

Untersuchung der Schallentstehung und -abstrahlung elektrischer Maschinen für neuartige elektrifizierte Luftfahrtantriebe

Sebastian Hakansson¹, Thomas F. Geyer²

¹ *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: sebastian.hakansson@dlr.de*

² *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@dlr.de*

Einleitung

Die Luftfahrt ist für bis zu 3 % aller Treibhausgas-Emissionen verantwortlich und trägt somit zur globalen Erwärmung bei. Die Europäische Union hat sich daher in [1] das Ziel gesetzt, bis 2050 die Emission in der Luftfahrt deutlich zu reduzieren. Dazu werden neuartige Flugzeugkonzepte mit elektrifizierten Flugantrieben untersucht. Teil dieser Antriebssysteme werden elektrische Maschinen sein, die zum Beispiel im motorischen Betrieb den Propulsor antreiben.

Zur Realisierung jener geplanten Konzepte müssen die zum Einsatz kommenden elektrischen Maschinen hohe Leistung, mitunter im MW Bereich, bei idealerweise reduziertem Gewicht bereitstellen, also eine hohe Leistungsdichte aufweisen. Eine Erhöhung der Leistung kann dabei an eine stärkere Ausnutzung der aktiven Teile der Maschine gekoppelt sein, wodurch größere Kräfte auf die Struktur wirken. Diese kann dadurch leichter verformt und somit Körperschall erzeugt werden. Bestrebungen hinsichtlich erhöhten Leichtbaues jener Maschinen senken die Steifigkeit der tragenden Strukturen zusätzlich, wodurch diese noch stärker verformt werden können. Das Ziel, elektrische Maschinen möglichst hoch performant auszulegen, kann damit schlussendlich einem entsprechend lärmarmen Design entgegenstehen.

Um die Schallabstrahlung elektrischer Maschinen im Kontext elektrifizierter Luftfahrtantriebe besser zu verstehen, wird eine elektrische Maschine ausgelegt und mittels FEM simuliert. Anschließend wird der entstehende Schall, hervorgerufen durch die Luftspaltkräfte zwischen Rotor und Stator, ermittelt. Ziel der Arbeit ist es, ein besseres Verständnis der Schallabstrahlung elektrischer Maschinen für neuartige Luftfahrtantriebe zu erlangen, um unter anderem frühzeitig im Designprozess Einfluss zu nehmen und gegebenenfalls Lärminderungsmaßnahmen zu etablieren.

In Frage kommende Motortopologien

Elektrische Maschinen müssen nach [2] eine Reihe an Anforderungen für den geplanten Einsatz in der Luftfahrt erfüllen, darunter hohe Zuverlässigkeit, geringes Gewicht, kompakte Größe, hohe Leistungsdichten von mehr als 10 kW/kg (unter Berücksichtigung passiver Massen wie Lager, Kühlung und Gehäuse) und eine hohe Effizienz von mehr als 95 %. Des Weiteren sind fortschrittliche Kühlkonzepte erforderlich, um beispielsweise Permanentmagnete vor dauerhafter Entmagnetisierung oder die Isolierung der Wicklungen zu schützen. Da-

her werden aktuell verschiedene Technologien und Materialien erforscht, die zur Entwicklung leistungsfähiger und effizienter elektrischer Maschinen eingesetzt werden können. Fortschritte in der Material- und Fertigungstechnologie sowie die Optimierung der Maschinenparameter können dazu beitragen, die Leistungsdichte elektrischer Maschinen zu erhöhen. Darüber hinaus ist die Integration elektrischer Maschinen in bestehende Flugzeugstrukturen und -systeme zu berücksichtigen.

