Ringförmiges Mikrofonarray zur Charakterisierung der Rotorstrukturschwingungen von Außenläufermotoren

Jens Krotsch, Christof Ocker, Merdijan Delija
Hochschule Aalen, 73430 Aalen, Deutschland, Email: jens.krotsch@hs-aalen.de

Einleitung

Die Laufruhe elektrischer Antriebe ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Periodische elektromagnetische Kräfte rufen jedoch Strukturschwingungen hervor. Insbesondere Direktantriebe, wie bspw. in Strömungsmaschinen integrierte Außenläufermotoren, übertragen diese auf das Laufrad und erzeugen unerwünschten Luftschall. Die experimentelle Beurteilung der Strukturschwingungen und der Rückschluss auf verursachende Kraftwellen ist daher von großer Bedeutung. Es resultiert die Aufgabe der effizienten Charakterisierung auftretender Schwingungen.

Kraftwellen in PM-Synchronmotoren

Abb. 1 zeigt einen Außenläufermotor. Durch Interaktion der Permanentmagnete (PM) mit dem genuteten Stator und den stromdurchflossenen Spulen, entstehen zeitlich veränderliche Kräfte; beispielhaft als Radialkraftverteilung f_r angedeutet, die auf den Rotor wirkt. Diese lässt

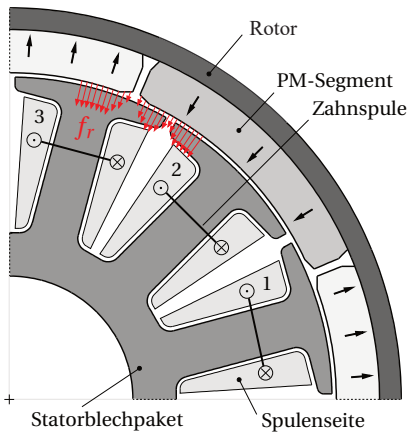

Abbildung 1: Schnitt eines Außenläufermotors

sich abhängig von Ort α und Zeit t als FOURIER-Reihe

$$f_r(\alpha, t) = \sum_{\nu} \sum_{\mu} \hat{A}_{\nu,\mu} \cos\left(\nu\alpha + \mu\omega_r t + \varphi_{\nu,\mu}\right) \qquad (1)$$

ausdrücken. Hierbei entspricht $\hat{A}_{\nu,\mu}$ den Kraftamplituden, ν der räumlichen Ordnungszahl sowie, bei konstanter Kreisfrequenz ω_r des Rotors, μ der zeitlichen Ordnungszahl, d. h. der Drehzahlordnung.

Bei gegebenen diskreten Nut- und Polzahlen treten charakteristische Ordnungszahlen auf [1]. Tabelle 1 gibt diese für den im Folgenden betrachteten Motor für $\nu \leq 4$ an.

Treffen die Radialkraftwellen eine Eigenform und Eigenfrequenz (Abb. 2), entsteht Resonanz, die als akustisch störend wahrgenommen wird und Maßnahmen erfordert.

Tabelle 1: Ordnungszahlen bei 12 Nuten und 10 Polen

Räuml. Ordn.	Drehzahlordnung μ
$\nu = 0$	30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, ...
$\nu = 1$	-
$\nu = 2$	12, 18, 42, 48, 72, 78, 102, 108, ...
$\nu = 3$	-
$\nu = 4$	6, 24, 36, 54, 66, 84, 96, 144, ...

