Separate Detektion von Schallquellen an gegenläufigen Rotoren

Gert Herold und Ennes Sarradj

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

Einleitung

Mithilfe von Mikrofonarrayverfahren lassen sich räumlich verteilte Schallquellen getrennt voneinander charakterisieren. Bei Verwendung geeigneter Sensoranordnungen ist eine Betrachtung rotierender Quellen mit einem virtuell rotierenden Array (VRA) möglich. Dabei werden die gemessenen Zeitsignale in ein entsprechend der Drehzahl mitrotierendes Bezugssystem transformiert, sodass bewegte Quellen darin als stationär angesehen werden können. So lassen sich für die Quelldetektion auch recheneffiziente Arrayverfahren im Frequenzbereich anwenden. Treten in einem Datensatz Quellen mit unterschiedlicher Drehzahl oder sowohl stehende als auch rotierende Quellen auf, sind in jedem möglichen Bezugssystem dennoch rotierende Schallquellen enthalten, die das Ergebnis störend überlagern. Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das die Messdaten für eine Auswertung im Frequenzbereich so filtert, dass nur die im jeweiligen Bezugssystem stationären Schallanteile erhalten bleiben.

Theorie

Virtuell rotierendes Array

Zur Charakterisierung von sich auf Kreisbahnen bewegenden Schallquellen hat sich das Verfahren des virtuell rotierenden Arrays (VRA) etabliert. Hierbei werden basierend auf Messdaten aus einem stationären Mikrofonarray Daten entlang einer rotierenden Trajektorie synthetisiert, sodass die bewegten Quellen relativ dazu stationär erscheinen [3]. Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der Rotationsachse sowie eine Arraygeometrie, die diese umschließt. Ein Anordnung von Mikrofonen auf einem axial zentrierten Ring hat sich als vorteilhaft für eine gute räumliche Auflösung der Quellen erwiesen [5].

Die virtuelle Rotation kann z. B. durch Interpolation von Sensorsignalen im Orts-Zeit-Raum [4] oder durch Spektrenverschiebung im Moden-Frequenz-Raum [6] geschehen. Für letzteres Verfahren werden die mit M Mikrofonen (Index $l = 1 \dots M$) aufgenommenen Zeitdaten zunächst in den Frequenzraum transformiert

$$p(l, f) = \mathcal{F}(p(l, t))(f) \tag{1}$$

sowie vom Orts- in den Modenraum:

$$p(m) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{l=1}^{M} p(l)\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\, 2\pi\, m\, \frac{l}{M}}, \tag{2}$$

wobei der Index $m = -\frac{M}{2} \dots \frac{M}{2} - 1$ die Azimutalmodenordnung beschreibt. Die Transformation ins mitrotierende Bezugssystem wird über eine Verschiebung der Modenspektren entsprechend

$$p_{\mathrm{rot}}(m, f) = p(m, f - m \cdot f_{\mathrm{rot}}) \tag{3}$$

realisiert. Anschließend können die Daten wieder in den Orts-Zeit-Raum rücktransformiert werden.

Beamforming im Frequenzbereich

Für einen beliebigen Punkt im Raum kann der von dort eintreffende Schall mithilfe von akustischem Beamforming ermittelt werden. Die allgemeine Formulierung im Frequenzbereich lautet für eine Frequenz:

$$b = \boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\, \boldsymbol{C}\, \boldsymbol{h}\ . \tag{4}$$

Der Steeringvektor $\boldsymbol{h}$ enthält die relative Phasenverschiebung und Amplitudenkorrektur zwischen den Mikrofonen und einem Fokuspunkt entsprechend eines Monopol-Schallausbreitungsmodells [7].

