

# Lärmabschätzung einer elektrischen Maschine für einen parallel-hybriden Antriebsstrang eines Helikopters

Sebastian Hakansson<sup>1</sup>, Erik W. Schneehagen<sup>2</sup>, Thomas F. Geyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 03046 Cottbus, Deutschland, sebastian.hakansson@dlr.de

<sup>2</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 03046 Cottbus, Deutschland, erik.schneehagen@dlr.de

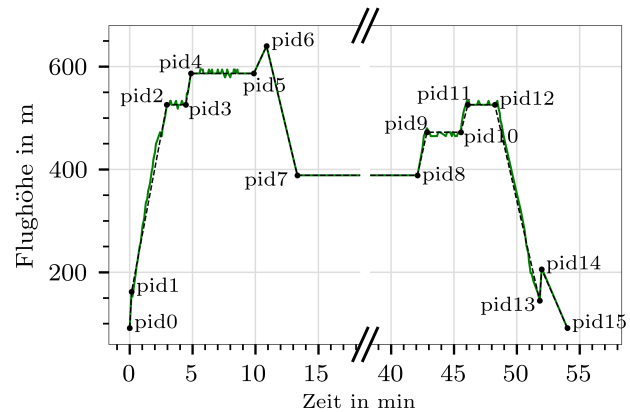
<sup>3</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 03046 Cottbus, Deutschland, thomas.geyer@dlr.de

## Einleitung

Die Elektrifizierung von Antriebssystemen hat sich zu einem zentralen Aspekt im Luftfahrtsektor entwickelt. Ziel ist es, schadstoffhaltige Abgasemissionen zu reduzieren, die Lärmbelastung zu verringern und gleichzeitig neue Mobilitätskonzepte zu erschließen. Diese Entwicklung lässt sich sowohl bei Starr- als auch bei Drehflüglern beobachten. Ein Beispiel hierfür sind die zahlreichen eVTOL-Konzepte, die im Kontext der urbanen Mobilität entwickelt werden. Auch die Elektrifizierung der Antriebsstränge größerer Hubschrauber rückt zunehmend in den Fokus. Die meisten Konzeptstudien zur Elektrifizierung von Luftfahrtantrieben konzentrieren sich auf die zu entwickelnden Topologien und Architekturen, die daraus resultierende Leistungs- und Effizienzcharakteristik sowie mögliche Missionsprofile. Weniger Beachtung findet dabei, dass elektrische Maschinen selbst Lärm und Vibrationen erzeugen. Mit fortschreitender Elektrifizierung gewinnen diese akustischen Emissionen an Bedeutung und müssen bereits früh im Entwurfsprozess berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde für einen leichten, zweimotorigen Mehrzweck-Hubschrauber mit Hilfe eines Open-Source-Vorentwurfs-Tools eine elektrische Maschine entworfen und anschließend ihre abgestrahlte Schalleistung berechnet. Dabei wird für jede der beiden im konventionellen Antrieb des Hubschraubers vorhandenen Gasturbinen eine zusätzliche elektrische Maschine vorgesehen, um das Triebwerk in definierten Flugphasen zu unterstützen [1]. Unter Verwendung einer Modalanalyse zur Bestimmung von Eigenfrequenzen/-formen wurde die äquivalent abgestrahlte Schalleistung auf Basis der im Luftspalt der elektrischen Maschine wirkenden Kräfte ermittelt. In einem weiteren Schritt wurde die abgestrahlte Schalleistung, Schalldruckpegel sowie die Richtcharakteristik der Maschine unter Verwendung einer Fluid-Struktur-Kopplung bestimmt.