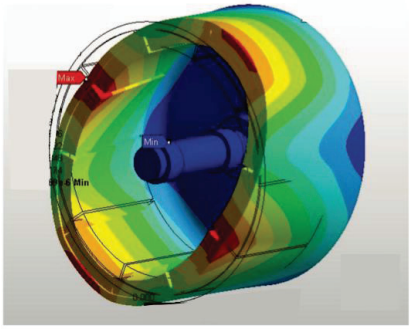

Abbildung 2: Rotoreigenschwingung (Auslenkung) der Ordnung $\nu = 2$ (Quelle: ANSYS)

Ausgangssituation

Die experimentelle Beurteilung kann mit Beschleunigungsaufnehmern am Rotor erfolgen [1]. Die Messung am rotierenden Maschinenteil ist aufwendig, die Anzahl der Aufnehmer stets klein. Nach NYQUIST lassen sich lediglich kleine räumliche Ordnungszahlen eindeutig identifizieren. Wünschenswert ist eine berührungslose Messung mit größerer Anzahl von Messstellen im ruhenden System.

Anstatt der Beschleunigungsmessung bieten sich Verfahren zur Schallquellenortung mit Arraysystemen an [2]. Zylinderförmige Mikrofonanordnungen zur Nahfeldholografie werden für Innen- und Außenläufermotoren eingesetzt [3, 4]. Diese liefern die Geschwindigkeitsverteilung an der gesamten Messobjektoberfläche, jedoch einhergehend mit ebenfalls großem Aufwand. Soll lediglich die räumliche und zeitliche Charakterisierung erfolgen, ist eine vereinfachte Anordnung gefordert.

Mikrofonanordnung zur Nahfeldmessung

Abb. 3 zeigt die vorgeschlagene ringförmige Anordnung mit 16 äquidistant in Umfangsrichtung α um den Winkel $\Delta\alpha$ versetzten Mikrofonen. Im Hintergrund ist der Außenläufermotor zu erkennen um dessen Rotor (schwarz) der Ring koaxial angeordnet wird, wie Abb. 4 veranschaulicht. Die Mikrofone befinden sich im gleichen Abstand h_m zum rotierenden Messobjekt. Die geometrische Positionierung der Mikrofone erfolgt durch eine auf der

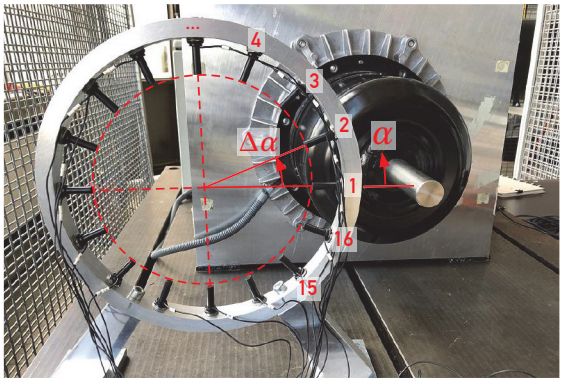

Abbildung 3: Mikrofonring und Außenläufermotor

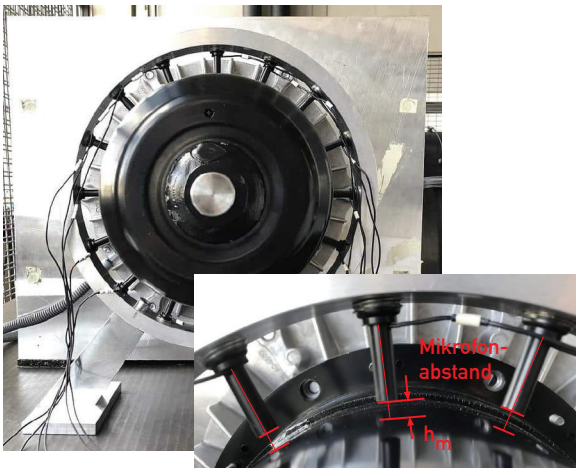

Abbildung 4: Mikrofonring und -abstand

Welle des Motors aufgesteckte Scheibe und die Signalerfassung wird durch aufgesteckte, mit dem Rotor umlaufende Lautsprecher überprüft [5].

Messgrößen und Datensynchronisation

Die akustische Analyse elektrischer Antriebe erfordert weitere Messgrößen, wie beispielsweise die Drehstellung und den zeitlichen Verlauf der Strangströme des Motors, wie Abb. 5 veranschaulicht. In der Regel sind hierfür unterschiedliche Erfassungssysteme, im Diagramm als 1 bis 3 bezeichnet, erforderlich. Deren Messdaten sind zeitlich möglichst genau zu synchronisieren.