Die Kreuzspektralmatrix $\boldsymbol{C}$ (CSM) wird nach der Methode von Welch [8] berechnet. Das synchron mit mehreren Kanälen aufgezeichnete Zeitsignal wird in K Abschnitte eingeteilt, die fouriertransformiert werden. Für jeden Abschnitt werden nun die Kreuzspektren der Kanäle berechnet und im Anschluss wird über alle Abschnitte gemittelt:

$$\boldsymbol{C} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \boldsymbol{p}_k\, \boldsymbol{p}_k{}^{\mathrm{H}}\ . \tag{5}$$

Abseits der Hauptdiagonale (HD) der so berechneten Matrix wird der Einfluss von zwischen den Kanälen unkorrelierten Signalanteilen (z.B. Mikrofon-Eigenrauschen) mit höherer Anzahl an Mittelungen immer geringer. Auf der HD sind diese Anteile jedoch nach wie vor enthalten. Daher wird diese in praktischen Anwendungen häufig entfernt [1].

Kreuzspektralmatrix im Modenraum

Analog zur Berechnung der CSM im Ortsraum kann diese auch im Modenraum durchgeführt werden, d.h. nach der Transformation der gemessenen Zeitsignale entsprechend Gl. (2). Abseits der HD der sich so ergebenden Matrix mitteln sich nun zwischen den Moden unkorrelierte Signalanteile heraus. Das umfasst entsprechend Gleichung (3) auch solche Anteile, die im aktuellen Bezugssystem rotieren, da je nach Mode das rotierende Signal in einen anderen Frequenzbereich verschoben wird.

Wird die CSM im Modenraum berechnet, können daher durch Entfernen der Hauptdiagonale rotierende Signalanteile im Beamforming gedämpft werden. Hierfür ist zu beachten, dass der Steeringvektor $\boldsymbol{h}$ ebenfalls in den Modenraum transformiert werden muss, um Gl. (4) anwenden zu können. In Kombination mit der VRA-Methode, mit der rotierende Quellen als stationär betrachtet werden können, ist so auch eine bessere Filterung beliebig rotierender Quellen möglich.

Experimente

Simulation: Rotierende Punktquellen

Das Verfahren wird zunächst anhand eines simulierten Datensatzes getestet. Das Setup ist angelehnt an einen frei verfügbaren Benchmark mit rotierenden Punktquellen [2]. Im hier simulierten Fall rotieren je drei unkorrelierte Quellen mit einer Drehzahl von $f_{\mathrm{rot}} = \pm 25\,\mathrm{Hz}$ in entgegengesetzte Richtung. Die Rotation sowie die relative Anordnung der Quellen ist in Abb. 1 illustriert. Jeweils

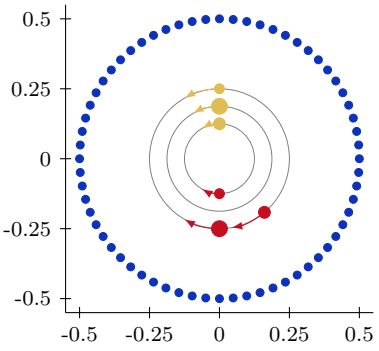

Abbildung 1: Simulations-Setup für rotierende Punktquellen (rot/gelb) und 64 Mikrofone (blau). Einheiten in m.

gleichfarbige Punkte rotieren in die gleiche Richtung mit derselben Drehzahl. Die unterschiedlichen Größen der Punkte entsprechen der relativen Stärke der Quelle (3 dB-gestaffelt). Das aus 64 Mikrofonen bestehende Array befindet sich in einem Abstand von 0,5 m zur Rotationsebene.

Ausgewertet werden zunächst die mit voller CSM berechneten Beamforming-Ergebnisse nach Anwendung des VRA mit den beiden Rotationsgeschwindigkeiten. In Abb. 2 sind die entsprechenden Schallkartierungen bei 5 kHz bzw. 8 kHz dargestellt. Neben den im jeweiligen

