

Schallvorhersagemodelle für elektrische Motoren zukünftiger Luftfahrtantriebe

Philipp Schulze, Thomas F. Geyer

DLR-Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: philipp.schulze@dlr.de

Einleitung

Steigende Anforderungen an den Schadstoffausstoß in der Luftfahrt erfordern eine Weiter- und Neuentwicklung von Antriebskonzepten zukünftiger Luftfahrtantriebe [1]. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs als rein elektrisch oder als Hybridmodell ist eine wichtige Schlüsseltechnologie. Sie ermöglicht und erfordert gleichzeitig die bestehenden Konzepte neu zu entwickeln. Eine Kernkomponente bei elektrischen Antrieben ist der Elektromotor, der als Energiewandler die aus einer Quelle bereitgestellte elektrische Energie in mechanische Leistung wandelt. Dabei zeigen aktuelle Studien, dass die in Automobilen angewandten Elektromotoren eine Leistungsdichte von 3 - 5 kg/kW aufweisen [2]. Damit elektrifizierte Luftfahrtkonzepte umgesetzt werden können, prognostizieren erste Studien, dass Elektromotoren mit einer Leistungsdichte von mindestens 10 kW/kg erforderlich sind. Mit diesen Vorhersagen sind Kleinst- bis Kleinflugzeuge für mittlere Distanzen bis 200 km realisierbar.

Aufgrund der geringeren Masse und der höheren Leistung ergeben sich neue akustische Herausforderungen. Diese bestehen darin, dass aufgrund der geringeren Masse eine geringere Dämpfung in der Struktur des Motors auftritt, was zu einer erhöhten Schallabstrahlung führt. Als wichtiger Faktor für die Akzeptanz neuer Antriebskonzepte in der Luftfahrt wird die Schallabstrahlung eine wesentliche Rolle einnehmen [3]. Neben der Massen- und Leistungsoptimierung zukünftiger Luftfahrtantriebe sind deshalb auch die strukturellen und akustischen Eigenschaften neuer Motoren Gegenstand aktueller und zukünftiger Untersuchungen.

Für eine Abschätzung der Schallabstrahlung der Komponenten elektrifizierter Luftfahrtantriebe in einer frühen Entwicklungsphase eignen sich analytische Modelle. Mit ihnen können im Vergleich zu numerischen Methoden große Bereiche eines Parameters in kurzer Zeit untersucht werden. In dieser Arbeit werden einige existierende analytische Modelle zur Berechnung der Schallabstrahlung elektrischer Maschinen vorgestellt. An einem ausgewählten Modell werden Parametereinflüsse und grundlegende Zusammenhänge untersucht und beschrieben.

Berechnungsmodelle

Die vorliegende Untersuchung basiert initial auf vier unterschiedlichen Modellen. Das erste ist ein empirisches Berechnungsmodell [4]. In diesem werden zwei Motorenarten unterschieden, (1) tropfwassergeschützte und (2) vollständig eingehauste, lüftergekühlte Motoren. Die Eingangsparameter und die Berechnung sind für beide Motorentypen gleich, lediglich Proportionalitätsfaktoren für die Eingangsparameter sind unterschiedlich. Bei den Berechnungen wird die Ursache der Schallentstehung nicht

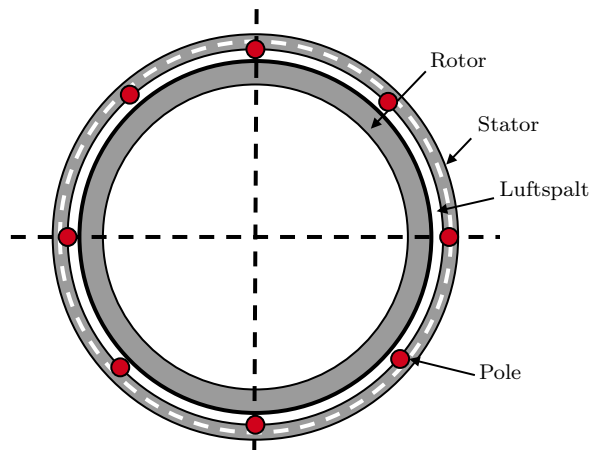


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Segmented Solid Beam Theorie [5]

explizit berücksichtigt. Für die Abschätzung der abgestrahlten Schalleistung L_W sind die Parameter Maschinenleistung P , die Nennzahl n und die einhüllende Fläche des Motors in einem Meter Entfernung S erforderlich. Die Schalleistung für einen vollständig eingehausten, lüftergekühlten Motor mit einer Leistung größer als 40 kW wird dann beispielsweise mit der Formel

$$L_w = 27 + 10 \log_{10} P + 15 \log_{10} n + 10 \log_{10} S \quad (1)$$

berechnet.