Dies kann durch Codierung anhand eines zusätzlich mit jedem Messsystem erfassten Dual-Tone-Multiple-Frequency-Signals (DTMF) erfolgen, beispielhaft, wie in der Telekommunikation üblich, nach Tabelle 2.

Tabelle 2: DTMF-Code

Freq.	1209 Hz	1336 Hz	1477 Hz
697 Hz	1	2	3
770 Hz	4	5	6
852 Hz	7	8	9
942 Hz	∗	0	#

Die Abb. 6 zeigt Spektrogramme der von Messsystem 1 und 3 aufgezeichneten DTMF-Signale d_1 bzw. d_3, die anhand der Codeabfolge auf der Zeitachse zueinander grob ausgerichtet werden. Die Feinausrichtung erfolgt durch

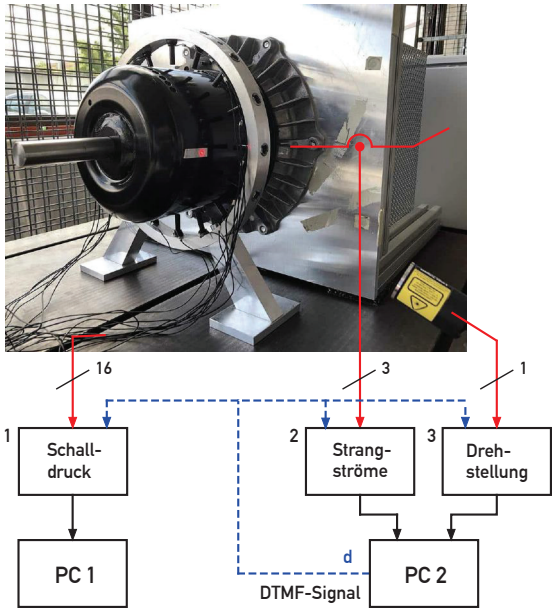

Abbildung 5: Messgrößenerfassung

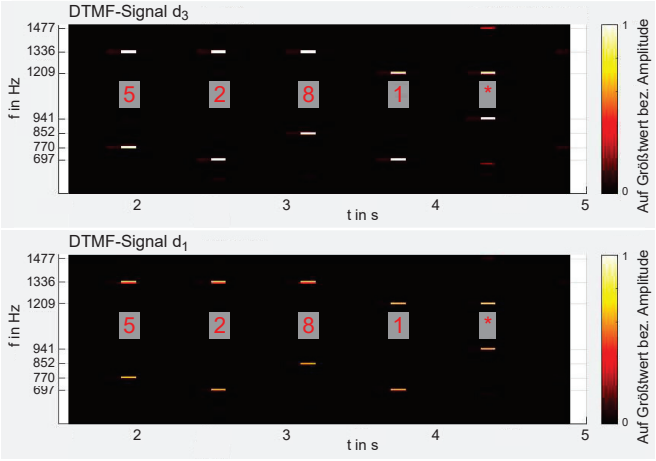

Abbildung 6: DTMF-Code

Kreuzkorrelation der Signale gemäß

$$K[\Delta i] = \frac{\sum_{i=1}^{N} d_1[i] \cdot d_3[i+\Delta i]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} d_1[i]^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} d_3[i+\Delta i]^2}}. \qquad (2)$$

Eine Signalverschiebung um Δi Abtastzeitpunkte maximiert K.