Eine Übersicht relevanter Maschinentopologien für elektrifizierte Luftfahrtantriebe ist unter anderem in [2], [3] und [4] zu finden. Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PMSM), sowohl in Axial- als auch in Radialflussausführung, werden hierbei oft als sehr geeignet identifiziert. Daher wird in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf letztere gelegt. PMSM bieten eine hohe Leistungsdichte, hohe Effizienz und hohe Leistungsfaktoren. Sie erfordern jedoch spezielle und kostenintensive Seltenerd-Legierungen wie Samarium-Cobalt (SmCo) oder Neodym-Eisen-Bor (NdFeB). Diese liefern sehr starke Dauermagnetfelder, bergen jedoch die Gefahr von Entmagnetisierung bei Überschreitung von Temperaturgrenzwerten. Die Magnete können beispielsweise auf der Oberfläche des Rotors verbaut werden. Hierbei wird dann bei sehr hohen Umfangsgeschwindigkeiten unter Umständen ein Deckband erforderlich, um die Magnete auf dem Rotor zu fixieren. Vergrabene Anordnungen der Magnete innerhalb der Rotorlaminiierung, beispielsweise in V-Form, sind ebenfalls möglich und sorgen für eine kontrollierte Steuerung der magnetischen Flüsse. Auch die Verwendung von Halbach Arrays ist denkbar. Damit lassen sich höhere Flussdichten im Luftspalt erreichen, wodurch jener nach [4] unter Umständen wieder größer ausfallen könnte. Im Feldschwächungsbereich wird der Wirkungsgrad einer PMSM bei hohen Drehzahlen gegebenenfalls jedoch schlechter. Zudem müssen zusätzliche Maßnahmen zur Absicherung und Beherrschung von Fehlerfällen unternommen werden. Es sind sowohl verteilte als auch konzentrierte Wicklungen möglich, jeweils mit entsprechenden Vor- und Nachteilen. So ist bei Verwendung verteilter Wicklungen ein größerer Wickelkopf in Kauf zu nehmen, welcher nicht zur aktiven Drehmomenterzeugung beiträgt und somit die Leistungsdichte der Maschine reduziert. Zudem sind sie aufgrund möglicher gegenseitiger Kopplung der einzelnen Phasen aus elektromagnetischer Sicht fehleranfälliger. Konzentrierte Wicklungen können zu höheren Leistungsdichten führen, weisen jedoch eine erhöhte Drehmomentwelligkeit auf und sind darüber hinaus nach [5] noch nicht im höheren Lei-

stungsbereich etabliert. Im Rahmen von elektrifizierten Luftfahrtantrieben sind PMSM nach [2] sowohl zum Antrieb der Propulsoren als auch als Generator zur Wandlung mechanischer in elektrischer Energie geeignet.

Schallentstehung an einer elektrischen Maschine

In elektrischen Maschinen gibt es eine Vielzahl von Schallquellen, die einen Anteil an der Gesamtschallabstrahlung des elektrischen Antriebsstrangs haben werden. Der resultierende Lärm wird häufig durch Töne bei hohen Frequenzen erzeugt und kann damit, obwohl unter Umständen nur geringe Schalleistungspegel vorliegen, als besonders störend empfunden werden [6].

Folgende Beiträge zum Gesamtlärm werden häufig unterschieden:

- elektromagnetischer Lärm
- mechanischer Lärm
- kombinierter elektrischer und mechanischer Lärm
- aerodynamischer Lärm

Elektromagnetischer Lärm entsteht beispielsweise durch Rastmoment und Drehmomentwelligkeit, durch das Schalten der Leistungselektronik (*switching noise*) jedoch vorrangig durch die im Luftspalt der Maschine aufgrund des elektromagnetischen Feldes existierenden und an den Statorzähnen wirkenden Luftspaltkräfte. Mechanischer Lärm kann in Lagern oder durch Reibung entstehen, allerdings eher bei sehr niedrigen Frequenzen. Er ist daher oft vernachlässigbar [7]. Durch Exzentrizität in der Maschine kann sogenannter kombinierter elektrischer und mechanischer Lärm erzeugt werden. Exzentrizität kann sowohl auf mechanische als auch auf elektromagnetische Ursachen zurückzuführen sein. Die genannten Quellen erzeugen Vibrationen und somit Körperschall, welcher durch die Struktur als Luftschall abgestrahlt wird. Aerodynamischer Lärm entsteht unter anderem durch die Verwendung von Ventilatoren zur Selbstkühlung der Maschine. Er ist abhängig vom gewählten Kühlkonzept. Aufgrund der sehr hohen angestrebten Leistungsdichten werden Flüssigkühlungen verwendet, wodurch diese Quelle entfällt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf elektromagnetischem Lärm, welcher durch Luftspaltkräfte hervorgerufen wird.