Das zweite Modell wurde in der Arbeit von Huff et al. [5] vorgestellt. Das Modell basiert auf dem Prinzip, dass der Stator als ein an den Polen segmentierter Ring verstanden wird (sogenannter "segmented solid beam"). Die Pole sind in dieser Modellvorstellung als Krafteinleitungspunkte konzipiert. An diesen Knoten erfährt der freigelagerte Ring aufgrund der magnetischen Kräfte eine Anregung. Aus dieser Annahme wird ersichtlich, dass die Ursache der Schallentstehung in der elektrischen Maschine in diesem Modell bereits berücksichtigt wird. Es wird die Annahme getroffen, dass der durch die magnetischen Kräfte verursachte Schall den Gesamtschall der elektrischen Maschine wesentlich beeinflusst.

In Abbildung 1 ist die Annahme des Modells vereinfacht dargestellt. Die Berechnung der Schalleistung und auch der dafür notwendigen Schwingungsamplitude der Außenfläche des Elektromotors basiert auf vereinfachenden Annahmen. Eine entscheidende Vereinfachung ist die Vernachlässigung der Schwingungsmoden der Motorenstruktur hinsichtlich der Schallabstrahlung.

Das dritte Verfahren zur Abschätzung der Schalleistung beruht auf der Arbeit von Islam und Husain [6]. In dieser

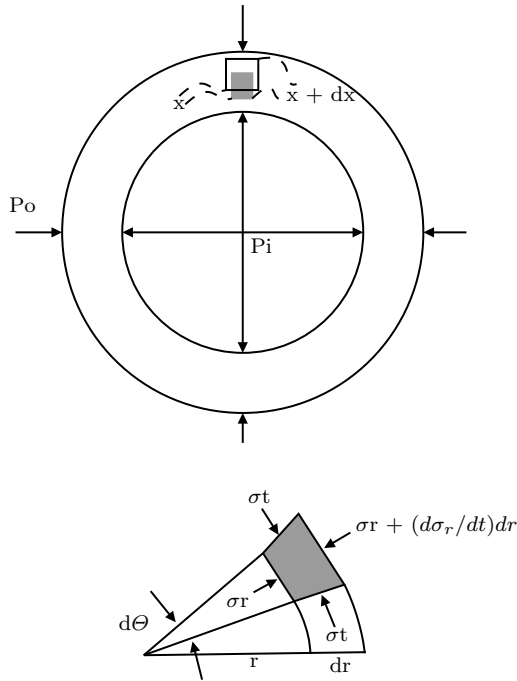


Abbildung 2: Darstellung der analytischen FEM Methode [6]

erfolgt die strukturdynamische Untersuchung und Analyse mittels einer analytischen finite Elemente Methode. Das prinzipielle Vorgehen ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei werden die aufgrund der magnetischen Kräfte wirkenden Spannungen auf kleinste Elemente der Struktur aufgetragen und mit Hilfe numerischer Verfahren aufgelöst. Ziel der Berechnung ist dabei, die Auslenkung und Spannungen normal zur Oberfläche zu ermitteln. Das Modell berechnet dann auf Grundlage der Amplitude der zur Schwingung angeregten Oberfläche die Eigenfrequenzen der Struktur. Diese haben wiederum einen Einfluss auf die Schallabstrahlung. Die Berechnung der abgestrahlten Leistung basiert auf den Arbeiten von Yang [7] und Timar [8]. Nicht berücksichtigt wird die Abstrahleffizienz der untersuchten Struktur.

Das vierte hier vorgestellte Modell ist eine Berechnung nach Gieras [9]. Es enthält die Berechnung des abgestrahlten Schalls von der Strukturanalyse bis zur Schallleistung und die Einflüsse und das Zusammenwirken unterschiedlicher Parameter sind aufgeführt. Die elektrische Maschine wird dabei wie in der Abbildung 3 gezeigt vereinfacht. Der Stator ist die zentrale Quelle des abgestrahlten Schalls. Der Unterschied zum zweiten Modell [5] ist die Art der Krafteinleitung. Diese wird als eine auf den Umfang verteilte flächige Kraft, in Form eines magnetischen Drucks je Flächeneinheit, integriert. Die Berechnung des magnetischen Drucks erfolgt nach den Ausführungen in [10] und ist nicht Gegenstand der hier vorliegenden Untersuchung. Die von der Außenhülle eines Elektromotors abgestrahlte Schallleistung berechnet sich entsprechend der Ausführungen in [9] zu

$$\Pi_m = \varrho_0 c_0 \left(\frac{\omega A_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \sigma_m S_f, \quad (2)$$