Dreh- und Fourier-Transformation

Die Schalldruckverteilung $\tilde{p}(\tilde{\alpha}, t)$ entlang des Rotors lässt sich gemäß der Definitionen der Abb. 7 im rotorfesten Bezugssystem $\tilde{\alpha}$ als FOURIER-Reihe

$$\tilde{p}(\tilde{\alpha}, t) = \sum_{\nu} \sum_{\kappa} \underline{\tilde{P}}_{\nu,\kappa}\, e^{j\nu\tilde{\alpha}} e^{j\kappa\omega t} \qquad (3)$$

ausdrücken. Zwischen dem stehenden Bezugssystem α und dem bewegten $\tilde{\alpha}$ besteht der Zusammenhang $\tilde{\alpha} = \alpha - \varphi_r$, wobei φ_r den Drehwinkel des Rotors bezeichnet. Bei genügend kleinem Mikrofonabstand h_m kann angenommen werden, dass der Schalldruck am Rotor gleich dem am Mikrofon ist, d. h. $\tilde{p}(\alpha, t) \approx p(\alpha, t)$.

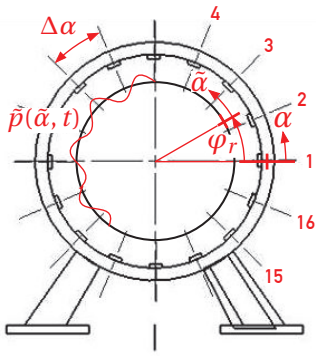

Abbildung 7: Variablendefinition

Für $p(\alpha, t)$ folgt somit im ruhenden Bezugssystem

$$p(\alpha,t) = \sum_{\nu} \sum_{\kappa} \underline{\tilde{P}}_{\nu,\kappa}\, e^{j\nu(\alpha-\varphi_r)}\, e^{j\kappa\omega t} \tag{4}$$

Die diskrete räumliche FOURIER-Transformation

$$\underline{\tilde{P}}_{\nu}(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} p(\alpha_n, t_k)\, e^{-j\nu\left(2\pi\frac{n-1}{N} - \varphi_r\right)} \tag{5}$$

liefert folglich die komplexen FOURIER-Koeffizienten

$$\underline{\tilde{P}}_{\nu}(t_k) = \tilde{P}_{a_\nu}(t_k) + j\,\tilde{P}_{b_\nu}(t_k) \tag{6}$$

im bewegten System zum Abtastzeitpunkt t_k ausgehend von der diskreten Schalldruckverteilung $p(\alpha_n, t_k)$ an den ruhenden Mikrofonen. Die Transformation vom ruhenden in das bewegte System ist implizit enthalten.

Die weitere zeitliche FOURIER-Transformation

$$\underline{\tilde{P}}_{a/b_{\nu,\kappa}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \tilde{P}_{a/b_\nu}(t_k)\, e^{-j\kappa 2\pi\frac{k-1}{K}} \tag{7}$$

der K diskreten Werte liefert die komplexen Koeffizienten

$$\underline{\tilde{P}}_{a/b_{\nu,\kappa}} = \tilde{P}_{aa/ba_{\nu,\kappa}} + j\,\tilde{P}_{ab/bb_{\nu,\kappa}} \tag{8}$$

und letztendlich die Amplituden der Schalldruckwellen im rotierenden Bezugssystem

$$\tilde{P}_{\nu,\kappa} = \sqrt{\tilde{P}^2_{aa_{\nu,\kappa}} + \tilde{P}^2_{ab_{\nu,\kappa}} + \tilde{P}^2_{ba_{\nu,\kappa}} + \tilde{P}^2_{bb_{\nu,\kappa}}} \tag{9}$$

der räumlichen Ordnungen ν und der Frequenzen $\frac{\kappa}{K} f_h$ bei einer Abtastfrequenz f_h.