## Auslegung der Maschine

In einem ersten Schritt wurde ein Konzept für die Architektur des Antriebs des Helikopters entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen EC145 (BK 117 C-2), der im Bereich der Luftrettung (engl.: *Helicopter Emergency Medical Services*, HEMS) eingesetzt wird und vom Deutschen Rettungsflygdienst des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs e.V. (ADAC) genutzt wird. Jede der beiden im Helikopter installierten Gasturbinen wird in diesem Konzept durch eine elektrische Maschine



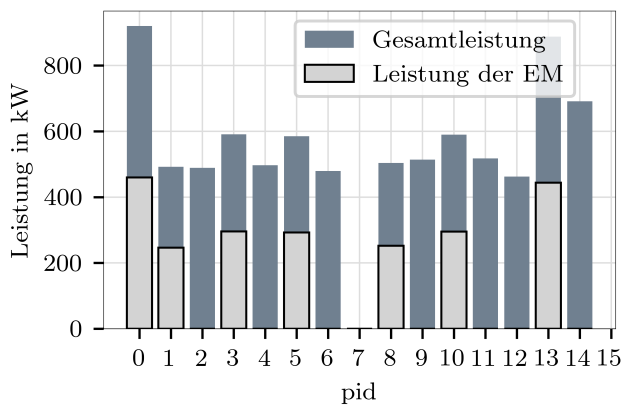
**Abbildung 1:** Beispiel-Missionsprofil eines Hubschraubers des deutschen Luftrettungsdienstes (DRF). Die tatsächlichen ADS-B-Daten sind in Grün dargestellt, das bereinigte und bearbeitete Profil in Schwarz.

mit einer Spitzenleistung von 320 kW und einer Dauerleistung von 236 kW ergänzt, deren Leistung auf die jeweilige Welle der entsprechenden Gasturbine übertragen wird. Der elektrische Teil des Antriebs soll dann 50% der notwendigen Leistung liefern. Die Architektur besteht aus den konventionellen Antriebskomponenten Kraftstofftank, Gasturbinen, Getriebe und Hauptrotor, wie von Bolvashenkov *et al.* [2] gezeigt. Für den elektrischen Teil des parallel-hybriden Antriebsstrangs werden zwei elektrische Maschinen, elektrische Wandler und ein Batteriesystem eingeführt. Die elektrischen Maschinen liefern in dedizierten Flugphasen oder in Notfallsituationen (z.B. bei einem ausgefallenen Triebwerk, OEI) Leistung an die Wellen. Gleichzeitig kann die elektrische Maschine im Generatorbetrieb genutzt werden, um die Batterie in bestimmten Flugphasen wieder aufzuladen [3].

Ein entsprechendes Missionsprofil eines Rettungsflug-Hubschraubers der DRF Luftrettung ist in Abbildung 1 dargestellt. Es wurde aus dem Log einer individuellen Mission eines Hubschraubers erstellt, das von einem Flug-Tracking-Dienst bereitgestellt wurde [4]. Das Profil zeigt die Flughöhe des Hubschraubers über der Zeit für einen 15-minütigen Flug vom Mannheim-City-Airport (ICAO: EDFM) für ca. 60 km in südöstlicher Richtung. Eine 30-minütige Ruhephase ohne die automatische (Bord-)Abhängige Überwachung (engl.: *Automatic-Dependent-Surveillance-Broadcast*, ADS-B) deutet auf einen EMS-Einsatz in einer Höhe

von etwa 400 m über dem Meeresspiegel hin, gefolgt von einem weiteren 15-minütigen Rückflug. Das Missionsprofil wurde aufbereitet, um eindeutige Flugphasen zu erhalten und die nachfolgende Leistungsberechnung zu vereinfachen. Die einzelnen Flugphasen wurden von 0 bis 15 entsprechend gekennzeichnet (engl.: *profile point identifier*, pid). Sie umfassen: vertikaler Steigflug, Steigen im Vorwärtsflug, reiner Vorwärtsflug sowie Sinkflug.

Anschließend wurde die für den Hubschrauber erforderliche Wellenleistung für die zuvor ermittelten Flugphasen auf Basis einer vereinfachten Blatt-Element-Theorie berechnet, welche umfassend in [5] erklärt ist. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse zusammen mit der von den elektrischen Maschinen bereitgestellten Leistung. Diese sollen die Gasturbinen in den beiden Flugphasen „vertikaler Steigflug“ (pid 0 und 13) und „climb im Vorwärtsflug“ (pid 1, 3, 5, 8 und 10) mit 50% der geforderten Leistung unterstützen.