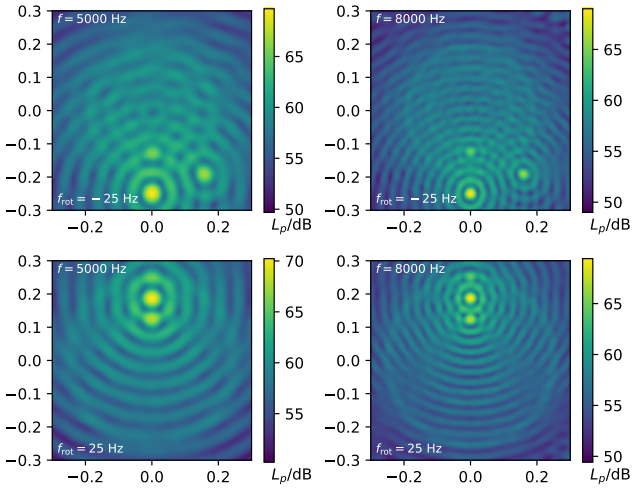

Abbildung 2: Beamforming-Ergebnisse nach VRA, simulierte Quellen, volle CSM, Schmalband 23,4 Hz.

Bezugssystem stationären Quellen sowie den zugehörigen für eine Ringgeometrie typischen Punktspreizfunktionen ist deutlich zu erkennen, dass die rotierenden Quellen als Ringe in den Schallkarten sichtbar bleiben.

Dass diese jedoch bei der Verwendung der Modenraum-CSM für das Beamforming nur auf der Hauptdiagonale enthalten sind, wird bei der Betrachtung der Schallkarten deutlich, für deren Berechnung die HD entfernt wurde (siehe Abb. 3). Der dargestellte Dynamikumfang

Tabelle 1: Mess- und Auswerteparameter.

Messobjekt	2×2 Rotorblätter
	$r_{\mathrm{max}} \approx 0{,}13\,\mathrm{m}$
	$f_{\mathrm{rot}} \approx \pm 31\,\mathrm{Hz}$
Array	64 Mikrofone
	$d_{\mathrm{Array}} = 0{,}85\,\mathrm{m}$
Messzeit	40 s
Abtastrate	51 200 Hz
FFT	4096 samples
	von-Hann-Fensterung

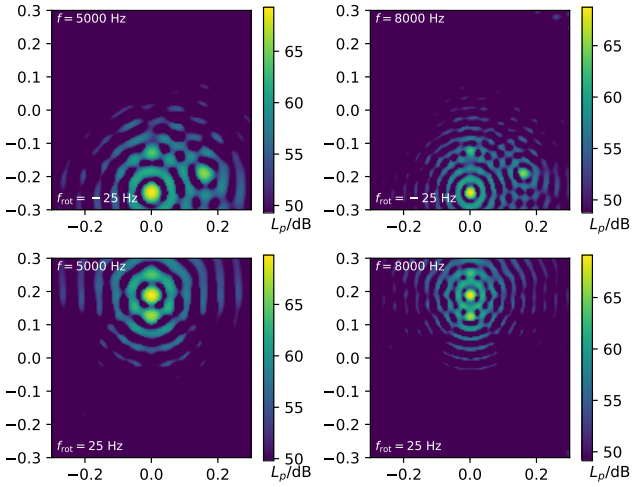

Abbildung 3: Modenraum-Beamforming nach VRA, sim. Quellen, CSM mit entfernter HD, Schmalband 23,4 Hz.

liegt wie in Abb. 2 bei 30 dB. Die durch die relativ rotierenden Quellen hervorgerufenen Ringe sind in diesen Karten nicht mehr erkennbar und der Signal-(„Rotations“-)Rausch-Abstand ist deutlich höher.

Messung: Koaxialrotor-Drohne

Es wurden Arraymessungen an einer kommerziell erhältlichen Drohne mit Koaxialrotor durchgeführt (siehe Abb. 4). Die Ebenen der beiden gegenläufigen Rotoren sind 3 cm voneinander entfernt. Der dem Array am nächsten gelegene Rotor ist von diesem 30 cm entfernt und dreht sich im Uhrzeigersinn. Die insgesamt 4 Rotorblätter wurden in Hinblick auf hohe Schallabstrahlung modifiziert. Die Drehzahl wird mithilfe eines Laser-Reflektors mit einem Ausschlag pro Umdrehung ermittelt. Während einer Messung treten leichte Drehzahlschwankungen auf, jedoch laufen die gegenläufigen Rotoren aufgrund der Mechanik komplett synchron. Weitere Mess- und Auswerteparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