Die kombinierte Dreh- und Fourier-Transformation lässt sich anhand der angenommenen Schalldruckverteilung

$$\begin{aligned}
\frac{p(\alpha_n, t_k)}{\hat{p}_{\max}} = \\
&\cos\left[1\,(\alpha_n - \omega_r t_k) + \tfrac{\pi}{6}\right] \cdot 1 \sin\left(2\pi\ 1000\,\text{Hz}\ t_k\right) + \\
&\cos\left[2\,(\alpha_n - \omega_r t_k) - \tfrac{\pi}{10}\right] \cdot \tfrac{1}{2} \sin\left(2\pi\ 1500\,\text{Hz}\ t_k\right) + \\
&\cos\left[4\,(\alpha_n - \omega_r t_k) - \tfrac{\pi}{10}\right] \cdot \tfrac{1}{2} \sin\left(2\pi\ 750\,\text{Hz}\ t_k\right) + \\
&\cos\left[2\,(\alpha_n + 0\omega_r t_k) - \tfrac{\pi}{4}\right] \cdot \tfrac{1}{2} \sin\left(2\pi\ 500\,\text{Hz}\ t_k\right) + \\
&\cos\left[1\,(\alpha_n + 10\omega_r t_k) - \tfrac{\pi}{4}\right] \cdot \tfrac{1}{2} \sin\left(2\pi\ 1750\,\text{Hz}\ t_k\right)
\end{aligned} \tag{10}$$

verdeutlichen, die sich aus umlaufenden, gegenlaufenden und ruhenden Teilwellen unterschiedlicher räumlich Ordnungen und Frequenzen zusammensetzt. ω_r bezeichnet die Kreisfrequenz des Rotors. Die Färbung erlaubt einen einfacheren Vergleich mit den Amplitudenspektrogrammen in Abb. 9. Mit dem Rotor umlaufende Schalldruckwellen erscheinen dort mit konstanter Frequenz, wohingegen sich stehende oder gegenlaufende mit zunehmender Drehzahl in ihre Seitenbänder aufspalten. Räumliche Ordnungszahlen, Amplituden und Frequenzen entsprechen den durch Gl. (10) vorgegebenen.

Beispielhafte Anwendung

Das Verfahren wird an einem Außenläufermotor und mit der Anordnung entsprechend Abb. 5 angewendet. Die Schalldruckmessung erfolgt bei einem Mikrofonabstand $h_m = 2\,\text{mm}$ und einer Drehzahländerung vom Stillstand bis 2000 1/min. Die Abb. 8 zeigt das A-

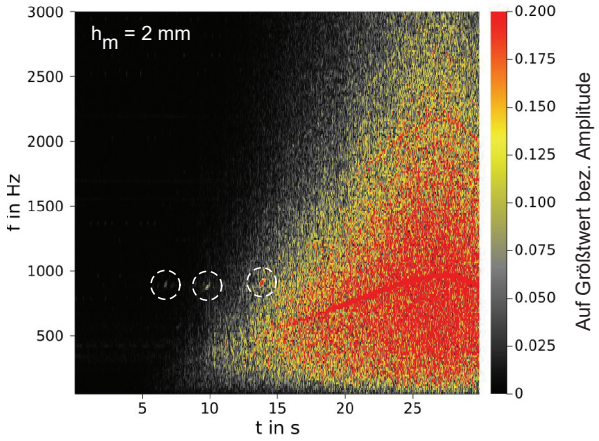

Abbildung 8: Amplitudenspektrogramm Mikrofon 1

bewertete Amplitudenspektrogramm eines Mikrofons. Überwiegend ist breitbandiges, mit der Drehzahl zunehmendes Strömungsrauschen festzustellen, das tonale Anteile überdeckt. Bei ca. 7 s, 10 s und 14 s sind Resonanzstellen zu erkennen. Die Messung mit einem Mikrofon liefert wenig Aufschluss über mögliche Geräuschursachen.

Im Vergleich dazu zeigen Abb. 10 a) und b) die Amplitudenspektren der räumlichen Ordnung $\nu = 2$ und 3 im rotierenden Bezugssystem über der Drehzahl. Die Diagramme geben Amplituden einzelner Drehzahlordnungen μ an, die durch ein mitlaufendes Bandpassfilter erhalten werden. Die Resonanzen (magenta, grün, rot) können elektromagnetischen Kraftwellen nach Tabelle 1 zugeordnet werden. Die ausgeprägten tonalen Anteile 30. und 60. Drehzahlordnung (blau) sind elektromagnetisch nicht zu erklären.