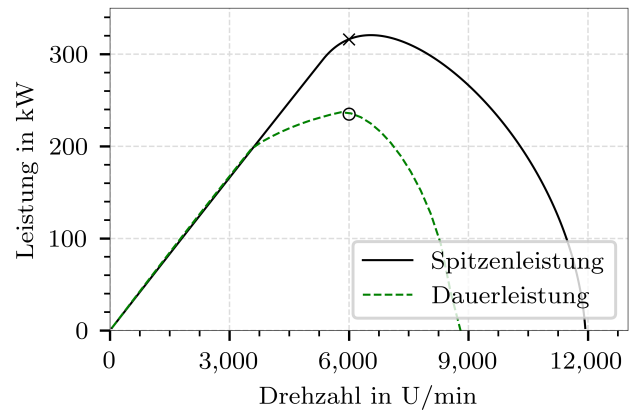
**Abbildung 2:** Ermittelte erforderliche Gesamtleistung des Hubschraubers für verschiedene Flugphasen und entsprechender Anteil des elektrischen Antriebsstrangs.

Um die Maschine zu dimensionieren, wurde ein Open-Source-Tool verwendet, welches als Grundlage das zu liefernde Drehmoment bei einer gegebenen Drehzahl nutzt [6]. Als Eingabe dienten u.a. die Anzahl der Polpaare, die zu verwendenden Materialien, die maximal zulässige Stromdichte in der Wicklung sowie die maximalen Sättigungsgrenzen des Eisens. Das Wicklungssystem kann ebenfalls beeinflusst werden, etwa durch Vorgabe des Nutfüllfaktors oder des Wicklungstyps. Das Tool berechnet die geometrischen Abmessungen der aktiven Teile der Maschine (Durchmesser der Statorlaminiierung, Dimension der Nuten, Magnetdicke und -höhe, etc.) und liefert Parameter des elektromagnetischen Systems.

Die auf diese Weise ermittelten Parameter wurden genutzt, um die Maschine in einer kommerziellen Finite-Elemente-Software zu modellieren, die anschließend präzise Vorhersagen für die elektromagnetische und elektrische Leistung, das gekoppelte thermische Verhalten sowie die mechanische Festigkeit liefert. Anschließend wurde das Modell hinsichtlich seiner elektromagnetischen Eigenschaften analysiert, sodass die resultierende Kraft-

dichte im Luftspalt, die für die Berechnung der Struktur-schwingung und letztlich der abgestrahlten Schalleistung benötigt wird, bestimmt werden konnte.

Der endgültige Entwurf liefert eine Spitzenleistung von 320 kW bei 6.550 U/min, was leicht über dem Auslegungspunkt liegt. Bei einer Drehzahl von 6.000 U/min und einem maximalen Strom von 281,5 A kann die Maschine ein Drehmoment von 372 Nm bereitstellen. Dies entspricht einer Dauerwellenleistung von 236 kW, siehe Abbildung 3. Der Wirkungsgrad in diesem Betriebspunkt liegt bei nahezu 97%.



**Abbildung 3:** Spitzen- und Dauerleistung des Maschinendesigns. Die Markierungen zeigen die Spitzen- (x) und Dauerleistung (o) bei einer Nenndrehzahl von 6.000 U/min.

## Äquivalente Schalleistung

Um ein Drehmoment zu erzeugen, muss eine elektrische Maschine in ihren aktiven Teilen ein elektromagnetisches Feld aufbauen. Im Fall einer PMSM handelt es sich dabei um die Überlagerung der beiden Felder, welche von den Permanentmagneten sowie durch das Wicklungssystem bereitgestellt werden. Durch Lösen eines FEM Modells der Maschine erhält man die magnetischen Flussdichten  $B_t$  in tangentialer und  $B_r$  in radialer Richtung. Erste ist für die Erzeugung des Drehmoments verantwortlich, während die zweite Komponente die Hauptquelle des elektromagnetisch induzierten Lärms darstellt. Mittels dieser beiden Flussdichten lässt sich die Kraftdichte in radialer Richtung  $f_r$  berechnen als

