

Identifikation körperschallinduzierender Komponenten eines elektrifizierten Luftfahrtantriebes

Lewin Weber-Karpinski¹, Erik W. Schneehagen¹, Thomas F. Geyer¹, Jörn Hübelt²

¹ *Institut für elektrifizierte Luftfahrtantriebe, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: lewin.weber-karpinski@dlr.de*

² *Hochschule Mittweida, 09644 Mittweida, Deutschland*

Einleitung

Die Reduktion anthropogener Treibhausgasemissionen stellt eine zentrale Herausforderung im Verkehrssektor dar [1]. Vor dem Hintergrund des EU-Ziels der Klimaneutralität bis 2050 werden technologische Innovationen auch als wesentlicher Hebel zur Emissionsminderung betrachtet [2]. Elektrifizierte Antriebskonzepte gewinnen dabei zunehmend an Bedeutung, da sie Potenzial zur Reduktion von Energieverbrauch, Lärm und Schadstoffemissionen besitzen [3].

In dieser Arbeit sollen die vibroakustischen Eigenschaften eines solchen elektrischen Antriebsstrang untersucht werden. Grundlage bildet ein Datensatz aus einer Messkampagne beim Flugzeughersteller Pipistrel Italia, bei der ein Antrieb bestehend aus zwei gekoppelten Axialflussmaschinen experimentell untersucht wurde. Die Messungen umfassen Modalanalysen einzelner Komponenten, Luftschalldruckmessungen sowie Betriebsschwinganalysen des Gesamtsystems. Zielstellung ist die Identifikation der körperschallinduzierenden Komponenten.

Um die Auswertung umfangreicher Messdatensätze zu beschleunigen, wurde in diesem Zuge ein Algorithmus zur automatisierten Identifikation dieser tonaler Körperschallanteile entwickelt. Dieser basiert darauf, dass Berechnungen aus der Literatur mit den Messergebnissen verglichen werden. Dazu werden Methoden der Signalverarbeitung, die relevanten Anregungsmechanismen sowie deren spektrale Signaturen analysiert. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Vergleich der Körperschallspektren eines gekoppelten Antriebsstrangs in Abhängigkeit von verschiedenen Lastzuständen.

Messobjekt

Der Antriebsstrang besteht aus zwei Axialflusssynchronmaschinen vom Typ Emrax 268 MV+42% (siehe Abbildung 1). Diese können jeweils 112 kW maximale Leistung und 250 Nm Drehmoment erzeugen. Die Neigung der Propellerblätter, welche auf der Außenfläche des Gehäuses montiert werden erlaubt eine maximale Drehzahl von 2.000 von bis 2.300 RPM für die geplante Flugmission. Die Motoren besitzen 10 Polpaare und 120 Statornuten. Gekühlt werden sie sowohl durch Luft als auch durch einen Kühlkreislauf mit Pumpe. Die Motoren werden von zwei durch Pipistrel entwickelte 2-Level-Spannungsquellenwechselrichter (VSI) angesteuert. Die dreiphasigen Wechselrichter besitzen eine Schaltfrequenz von 16 kHz. Als Modulationsverfahren wird Raumzeigermodulation (SVPWM) genutzt. In den Motoren wurden Wälzlager des Typs SCHAEFFLER 6207-2Z verwendet. Die einreihigen Rillenkugellager besitzen neun Wälzkörper [4].



Abbildung 1: Ansicht Antriebsstrang aus zwei gekoppelten Emrax 268 mit Statorkäfig zur Verbindung

Methodik

Die folgenden Messverfahren werden erläutert.

Experimentelle Modalanalyse

Im Rahmen der experimentellen Modalanalyse (EMA) werden zunächst die modalen Parameter eines Systems (Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfungsgrade) aus gemessenen Frequenzgangfunktionen (Frequency Response Functions, FRFs) ermittelt. FRFs beschreiben den Zusammenhang zwischen einer definierten Anregungskraft und der strukturellen Antwort des Systems im Frequenzbereich. An den Resonanzstellen dieser komplexen Übertragungsfunktionen treten die Eigenfrequenzen des Systems auf [5][6].

Als Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Eigenfrequenzen wurde Roving-Hammer verwendet. Dabei wird die Struktur sukzessive an verschiedenen Punkten mittels Impulshammer angeregt, während die strukturelle Antwort an festgelegten Messpunkten erfasst wird [6]. Zur Reduktion zufälliger Messabweichungen wurden an jedem Anregungspunkt drei Hammerschläge gemittelt. Zur gleichzeitigen Erfassungen der Informationen der Schwingungsantwort in allen drei Raumrichtungen wurden für die Messungen triaxiale Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Dadurch können auch gekoppelte beziehungsweise räumlich komplexe Eigenformen, welche sich aus einer Vielzahl an Freiheitsgraden zusammensetzen, ermittelt werden [7].