Primäre Einflussparameter

Der Herleitung von Gl. (4) liegt die Annahme $\tilde{p}(\alpha, t) \approx p(\alpha, t)$ zugrunde, d. h. der Mikrofonabstand ist als ein relevanter Einflussparameter anzusehen. Wie Abb. 10 a) und c) im Vergleich zeigen, hat der Abstand (Vergrößerung um Faktor 10) jedoch im Wesentlichen Einfluss auf die Schalldruckamplitude des tonalen Anteils und des breitbandigen Rauschens. Die im Spektrogramm enthaltene Information zur Charakterisierung der Rotorschwingungen sind unbeeinflusst.

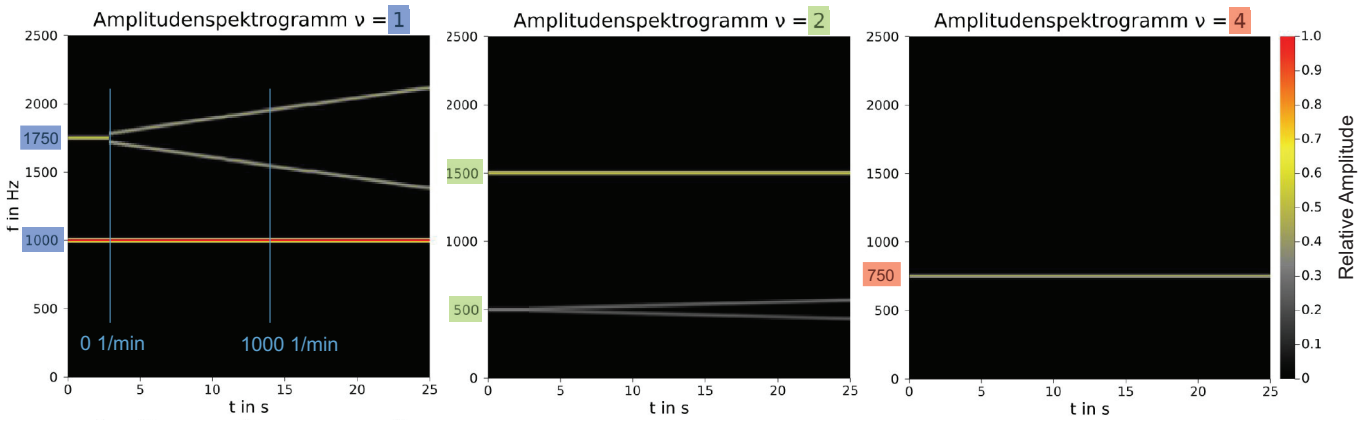

Abbildung 9: Amplitudenspektrogramme des Testfalls nach Gl. (10)