$$f_r(x, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2(x, t) - B_t^2(x, t)], \quad (1)$$

während die Komponente in tangentialer Richtung  $f_t$  sich aus

$$f_t(x, t) = \frac{1}{\mu_0} [B_r(x, t)B_t(x, t)] \quad (2)$$

ergibt. Hier ist  $\mu_0$  die magnetische Permeabilität,  $x$  die Umfangsposition im Luftspalt und  $t$  die Zeit. Mit der Kraftdichte, die auch als magnetischer Druck verstanden

werden kann, lassen sich die Kräfte, die auf der dem Luftspalt zugewandten Oberfläche der Statorzähne wirken, berechnen.

Die aus der elektromagnetischen Analyse ermittelten Kräfte wurden auf die einzelnen Statorzähne im Schwerpunkt ihrer Oberfläche aufgeprägt. Mittels einer Harmonischen Antwortanalyse, in Kombination mit den Ergebnissen einer Modalanalyse der Struktur, wurde die äquivalente Schalleistung (engl.: *equivalent radiated power*, ERP) bestimmt. Dabei handelt es sich um eine vereinfachte Berechnung der Schalleistung, die von einer ebenen Wellenausbreitung ausgeht. Anstelle der Schallschnelle wird hier die Normalkomponente der Geschwindigkeit an der Gehäuseoberfläche verwendet. Die äquivalente Schalleistung lässt sich berechnen mittels

$$P_{ERP} = \frac{\rho c}{2} \int_A \hat{v}_n^2 dA. \quad (3)$$

Hierbei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit und  $\hat{v}_n$  die Amplitude der Normalgeschwindigkeit an der Oberfläche der abstrahlenden Struktur. Die äquivalente Schalleistung ist leicht zu bestimmen, berücksichtigt jedoch weder die Form der abstrahlenden Oberfläche noch die Wellenlänge des Schalls. Deshalb kann bei niedrigen Frequenzen – insbesondere bei kleineren Maschinen – die abgestrahlte Schalleistung bei Anwendung von (3) überschätzt werden.

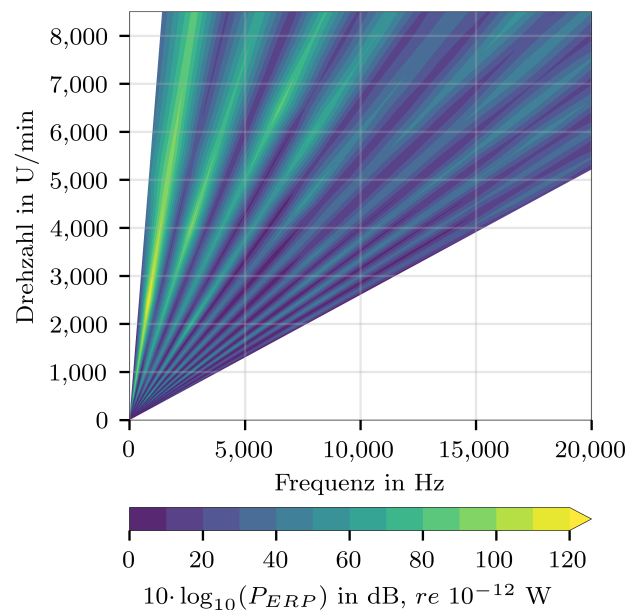
Eine elektromagnetisch erregte Kraftwelle rotiert im Luftspalt und lässt sich in eine Summe von sinusförmigen Wellen zerlegen, wodurch bestimmte anregende Modenformen entstehen [7]. Diese Formen besitzen eine räumliche Ordnung (oder räumliche Wellenzahl)  $r$  sowie eine zugehörige Frequenz beziehungsweise Zeitordnung. Eine Strukturmode  $m$  kann dann durch eine Kraftwelle mit derselben räumlichen Ordnung (beziehungsweise Wellenzahl)  $r$  angeregt werden. Ist die Frequenz der Kraftanregung beziehungsweise der Kraftwelle gleich oder nahe der Eigenfrequenz der Struktur, tritt ein Resonanzeffekt auf, der zu einer erhöhten Schallabstrahlung führt. Die räumliche Ordnung der ersten Kraftwellenkomponente lässt sich abschätzen durch