Betriebsschwinganalyse

Aufbauend auf der experimentellen Modalanalyse wurde eine Betriebsschwinganalyse (ODS) durchgeführt, um das Verhalten der Struktur unter realen Betriebsbedingungen zu charakterisieren [6]. Im Unterschied zur EMA

liegt der Fokus der ODS nicht auf der Bestimmung modaler Kenngrößen, sondern in der zeitlich momentanen und frequenzabhängigen Beobachtung der Verformungszustände der Struktur, die infolge der Kombination aus im regulären Betrieb wirkenden Anregungskräften und den ermittelten Eigenmoden entstehen [6].

Durch eine Gegenüberstellung der während der ODS ermittelten Schwingformen mit den zuvor experimentell identifizierten Eigenformen lässt sich analysieren, welche Eigenfrequenzen unter realen Betriebsbedingungen angeregt werden beziehungsweise welche Moden einen wesentlichen Beitrag zum beobachteten Schwingungsniveau leisten [7].

Identifikation körperschallinduzierender Komponenten

Die Auswertung erfolgt in zwei Teilschritten. Es werden sowohl stationäre Betriebspunkte, als auch Drehzahlhochläufe ausgewertet. Der Ablauf der stationären Betrachtungen setzt sich zusammen aus der Berechnung der spektralen Leistungsdichte der experimentell ermittelten Mikrofon- und Beschleunigungsaufnehmerdaten, der Detektion von lokalen Maxima unter Verwendung des Algorithmus nach [8] sowie der Berechnung einer Vielzahl an zu erwartenden Frequenzen, welche auf Basis der Literatur zusammengetragen wurden.

Im Anschluss wird überprüft, ob für eine gegebene Drehzahl die gefundenen Maxima mit den berechneten Frequenzen in einem Toleranzbereich koinzidieren. Für die Berechnung werden neben den Grundfrequenzen und Ordnungen (O) dieser, die Formeln aus Tabelle 1 verwendet, um auch das Auftreten von weiteren Frequenzen, deren Ordnungen und Nebenbändern (NB) abzubilden.

Dabei sind n, b, j Ordnungszahlen, p die Polpaar- und

Tabelle 1: verwendete Funktionen in Abhängigkeit von der mechanischen und elektrischen Frequenz zum Abgleich mit den gemessenen Spektren

Name	Berechnung
Rastmoment	$f_R = \frac{(p+Ql)+(p-Ql)}{2} \cdot f_{mech}$
Rastmoment NB	$f_{R,n,b}^\pm = n f_R \pm b f_{mech}$
Drehm.puls.	$f_P = 2u f_{elek} \epsilon$
Drehm.puls. NB	$f_{P,n,b}^\pm = n f_P \pm b f_{mech}$
Nutfreq.	$f_N = Q \cdot f_{mech}$
Nutfreq. NB	$f_{b,j,n}^{\pm\pm} = b f_N \pm j f_{elek} \pm n f_{mech}$
PWM NB	$f_{PWM} = n f_c \pm b f_{elek}$
Lagerfreq.	nach VDI 3832 [9]

Q die Nutzahl, f_c die Trägerfrequenz der Pulsweitenmodulation des Inverters und u die Anzahl der Phasen. Der Parameter l ist 1, falls $\frac{Q}{p} \in \mathbb{Z}$. Falls kein ganzzahliges Ergebnis existiert, entspricht l dem kleinsten gemeinsa-

men Vielfachen von Q und p . Die Harmonischen ϵ der Drehmomentpulsation ergeben sich zu:

$$\epsilon = 1 + 2ug \tag{1}$$

mit $g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Wird ein Treffer zwischen den experimentellen Spitzen und den berechneten Frequenzen erzielt, wird der Pegel der PSD bei dieser Frequenz mit allen dazugehörigen koinzidierenden potenziellen Quellen gespeichert. Neben dieser Form der Identifikation großer Pegel werden zusätzlich Drehzahlhochläufe analysiert. Dabei wird die Gesamtbeschleunigungsenergie ermittelt, indem über alle drei Achsenrichtungen der Sensoren energetisch gemittelt wird.