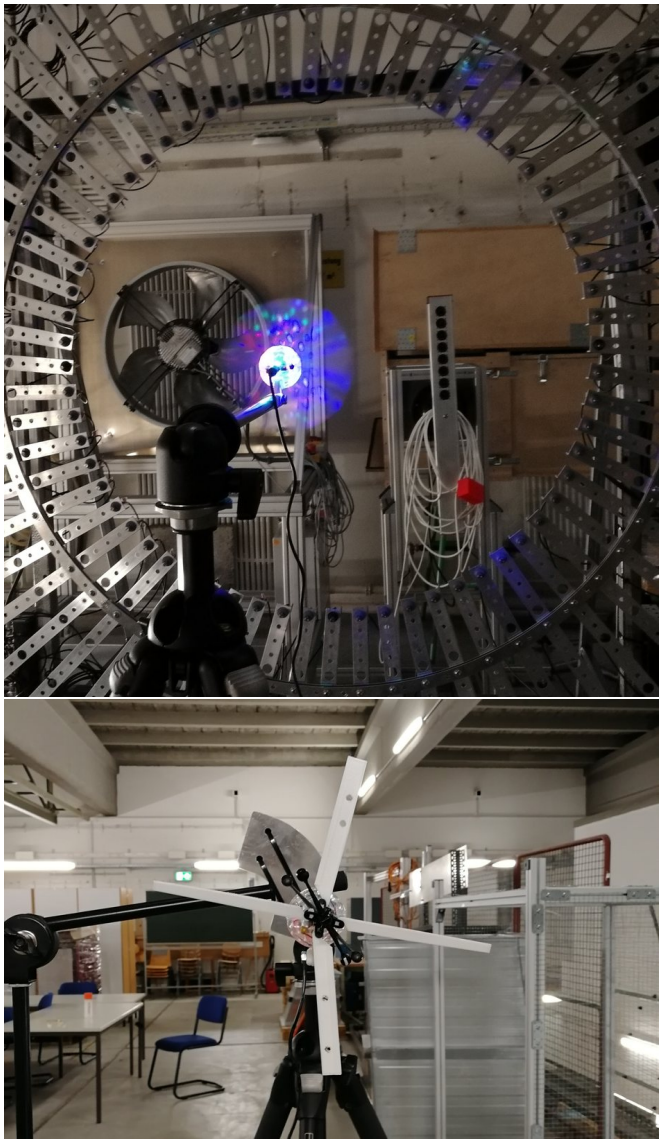

Abbildung 4: Oben: Ringarray mit Drohne in Bewegung. Unten: Blick auf die Drohne durch das Array (Rotorblätter in weiß).

In Abbildung 5 sind exemplarische Schallkarten bei 2,15 kHz sowie 4,3 kHz dargestellt, die mit Beamforming mit voller CSM berechnet wurden. Die stärksten Quellen sind jeweils an den Rotorspitzen zu erwarten. Zwar sind an den entsprechenden Positionen Quellen erkennbar, jedoch nur mit einem geringen Signal-Rausch-Abstand. Der Grund hierfür sind nicht nur mit anderen Drehzahlen rotierende Quellen – das umfasst im rotierenden Bezugssystem auch stationäre Quellen – sondern ebenfalls deren Punktspreizfunktionen. Besonders bei nahe der Rotationsachse liegende Quellen (wie z.B. dem Getriebe) können diese die Schallkarte erheblich beeinflussen.

Mit Entfernung der Hauptdiagonale der Modenraum-CSM kann auch hier der Signal-Rausch-Abstand für die rotorsynchronen Schallquellen erhöht werden, sodass diese besser identifiziert werden können. Dies ist in Abb. 6 gezeigt. Jedoch treten auch hier, besonders bei 4,3 kHz, noch Artefakte auf, die eine klare Zuordnung aller Quellen erschweren.