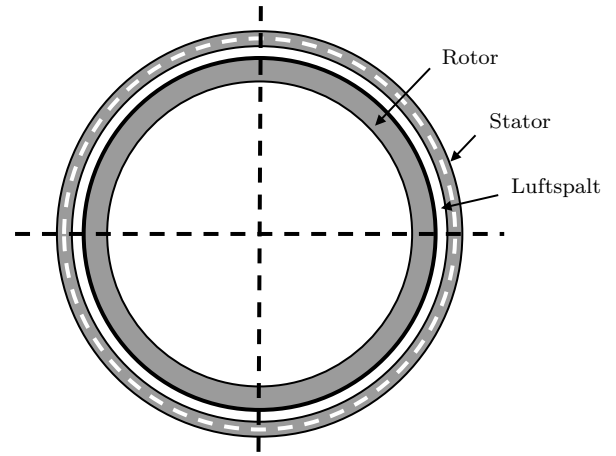


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Zylinderhüllen-Methode [9]

wobei S_f die Oberfläche der Motoreußenhülle ist, A_m ist die Amplitude der radialen Schwingung der Außenfläche, σ_m ist die modale Abstrahleffektivität des Körpers¹ und ω die Winkelgeschwindigkeit der Kraftharmonischen r der elektromagnetischen Kraftwelle. Die Schwingungsamplitude des Stators berechnet sich in Abhängigkeit der Moden den Kraftanregung zu

$$A_m = \frac{F_m/M}{\sqrt{(\omega_m^2 - \omega_r^2)^2 + 4 \cdot \zeta_m^2 \omega_m^2 \omega_r^2}}, \quad (3)$$

mit der Masse der Zylinderhülle M , der Winkelgeschwindigkeit ω_m der Eigenfrequenz der Mode m , der Winkelgeschwindigkeit ω_r der Kraftkomponente der Ordnung r , dem modalen Dämpfungsverhältnis ζ_m und der Amplitude der magnetischen Kraft

$$F_m = \pi D_{1in} L_i P_{mr}. \quad (4)$$

Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die grundlegenden Zusammenhänge der Parameter der analytischen Berechnungsmodelle auf die Schallabstrahlung von Elektromotoren für zukünftige Luftfahrtantriebe zu analysieren. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Einfluss der Leistungsdichte der untersuchten Elektromotoren, denn diese wird einen entscheidenden Unterschied zu aktuell technologisch umsetzbaren Motoren bilden. Dabei beschränkt sich die vorliegende Betrachtung auf das vorgestellte Modell vier [9]. Aus Gleichung (2) folgt der Zusammenhang zwischen der Schallleistung und der Schwingungsamplitude. Die Naturkonstanten Dichte und Schallgeschwindigkeit sowie die Oberfläche der Motoreußenhülle werden hier als konstant angenommen und können als Proportionalitätsfaktor h zusammengefasst werden. Mit weiteren Zusammenfassungen und Vereinfachungen ergibt sich damit die vereinfachte Formulie-

¹Es handelt sich dabei nicht um den Abstrahlgrad.

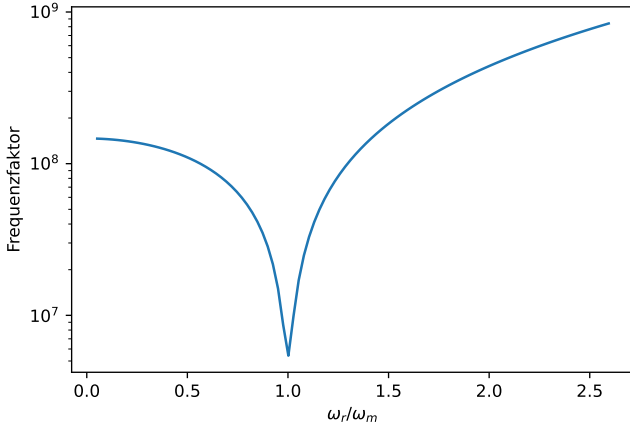


Abbildung 4: Abhängigkeit des Frequenzfaktors vom Verhältnis der Frequenzen der anregenden Kraft und der Eigenfrequenz

rung

$$\Pi_m = \frac{h}{2} \omega^2 A_m^2 \sigma_m. \quad (5)$$

Mit dieser sind Aussagen zu grundlegenden Zusammenhängen und deren Auswirkungen auf die abgestrahlte Schalleistung möglich. Eine Erkenntnis ist die quadratische Abhängigkeit der Schalleistung Π_m von der Schwingungsamplitude A_m und der Winkelgeschwindigkeit ω der umlaufenden Kraftanregungswelle. Des Weiteren ist die Schalleistung von Elektromotoren linear abhängig von der modalen Abstrahleffizienz des untersuchten Körpers.