Ergebnisse

Die Abbildung 2 zeigt einen Überblick aller Frequenzgruppen, welche einen Treffer mit lokalen Maxima in den Spektren der Beschleunigungsaufnehmern erzielen konnten. Dabei ist vor allem die farbliche Trennung bzw. Überlappung der verschiedenen Wirkbereiche von Interesse. So ist bspw. klar das Modulationspektrum der PWM zu erkennen, welches sich um f_c bei 16 kHz bildet. Auch ist erkennbar, dass Pegelspitzen in den Mikrofon-

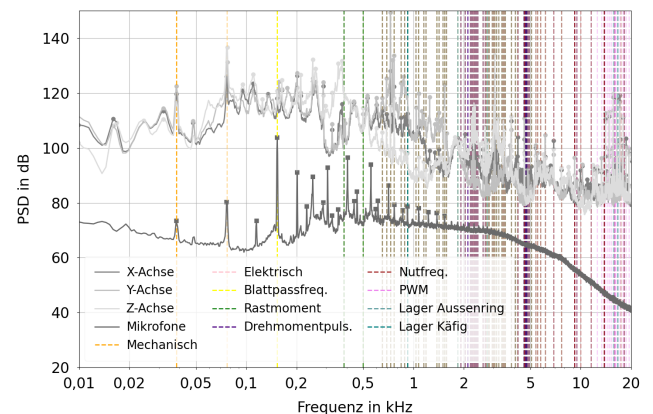


Abbildung 2: Überblick potenzieller Quellen der Beschleunigungsaufnehmer- und Mikrofonspektren im Parallelbetrieb bei Missionszieldrehzahl von 2.300 RPM

spektren vor allem durch die niedrigen Ordnungen der mechanischen f_{mech} , elektrischen f_{elek} und Blattpassfrequenz f_{BPF} verursacht werden. Letztere ist grundsätzlich eine aerodynamische Quelle, welche nicht vom Motor abgestrahlt wird, jedoch trotzdem im Beschleunigungsspektrum zu finden ist.

Die größten Beschleunigungspegel liegen bei 2.300 RPM im Bereich zwischen 700 und 800 Hz. Dies könnte auf eine zusätzliche Überlappung von Harmonischen des Rastmoments f_R und der Nuttfrequenz f_N zurückzuführen sein. Tabelle 2 zeigt die Quellen der 10 größten Pegel bei diesem Betriebspunkt, wobei NB dem Rang des Nebenbands und O der Ordnungslinie (oder der Ordnung innerhalb des NBs) entspricht.

Der Unterschied zwischen Luft- und Körperschall in Bezug auf die Lage der dominanten Frequenzen und den allgemeinen Verlauf der Leistungsdichtespektren, kann durch mehrere Faktoren erklärt werden. Betrachtet man

Tabelle 2: Auflistung der höchsten Beschleunigungspegel mit zugehöriger Frequenz und Quelle im Parallelbetrieb bei 2.300 RPM und unter Propellerlast siehe Abbildung 2

PSD in dB	f in Hz	Quellen
149.4	728.6	$-f_{mech}$ (19. O), $-f_R$ (NB 1, 2. O), $-f_N$ (NB 10, 1. O)
136.6	77.1	$-f_{mech}$ (2. O)
133.7	3066.3	$-f_{elek}$ (8. O), $-f_{BPF}$ (20. O), $-f_R$ (8. O), $-f_N$ (NB 4, 1. O)
133.6	766.8	$-f_{mech}$ (20. O), $-f_{elek}$ (2. O), $-f_{BPF}$ (5. O), $-f_R$ (2. O), $-f_N$ (NB 10, 1. O)
131.2	77.1	$-f_{mech}$ (2. O)
128.1	728.6	$-f_{mech}$ (19. O), $-f_R$ (NB 1, 2. O), $-f_N$ (NB 10, 1. O)
126.2	3066.3	$-f_{elek}$ (8. O), $-f_{BPF}$ (20. O), $-f_R$ (8. O), $-f_N$ (NB 4, 1. O)
126.0	76.3	$-f_{mech}$ (2. O)
125.4	689.7	$-f_{mech}$ (18. O), $-f_R$ (NB 2, 2. O), $-f_N$ (NB 10, 1. O)
124.1	156.4	$-f_{mech}$ (4. O), $-f_{BPF}$ (1. O)

Abbildung 3, welche den gleichen Test, jedoch ohne Rotorlast abbildet, ist einerseits erkennbar, dass es zwar zu Abstrahlung von Frequenzen mit Vielfachen von f_R oder f_N kommt, diese jedoch im Regalbetrieb unter Last durch die Propellergeräusche überdeckt werden. Ebenfalls ist in den Körperschallspektren zu erkennen, dass durch das geringere Drehmoment, infolge der fehlenden Last, die Amplitude des Körperschalls ebenfalls niedriger ist, jedoch weiterhin ein Maximum im Bereich zwischen 700 bis 800 Hz ausbildet. Dies könnte darauf hindeuten, dass es sich um einen Bereiche hoher Modendichte handelt oder aber die Struktur zwar stark angeregt wird, jedoch wenig Luftschall abstrahlt.