Auslegung einer elektrischen Maschine

Für diese Arbeit wird eine dreiphasige Radialfluss PMSM mit auf der Oberfläche des Rotors verbauten Magneten ausgelegt. Sie dient der reinen Untersuchung der Schallabstrahlung durch Luftspaltkräfte. Die Maschine hat 24 Nuten und 16 Pole (24s16p) und soll einen Propeller antreiben, welcher auf eine Drehzahl von 2250 U/min ausgelegt ist. Hierbei ist die Verwendung eines Getriebes mit einer Übersetzung von 1:5 vorgesehen, so dass die Maschine ihre Spitzenleistung von etwa 700 kW bei einer Eckdrehzahl von 11250 U/min liefert. Die Magnete werden durch eine Hülse aus kohlenstoffverstärktem Kunst-

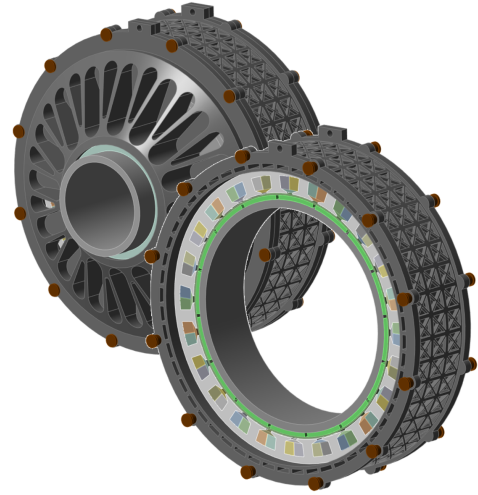


Abbildung 1: Ausgelegte Radialfluss PMSM (24s16p) mit konzentrierter Wicklung. Wickelkopf nicht dargestellt.

stoff fixiert und die Wicklung ist in konzentrierter Bauart ausgelegt. Für die Rotor- und Statorlaminiierung wird die Kobalt-Eisen-Legierung Vacoflux 48 aufgrund der hohen Sättigungsgrenze verwendet. Bei den Magneten handelt es sich um N42UH Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnete. Die Maschine inklusive Gehäuse ist in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Auslegung der Maschine wurde ein entsprechendes *Sizing-Tool* in Python programmiert und basierend auf den Ergebnissen ein 2D-Modell der Maschine mit der Software MotorCAD 2024 der Firma Ansys erstellt. Das Drehmoment M wird dabei unter Verwendung des D^2L -Ansatzes mittels

$$M = \frac{k_w B_{g1} A_s \cos \varphi \pi D_g^2 L_{act}}{\sqrt{2} \cdot 2} \quad (1)$$

bestimmt. Hierbei ist k_w der Wicklungsfaktor, B_{g1} der Peakwert der fundamentalen Verteilung der Flussdichte

Tabelle 1: Übersicht der relevanten Maschinenparameter.

Parameter	Symbol	Wert
Stator Außend.	D_{oD}	408 mm
Stator Innend.	D_g	341 mm
Aktive Länge	L_{act}	82 mm
Nuten / Pole	–	24 / 16
Luftspalt	d_g	1,4 mm
Anzahl Phasen	–	3
Spitzenleistung	P_{peak}	700 kW
Max. Drehmoment	M_{peak}	600 Nm
Eckdrehzahl	n_{base}	11250 U/min
Max. Drehzahl	n_{max}	15000 U/min
Schubsp. im Luftspalt	σ_t	40 kPa
Elektrische Frequenz	$f_{e,max}$	2000 Hz
Effizienz	η	95 %
Stromdichte	J_{rms}	10 A/mm ²

im Luftspalt, A_s die lineare Stromdichte, φ der Leistungsfaktor, D_g der Bohrungsdurchmesser und L_{act} die aktive Länge der Rotor- und Statorlaminiierung. Anschließend wird die elektromagnetische Berechnung für eine Reihe verschiedener Drehzahlen durchgeführt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Parameter der Maschine.