Die Berechnung von A_m besteht entsprechend Gleichung (3) aus zwei Teilen. Der erste ist eine äquivalente Leistungsdichte im Zähler, als Quotient aus Kraft und Masse. Der zweite Teil ist ein Frequenzfaktor im Nenner. Wird der Frequenzfaktor klein bei gleichbleibender Leistungsdichte, so steigt die Amplitude der Oberflächenschwingung und damit gleichzeitig die Schalleistung. Der Faktor wird am kleinsten, wenn die Eigenfrequenz der Struktur ω_m gleich der Frequenz der Kraftanregung ω_r ist. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4 dargestellt.

Daraus erschließt sich, dass bei Frequenzen nahe der Eigenfrequenzen die größten Schwingungsamplituden und Schalleistungen des Motors zu erwarten sind. Dies ist in Abbildung 5a dargestellt. Das Diagramm zeigt den Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Frequenz der Kraftanregung über der äquivalenten Leistungsdichte für einen exemplarischen Motor, dessen Spezifikationen in Tabelle 1 gegeben sind. Es ist erkennbar, dass bei der halben Eigenfrequenz der Mode $m = 8$ die Schalleistung maximal wird. Abbildung 5a zeigt grundsätzlich, dass bei steigender Leistungsdichte der abgestrahlte Schall zunimmt. Das ist nicht unerwartet, kann aber für zukünftige Motoren hoher Leistungsdichte eine Herausforderung sein. Die Daten des zur Berechnung verwendeten Motors entsprechen keiner realen Maschine und

Tabelle 1: Motorenspezifikationen für die Untersuchung

Parameter	Wert	Einheit
Leistung	750	kW
Drehzahl	11250	rpm
Polzahl	16	-
Außendurchmesser	0.408	m
Länge	0.082	m
Masse	50 - 100	kg

dienen lediglich der Analyse grundlegender mathematischer Zusammenhänge. Für die Parameterspanne der Leistungsdichte wurde die Leistung der Maschine bei 750 kW festgehalten und die Masse zwischen 50 und 100 kg variiert. Die damit verbundenen Verschiebungen der Eigenfrequenzen sind hier noch nicht berücksichtigt.

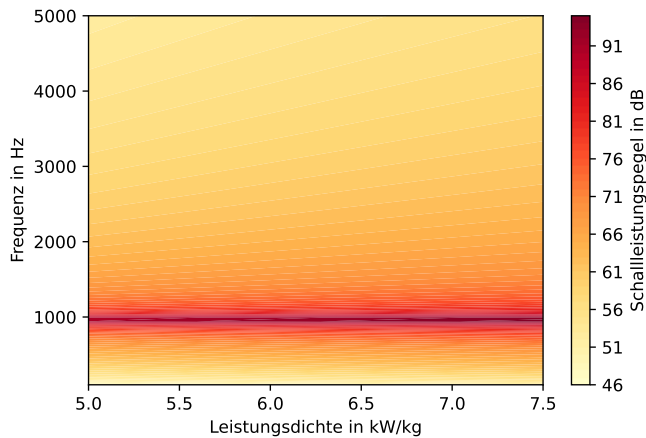
Der zweite in dieser Arbeit untersuchte Zusammenhang ist der von Schalleistung und Abstrahleffizienz σ_m . Das Ergebnis ist in Abbildung 5b dargestellt. Weiterhin steigt mit zunehmender Leistungsdichte die abgestrahlte Schalleistung, entsprechend des linearen Zusammenhangs. Darüber hinaus steigt die Schalleistung auch mit wachsender Abstrahleffizienz. Diese ist im verwendeten Modell vereinfacht als die eines zylindrischer Strahlers ohne Endplatten berücksichtigt. Abhängig von der Struktur und den Designparametern des zu untersuchenden Motors ist die Abstrahleffizienz ein wichtiger Faktor.