Der Abstrahlgrad wird durch die wirksame Fläche maßgeblich über die Fähigkeit der Struktur geprägt, Luft zu bewegen [10]. Gleichzeitig hängt die Auslenkung der Beschleunigungsaufnehmer von ihrer Position ab. Als stark abstrahlende Fläche der Axialflussmaschine wird in der Literatur das Motorgehäuse vermutet [11]. Die Sensoren konnten aufgrund der Tatsache, dass dieses beim Messobjekt rotiert, nicht darauf angebracht werden, sondern auf einer weniger stark abstrahlenden Fläche.

Um den Einfluss der Eigenfrequenzen auch über eine sich verändernde Drehzahl sichtbar zu machen werden in der folgenden Abbildung 4 in einem Spektrogramm die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen zusätzlich zum

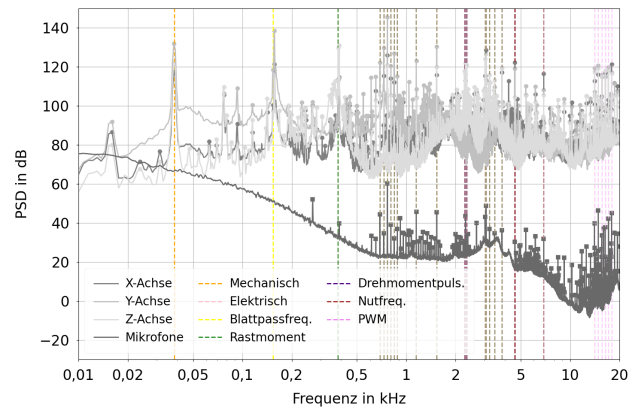


Abbildung 3: Beschleunigungs- und Schalldruckspektren, vertikale Linien repräsentieren die 20 größten Beschleunigungspegel und mögliche Quellen bei 2.300 RPM im Parallelbetrieb ohne Propellerlast

Verlauf der über alle Raumrichtungen und Beschleunigungssensoren gemittelten gesamten Beschleunigungsamplitude eingetragen. Sofern die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen mit den erkennbaren vertikalen Linien übereinstimmen, lässt sich ableiten, welche Schwingform der untersuchten Komponenten signifikanten Einfluss hat, da diese als Ergebnis der Modalanalyse bekannt ist. Ebenfalls lässt sich für bekannte Betriebspunkte in Bezug auf die Drehzahl über den stationären Teil der Auswertung bestimmen, welche Quellen mit den Eigenfrequenzen interferieren. Neben den diagonalen Motor-

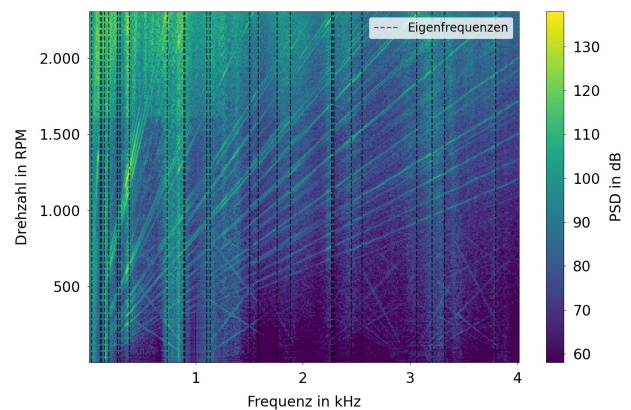


Abbildung 4: Spektrogramm der gesamten Beschleunigungsenergie der Sensoren bei Parallelbetrieb mit senkrecht eingetragenen experimentell ermittelten Eigenfrequenzen

ordnungen, welche pro stationärer Drehzahl durch den Algorithmus identifiziert werden können, sind auch vertikal die Eigenfrequenzen der Struktur erkennbar.

Es zeigt sich beispielsweise bei etwa 333 Hz die 4. Eigenmode des Gehäuses, welche sowohl bei etwa 1.200 als auch 2.000 RPM nahe dem gewünschten Betriebspunkt für die Flugmission durch Ordnungen angeregt wird. Auch die Beobachtung, dass der Bereich zwischen 700 und 800 Hz lastunabhängig eine starke Amplitude aufwies lässt sich in Abbildung 4 bestätigen. Ebenfalls konnte festgestellt werden, dass es auch drehzahlunabhängig

zu hohen Amplituden in diesem Bereich kommt (wenn auch nur lokale Maxima).

Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass experimentell nicht alle Eigenfrequenzen der gesamten Struktur durch Betrachtung der einzelnen Komponenten gefunden werden konnten. Ebenfalls sind im Bildausschnitt auch schwache Modulationsspektren erkennbar, deren konkrete Herkunft noch zu bestimmen ist. Ein möglicher Anhaltspunkt könnten Nebenbänder der Pulsweitenmodulation sein. Da die Modulationsspektren jedoch aller 1.000 Hz zu erkennen sind und nicht bei Vielfachen von 16 kHz (Trägerfrequenz der PWM), könnte es sich auch um Artefakte einer Regelungsfrequenz des Zwischenkreises handeln.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Algorithmus zur Auswertung von Messdaten aus Beschleunigungs- und Luftschallsignalen eines elektrischen Antriebsstrangs entwickelt, welcher auf Basis der Maschinenparameter und aus der Literatur stammenden Berechnungsmethoden Aussagen über die möglichen Quellen von lokalen Maxima in den Spektren der transformierten Messdaten ermittelt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen, welche die akustischen Eigenschaften dominieren, jede sind, welche auch durch die Literatur vorhergesagt werden.

Die größte Anregung erfährt die Struktur im Betriebspunkt des geplanten Missionsziels im Bereich zwischen 700 bis 800 Hz. In diesem Bereich überlagern sich Ordnungen des Rastmoments und Nutzfrequenz. Zusätzlich werden Eigenmoden in diesem Frequenzband angeregt, welche jedoch nicht vollständig durch die experimentelle Modalanalyse abgebildet werden konnten. Es wird vermutet, dass diese der Statorkäfigstruktur zugehörig sind, da es nur zu geringer Abstrahlung von Luftschall trotz starker struktureller Anregung in diesem Bereich kommt.

Im nächsten Schritt wird untersucht, wie die Übertragungseigenschaften der Lager sind, um zu überprüfen, ob die starke Strukturanregung so auf weitere Komponenten des Antriebsstrangs übertragen werden könnte, welche einen höheren Abstrahlgrad aufweisen.

Literatur

- [1] European Commission and Directorate-General for Research and Innovation and Directorate-General for Mobility and Transport: Flightpath 2050 – Europe’s vision for aviation – Maintaining global leadership and serving society’s needs, 2011. DOI: 10.2777/50266
- [2] European Commission: Indicating the Way Forward for Sustainable European Aviation. 14 January 2025. URL: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/indicating-way-forward-sustainable-european-aviation-2025-01-14_de (Zugriff: 19.02.2026)
- [3] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): Die Zukunft fliegt elektrisch. URL: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/klimavertraegliches-fliegen/die-zukunft-fliegt-elektrisch> (Zugriff: 19.02.2026)
- [4] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: 6207-2Z Rillenkugellager – Produktinformation, 2025. URL: <https://medias.schaeffler.de/de/produkt/rotary/waelz--und-gleitlager/kugellager/rillenkugellager/6207-2z/p/350981>, (Zugriff: 20.01.2026)
- [5] Irvine, T.: An Introduction to Frequency Response Functions., Vibrationdata, 2000.
- [6] Bilošová, A.: Modal Testing (Skript). VŠB – Technical University of Ostrava, 2011.
- [7] Weber-Karpinski, L.: Körperschallinduzierende Komponenten eines elektrifizierten Luftfahrtantriebes, Hochschule Mittweida, 2026.
- [8] Billauer, E.: peakdet: Peak detection using MATLAB (non-derivative local extremum, maximum, minimum), 2009. URL: <https://billauer.co.il/blog/2009/01/peakdet-matlab-octave/> (Zugriff: 10.11.2025)
- [9] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3832: Körperschallmessungen zur Zustandsbeurteilung von Wälzlager in Maschinen und Anlagen (Techn. Ber.), 2013.
- [10] Sentpali, S.: Grundlagen der Technischen Akustik (Skript). Hochschule München – University of Applied Sciences, o. J.
- [11] Kotter, P.; Köpf, C.; Berkemer, J.; Zirn, O.; Wegener, K.: Acoustic characterization of electrical motors based on magnetomechanical and drive-system issues. 18. Internationales Stuttgarter Symposium – Automobil- und Motorentechnik, 2018.