Die Luftspaltkräfte erhält man durch Integration des Maxwell'schen Spannungstensors über der Zylinderfläche des Luftspaltes. Hierfür müssen zuvor die Flussdichten in radialer und tangentialer Richtung ermittelt werden. In Abbildung 2 sind die beiden Komponenten der im Luftspalt wirkenden Kraft über dem mechanischen Winkel von 0 bis 180° für eine Drehzahl von 11250 U/min gezeigt.

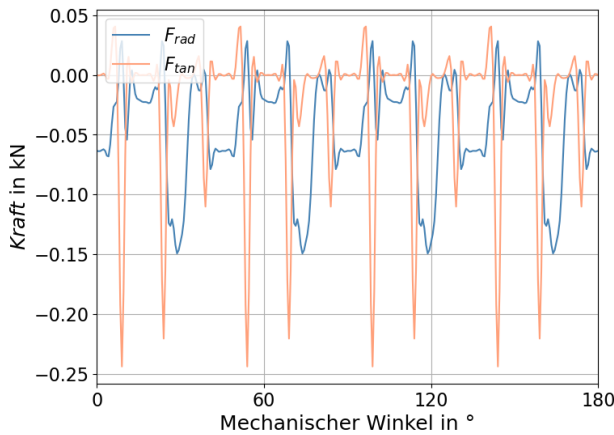


Abbildung 2: Luftspaltkräfte (radiale und tangentiale Komponente) aufgetragen über dem mechanischen Winkel.

Ergebnisse der Frequenzganganalyse

Die zuvor ermittelten Radial- und Tangentialkräfte werden anschließend auf die einzelnen Statorzähne aufgetragen. Sie wurden hierfür über den Umfang des jeweiligen Zahns gemittelt und greifen an einem repräsentativen Knotenpunkt an (*lumped-force* Methode). Die Kräfte haben dabei unterschiedliche Amplituden bei diskreten Frequenzen.

Die im Luftspalt umlaufende Kraftwelle kann mittels 2D Fourier Transformation zerlegt werden (*wavenumber decomposition*). Die sich daraus ergebenden Wellenformen mit den Wellenzahlen r ähneln den Eigenschwingformen m des Stators, welche typischerweise in der Form (m, n) angegeben werden. Hierbei ist m die Hälfte der Anzahl der Knotenpunkte einer sich deformierenden Ringstruktur in Umfangsrichtung, während n die Hälfte der Anzahl an Knotenpunkte in Axialrichtung angibt. Die Wellen können dabei im Luftspalt mit oder entgegen der Rotordrehrichtung laufen und regen die Struktur zum Schwingen an. Sehr hohe Vibrations- und somit Lärmpegel sind genau dann zu erwarten, wenn es zu einer Übereinstimmung der Wellenzahl r der umlaufenden Kraftwelle und der Eigenschwingform m der Struktur bei gleichzeitiger Übereinstimmung der Erregerfrequenz f_r mit der Eigenfrequenz $f_{m,n}$ kommt. In diesem Fall

kommt es zur Resonanz. Bei den Erregerfrequenzen handelt es sich um Vielfache der mechanischen Frequenz; sie werden als „HX“ angegeben. H16 bezeichnet damit eine Frequenz, die dem 16-fachen der mechanischen Frequenz entspricht. Die Wellenzahl der ersten Wellenform der Anregung lässt sich zu

$$r = GCD(N_S/m, 2p) \quad (2)$$

ermitteln, wobei N_S die Anzahl der Statornuten, p die Anzahl der Polpaare und m die Anzahl der Phasen ist. Für die hier untersuchte Maschine ergibt sich $r = 8$. Diese Wellenzahl tritt bei H16 aber auch bei höheren Harmonischen wie H64 und H112 auf. Der dazwischen liegende Frequenzabstand lässt sich über

$$\Delta f = LCM(N_S, 2p) f_{mech} \quad (3)$$

bestimmen, wobei f_{mech} hier die mechanische Frequenz ist. Darüber hinaus existiert eine Welle mit der Wellenzahl $r = 0$, die sogenannte „atmende Mode“, bei H48 und deren Vielfachen. Weitere Wellenzahlen existieren, werden hier aber vorerst nicht weiter betrachtet.