Diskussion und Ausblick

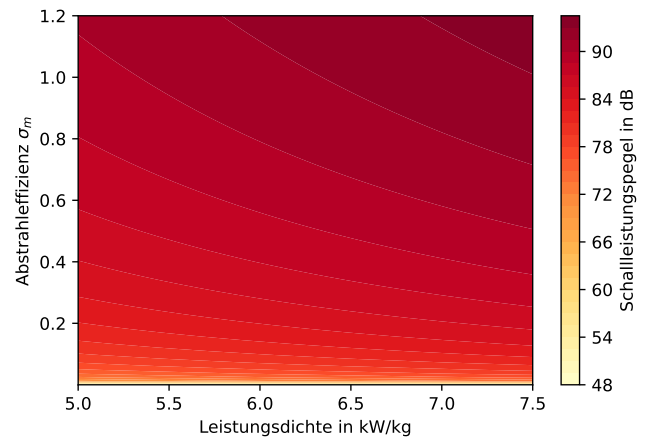
In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene analytische Berechnungsmodelle für die Abschätzung der Schalleistung elektrischer Maschinen hinsichtlich grundlegender mathematischer und parametrischer Zusammenhänge untersucht. In diesem speziellen Fall liegt das Hauptaugenmerk auf der Darstellung des Einflusses der Parameter (1) Leistungsdichte, (2) Frequenz der Kraftanregung und (3) Abstrahleffizienz.

Die Leistungsdichte als entscheidender Faktor für Motoren zukünftiger Luftfahrtantriebe und den sich daraus ergebenden Motorenspezifikationen beeinflusst die Systemstruktur wesentlich. Höhere Leistungen und damit verbundene steigende Amplituden der magnetischen Kraftanregung bei geringen Massen verursachen einen Anstieg der Schalleistungspegel von Elektromotoren.

Ein weiterer Kernpunkt der Berechnung und Abschätzung der Schalleistung von zukünftigen Elektromotoren für die Luftfahrt ist die strukturdynamische Analyse. Daraus ergeben sich wichtige Themen für die zukünftige Erforschung der akustischen Emissionen, wie zum Beispiel die Untersuchung der Schallabstrahlungsmechanismen, der zusätzliche Effekt der Installation des Motors zum Beispiel in einer Triebwerksgondel oder der Einfluss komplett neuer Motortechnologien. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die hier vorgestellten Modelle für Motoren mit Leistungsdichten kleiner als 5 kW/kg ausgelegt sind. Effekte geringer Massen bei gleichzeitig hohen Leistungen sind nicht



(a) Leistungsdichte und Frequenz der anregenden Kraft



(b) Leistungsdichte und Abstrahlffizienz

Abbildung 5: Grundlegende Abhängigkeiten der Schalleistungspegel nach dem analytischen Modell von Gieras [9]

berücksichtigt und bringen neue Herausforderungen. Weiterführende Ausführungen zu den hier diskutierten Zusammenhängen sind in [11] enthalten.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des DLR-internen Projekt *VIRLWINT – Virtueller akustischer Zwilling verteilter Antriebe* durchgeführt.

Literatur

- [1] Europäische Kommission: Flightplan 2050 : Europe’s vision for aviation; maintaining global leadership and serving society’s needs; report of the high-level group on aviation research. Luxembourg : Publ. Off. of the Europ. Union, (2011)
- [2] Bolam, R. C., Vagapov, Y., Anuchin, A.: A Review of Electrical Motor Topologies for Aircraft Propulsion. In: 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) : IEEE, (2020)
- [3] Gillis, D. et al.: Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021. Cham : Springer International Publishing, (2021)
- [4] Crocker, Malcolm J. (Hrsg.): Handbook of noise and vibration control. Hoboken, NJ : Wiley, (2007)
- [5] Huff, D. L. , Henderson, B. S. , Envia, E.: Motor Noise for Electric Powered Aircraft. In: 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston, Virginia : American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2016)
- [6] Islam, R. , Husain, I.: Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors. In: IEEE Transactions on Industry Applications 46 (2010)
- [7] Yang, S. J.: Low-noise electrical motors. Oxford, (1981)
- [8] P. L. Timar, Noise and Vibration of Electrical Machines. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, (2004)

- [9] Gieras, J. F. , Wang, C. , Lai, Joseph C.: Noise of polyphase electric motors. Boca Raton, Fla. : CRC/Taylor and Francis, (2006)
- [10] Zarko, D., Ban, D., Lipo, T. A.: Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance. In: IEEE Transactions on Magnetics 42 (2006)
- [11] Schulze, P., Geyer, T. F.: Initial Comparison of analytical methods for noise prediction of future electric aircraft powertrains, *Internoise* (2024) (accepted)