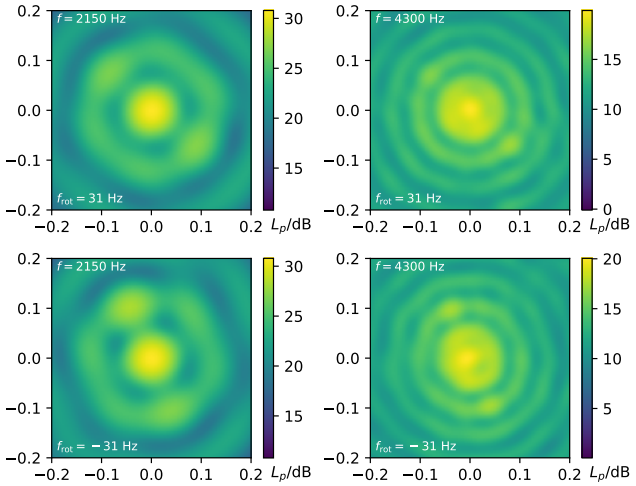

Abbildung 5: Beamforming-Ergebnisse nach VRA, Rotorblätter, volle CSM, Schmalband 12,5 Hz.

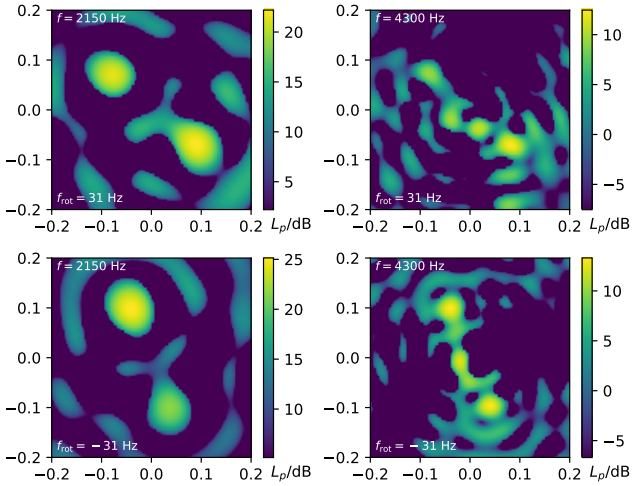

Abbildung 6: Modenraum-Beamforming nach VRA, Rotorblätter, CSM mit entfernter HD, Schmalband 12,5 Hz.

Zusammenfassung

Ein Verfahren zur verbesserten Trennung unterschiedlich rotierender Schallquellen mithilfe von Beamforming wurde vorgestellt. Dieses basiert auf der Berechnung der Kreuzspektralmatrix im Modenraum sowie der Entfernung deren Hauptdiagonale. Mithilfe eines virtuell rotierenden Arrays können unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten betrachtet werden.

Das Verfahren wurde anhand simulierter Daten mit rotierenden Punktquellen sowie Messdaten einer Koaxialrotor-Drohne validiert. Es wurde gezeigt, dass sich mithilfe der vorgeschlagenen Signalverarbeitung eine deutliche Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands erreichen lässt.

Literatur

[1] R. P. Dougherty. Beamforming in acoustic testing. In T. J. Mueller, editor, *Aeroacoustic Measurements*, pages 62–97. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.

[2] G. Herold. Microphone array benchmark b11: Rotating point sources, 2017.

[3] G. Herold et al. A comparison of microphone array methods for the characterization of rotating sound sources. In *Proceedings of the 7th Berlin Beamforming Conference*, pages 1–12, Berlin, Germany, 2018.

[4] G. Herold and E. Sarradj. Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans. *Noise Control Engineering Journal*, 63(6):546–551, nov 2015.

[5] S. Jekosch and E. Sarradj. An Extension of the Virtual Rotating Array Method Using Arbitrary Microphone Configurations for the Localization of Rotating Sound Sources. *Acoustics*, 2(2):330–342, 2020.

[6] W. Pannert and 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, dec 2014.

[7] E. Sarradj. Three-dimensional acoustic source mapping with different beamforming steering vector formulations. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012:1–12, 2012.

[8] P. D. Welch. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2):70–73, 1967.

Danke an Tobias Jüterbock für die Unterstützung bei den Messungen!