Zur Lösung der Frequenzganganalyse wird die Methode der modalen Superposition angewendet, bei der die Vibrations- und Deformations-Antworten jeder Eigenschwingform der Struktur übereinandergelegt beziehungsweise aufsummiert werden. Als Ergebnis erhält man die *Equivalent Radiated Power* (ERP) in Abhängigkeit der Frequenz. Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Berechnung der Schalleistung, welche auf der ebenen Wellenausbreitung basiert. Statt der Schallschnelle wird hierbei die Normalenschnelle auf der Oberfläche des Stators oder des Gehäuses genutzt. Es gilt:

$$ERP = \rho_L c_L \int_A |\hat{v}_{S,n}|^2 dA. \quad (4)$$

Hierbei ist ρ_L die Dichte von Luft, c_L die Schallgeschwindigkeit und $\hat{v}_{S,n}$ die Normalenschnelle auf der Oberfläche der abstrahlenden Struktur, in diesem Fall also dem Stator. Für die hier untersuchte Maschine wurde die Frequenzganganalyse für eine Reihe an Drehzahlen zwischen 225 bis 15000 U/min durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich in einem Wasserfalldiagramm auftragen. Hier können zudem die Eigenfrequenzen $f_{m,n}$ und -schwingformen m der Struktur mit dargestellt und hervorgehoben werden. Für diese Arbeit wurden nur Eigenformen in Umfangsrichtung betrachtet, es gilt also $n = 0$.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Frequenzganganalyse für die untersuchten Drehzahlen im Bereich von 0 bis 14 kHz gezeigt. Hierbei werden die ermittelten ERP-Pegel über der Drehzahl und der Frequenz aufgetragen. Die gestrichelten senkrechten Linien markieren die Eigenfrequenzen $f_{m,0}$ des Stators. Die dazugehörige Modenzahl m ist darunter angegeben.

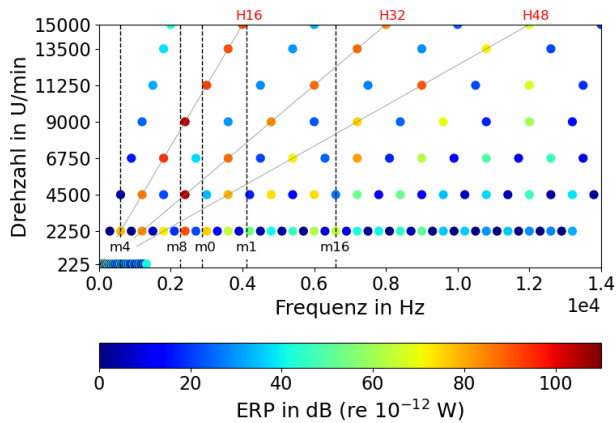


Abbildung 3: ERP Wasserfalldiagramm der untersuchten Maschine. Die Zeitharmonischen H16, H32 und H48 sind markiert. Gestrichelte Linien zeigen die Eigenfrequenz des Stators an.

Hohe Schalleistungspegel lassen sich entlang der Drehzahlharmonischen H16, H32 und H48 ausmachen. Bei der H16 läuft im Luftspalt die dominierende Welle mit der Modenzahl $r = 8$ um. Sie trifft beispielsweise bei einer Drehzahl der Maschine von 9000 U/min die Eigenschwingform $m = 8$ des Stators bei der zugehörigen Eigenfrequenz und sorgt hiermit für einen ERP-Pegel von 104,5 dB. Die Welle $r = 8$ läuft ebenfalls mit der Zeitharmonischen H32, allerdings in entgegengesetzter Richtung, durch den Luftspalt. Somit wird die Statormode $m = 8$ auch bei einer Drehzahl von 4500 U/min angeregt und höhere Pegel erreicht.