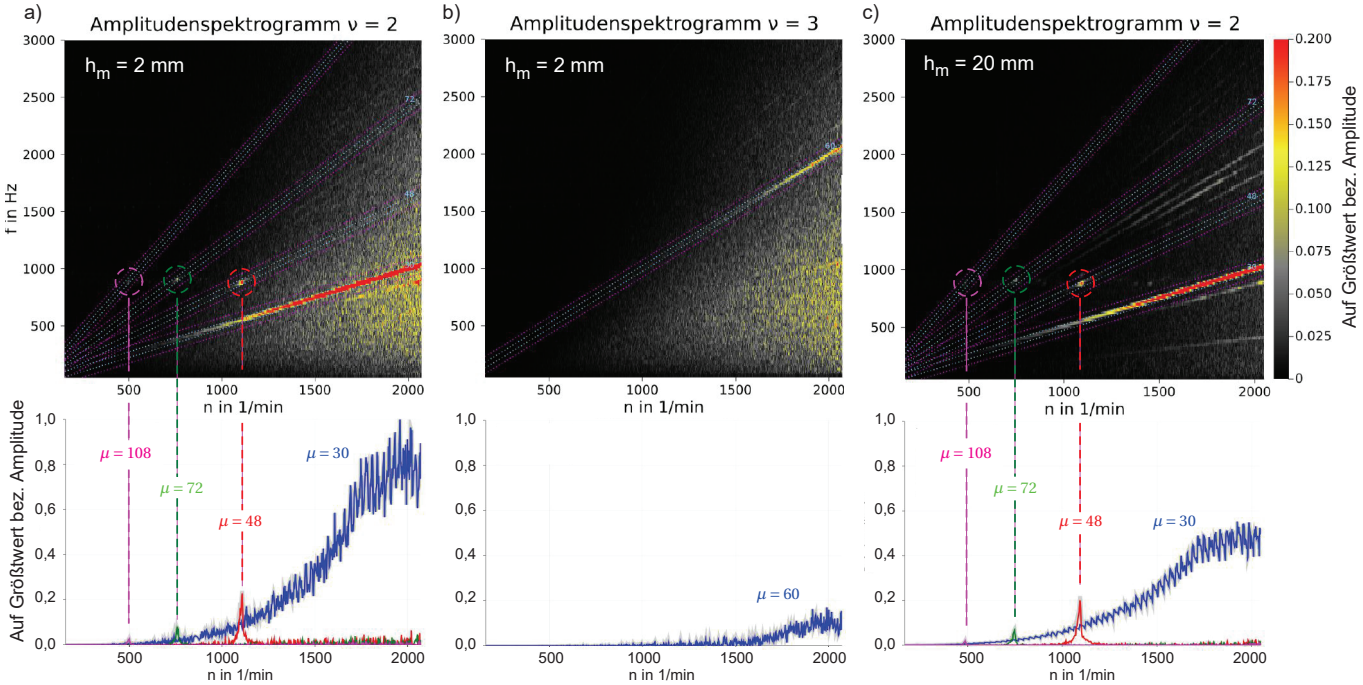

Abbildung 10: Amplitudenspektrogramme der Messung nach Abb. 5

Zusammenfassung und Ausblick

Ein einfach anwendbares Verfahren zur Synchronisation von Datenquellen und zur kombinierten Dreh- und FOURIER-Transformation konnte aufgezeigt werden. Die modale Zerlegung unterdrückt erwartungsgemäß Strömungsrauschen und ermöglicht die Charakterisierung von Strukturschwingungen sowie die Diskussion von Ursachen. Das Verfahren zeigt sich robust gegenüber dem Mikrofonabstand.

Die Resultate motivieren zu weiteren Schritten, wie bspw. einer erweiterten Sensitivitätsanalyse, der Einbeziehung der Motorströme sowie des Rapid-Prototypings des Mikrofonrings zur individuellen Anpassung an das Messobjekt.

Literatur

[1] J. Krotsch, B. Piepenbreier: Radial Forces in External Rotor Permanent Magnet Synchronous Motors With Non-Overlapping Windings, IEEE Trans. on Ind. Electr. 59 (2012) Nr. 5, S. 2267-2276

[2] C. Hundeck: Moderne Verfahren zur Schallquellenortung mit Arraysystemen, Lärmbekämpfung Bd. 3 (2008) Nr. 2

[3] J. Gomes et al.: Non-stationary Holography on Arbitrary Sources Shapes, inter.noice 2014, 43rd Int'l Congress on Noise Control Engineering, Melbourne

[4] K. Ikeda et al.: Mechanism of Noise Generation on Outer Rotor Motor, inter.noice 2014, 43rd Int'l Congress on Noise Control Engineering

[5] M. Delija: Geräuschanalyse elektrischer Antriebe mit Außenläufer unter Verwendung einer zylindrischen Mikrofonanordnung, Bachelor-Thesis, Juni 2021, Hochschule Aalen