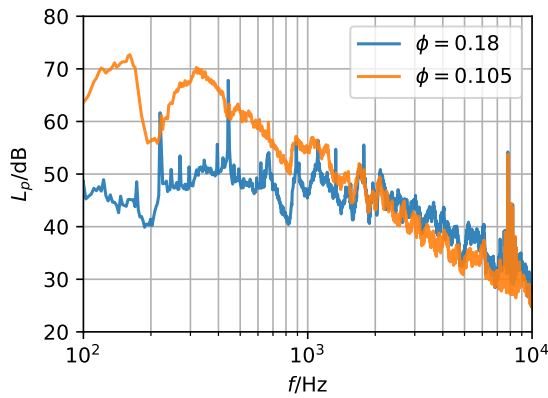
**Abbildung 7:** Messaufbau des untersuchten Ventilators mit Ringarray. Das axial mittige Mikrofon wird nicht verwendet.

quenzen nur noch schwach erkennbar sind.

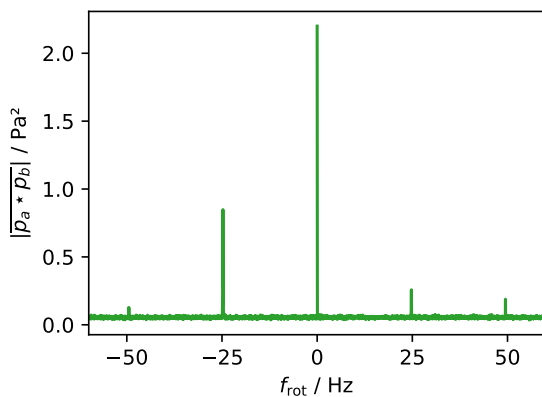
Die Messumgebung ist im tieffrequenten Bereich nicht reflexionsarm. Um störende Einflüsse von Reflexionen zu vermeiden, werden daher die Zeitdaten vor der Auswertung ab 2000 Hz hochpassgefiltert.

Abbildung 9 zeigt die gemittelten Kreuzkorrelationen der Modenspektren für  $\phi = 0,18$ . Während die Drehzahl von  $-24,8$  Hz deutlich detektiert wird, liegt der stärkste Peak bei 0 Hz. Dies deutet auf vorhandene Reflexionen, Fremdquellen oder tatsächlich nicht rotierende Quellen (wie z.B. im Nabenbereich des Ventilators) hin. Darüber hinaus finden sich auch bei Vielfachen der Drehzahl schwache Peaks. Mögliche Erklärungen hierfür sind räumlich periodische schwankenden Schalldrücke durch die Rotorblätter (die auch die Drehklänge hervorrufen) sowie sich im kurzen Kanal ausbildende Modenstrukturen.

Das entsprechende Ergebnis für die Lieferzahl  $\phi = 0,105$  ist in Abb. 10 dargestellt. Auch hier sind Quellanteile bei 0 Hz und  $-24,8$  Hz dominant. Zusätzlich finden sich hier jedoch Quellen im Drehzahlbereich zwischen  $-8$



**Abbildung 8:** Schmalbandspektren des Ventilators bei zwei verschiedenen Betriebspunkten.



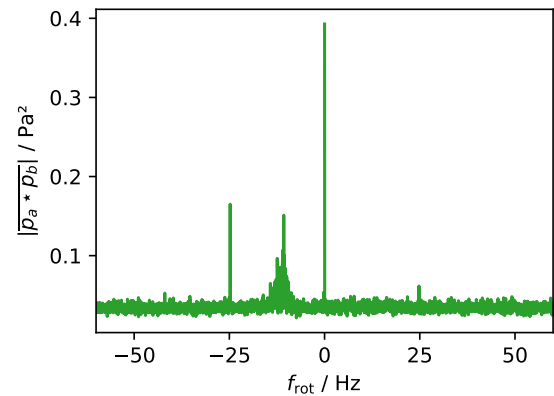
**Abbildung 9:** Ventilator,  $\phi = 0,18$ : Betrag des geom. Mittels der Kreuzkorrelation aller Modenspektren mit  $\Delta m = 1$ .

und  $-15$  Hz, mit einem deutlichen Peak bei  $-10,7$  Hz. Dies deutet darauf hin, dass bei diesem Betriebspunkt Strömungsablösungen mit nachfolgenden Blättern interagieren und so einen Quellmechanismus darstellen, der mit deutlich unter der Ventilator Drehzahl liegenden Geschwindigkeit rotiert.

## Zusammenfassung

Ein Verfahren zur Drehzahlbestimmung von Schallquellen am Ventilator, das allein auf der Auswertung akustischer Signale basiert, wurde vorgestellt. Dafür werden Messungen mit einem an der Quellrotationsachse zentrierten Mikrofon-Ringarray verarbeitet. Kernelement der Datenverarbeitung ist die Modalzerlegung der gemessenen Daten und eine Kreuzkorrelation der Modenspektren.

Das Verfahren wurde mit Simulationen von rotierenden Punktquellen sowie an Messungen mit einem gesicherten Axialventilator getestet. Dabei konnten mehrere unabhängig rotierende Quellen detektiert werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass bei einem geringen Volumenfluss am Ventilator Quellmechanismen auftreten, die langsamer als dessen Drehzahl rotieren.



**Abbildung 10:** Ventilator,  $\phi = 0,105$ : Betrag des geom. Mittels der Kreuzkorrelation aller Modenspektren mit  $\Delta m = 1$ .

## Literatur

- [1] W. Pannert, C. Maier. Rotating beamforming – motion-compensation in the frequency domain and application of high-resolution beamforming algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 333(7):1899–1912, 2014.
- [2] G. Herold, E. Sarradj. Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans. *Noise Control Engineering Journal*, 63(6):546–551, 2015.
- [3] F. J. Zenger et al. Sound source localization on an axial fan at different operating points. *Experiments in Fluids*, 57(8):1–10, 2016.
- [4] C. Ocker et al. A Comparison of Frequency-Domain Microphone Array Methods for the Characterization of Rotating Broadband Noise Sources. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(1):66–74, 2019.
- [5] G. Herold. b11: Rotating Point Sources, URL: <https://www.b-tu.de/fg-akustik/lehre/aktuelles/arraybenchmark>, 2017.
- [6] G. Herold et al. Influence of blade skew on axial fan component noise. *International Journal of Aeroacoustics*, 16(4-5):418–430, 2017.
- [7] F. Zenger, S. Becker. Fluid Mechanical and Acoustic Characterization of Low-Pressure Axial Fans with different Blade Skew. In *18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*, Lissabon, Portugal, 2016.