Anschließend können die Ergebnisse der dominierenden Drehzahlharmonischen extrahiert und gesondert aufgetragen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 gezeigt. H16 hat beispielsweise ein Maximum bei einer Drehzahl von 9000 U/min. H32 erreicht dieses bei einer Drehzahl von 4500 U/min und H48, die atmende Mode, bei 11250 U/min. Durch aufsummieren der einzelnen Beiträge erhält man anschließend die ERP Gesamtschalleistung als Pegel.

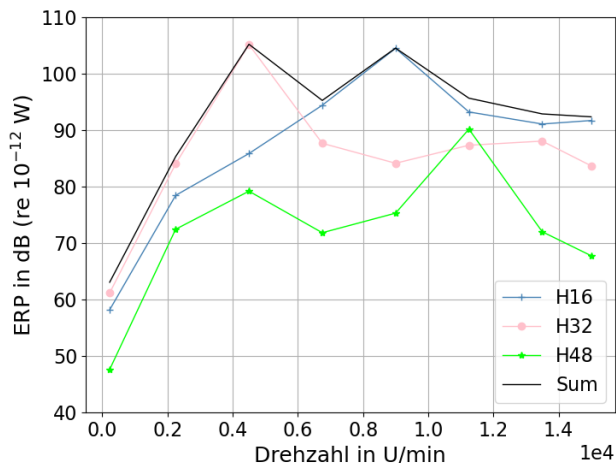


Abbildung 4: Ergebnisse der drei Drehzahlharmonischen H16, H32 und H48 über der Drehzahl.

Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die sich ergebenden Schalleistungspegel einer Maschine für zukünftige elektrifizierte Luftfahrtantriebe bei verschiedenen Drehzahlen mittels Frequenzganganalyse ermittelt und aufgetragen. Dazu wurde eine Radialfluss PMSM ausgelegt und die Luftspaltkräfte bestimmt. Mittels Wellenzerlegung konnten die dominierenden Wellenzahlen im Luftspalt und mittels Modalanalyse der Eigenfrequenzen und -formen des Stators bestimmt werden. Die resultierende Schalleistung wurde auf Basis der Drehzahlharmonischen H16, H32 und H48 ermittelt.

Als abstrahlende Struktur wurde hier der Stator verwendet. Für zukünftige Arbeiten ist angedacht, zusätzlich das Gehäuse zu berücksichtigen. Zudem soll die Maschine in eine entsprechende Aufhängung integriert werden, was aufgrund erhöhter Masse und geänderter Steifigkeit ebenfalls zu einer Beeinflussung der abgestrahlten Schalleistung führen wird. Zudem sollen weitere Maschinentopologien untersucht, ausgelegt und miteinander verglichen werden.

Literatur

- [1] European Commission (2011): Flightpath 2050 : Europe's vision for aviation : maintaining global leadership and serving society's needs. Publications Office of the European Union Luxembourg.
- [2] Sayed, E., Abdalmagid, M., Pietrini, G., Sa'adeh, N. M., Callegaro, A. D., Goldstein, C., Emadi, A. (2021). Review of electric machines in more-/hybrid-/turbo-electric aircraft. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 7(4), 2976-3005.
- [3] Benzaquen, J., He, J., Mirafzal, B. (2021). Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 5(3), 177-193.
- [4] Zhang, X., Bowman, C. L., O'Connell, T. C., Haran, K. S. (2018). Large electric machines for aircraft electric propulsion. IET Electric Power Applications, 12(6), 767-779.
- [5] Anderson, A. D., Renner, N. J., Wang, Y., Agrawal, S., Sirimanna, S., Lee, D., Banerjee, A., Haran, K., Starr, M. J., Felder, J. L. (2018). System weight comparison of electric machine topologies for electric aircraft propulsion. In 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS) (pp. 1-16). IEEE.
- [6] Król, E., Maciażek, M. (2023). Identification and analysis of noise sources of permanent magnet synchronous traction motor with interior permanent magnet. Energies, 16(16), 6018.
- [7] Bösing, M. (2014). Acoustic modeling of electrical drives: noise and vibration synthesis based on force response superposition (Doctoral dissertation, Dissertation, Techn. Hochsch., 2013).