$$r = \text{GCD}(N/m_{ph}, 2p). \quad (4)$$

Hierbei bezeichnet GCD den größten gemeinsamen Teiler,  $N$  die Anzahl der Statornuten und  $m_{ph}$  die Phasenanzahl. Für die untersuchte Maschine hat die erste Kraftwellenkomponente die räumliche Wellenzahl  $r = 4$ . Sie tritt beim Doppelten der elektrischen Frequenz  $f_{el}$ , also bei 2.000 Hz, auf. Ihre zeitliche Ordnung (bezogen auf die elektrische Frequenz) ist 2, die zeitliche Ordnung bezogen auf die mechanische Frequenz 20. Die räumliche Ordnung der zweiten Kraftwellenkomponente beträgt  $r = 2 \cdot \text{GCD}(N/m_{ph}, 2p) = 8$  bei einer Frequenz von 4.000 Hz, während die räumliche Ordnung der dritten Komponente  $r = 12$  bei einer Frequenz von 6.000 Hz auftritt. Die zugehörigen zeitlichen Ordnungen, bezogen

auf die mechanische Frequenz, lauten demnach 40 beziehungsweise 60.

Die harmonische Antwortanalyse wurde für eine Vielzahl verschiedener Drehzahlen entlang der kontinuierlichen Leistungs-Drehzahl-Kennlinie, siehe Abbildung 3, durchgeführt. Für jeden der untersuchten Drehzahlpunkte wurden die aus der elektromagnetischen Simulation für diese Drehzahl gewonnenen Kräfte auf die Statorzähne aufgebracht. Mit den Ergebnissen der harmonischen Antwortanalyse wurde anschließend das Wasserfalldiagramm in Abbildung 4 erstellt, welches die äquivalente abgestrahlte Leistung in Abhängigkeit von Drehzahl und Frequenz darstellt.



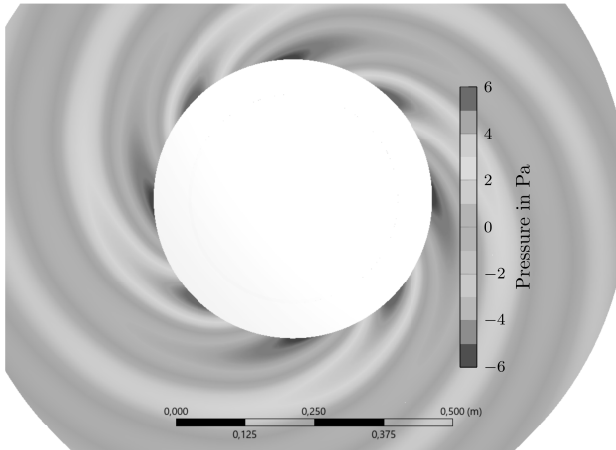
**Abbildung 4:** Äquivalente abgestrahlte Leistung der Maschine als Funktion der Drehzahl der Maschine und der Frequenz.

Aus den Daten lässt sich erkennen, dass die ersten vier zeitlichen, auf die mechanische Frequenz bezogenen, Ordnungen (20, 40, 60 und 80) über den gesamten Drehzahlbereich der Maschine dominieren, wobei hier die Zeitordnung 20 am ausgeprägtesten ist. Bei einer Drehzahl von 2.500 U/min wird der maximale Schalleistungspegel bei der mechanischen Zeitordnung 20 erreicht, also bei einer Frequenz von 833,3 Hz. Beim Betriebspunkt mit einer Drehzahl von 6.000 U/min, der Drehzahl der Gasturbinenwellen, ist der maximale äquivalente Schalleistungspegel von 93,9 dB ebenfalls bei dieser Zeitordnung und damit bei einer Frequenz von 2.000 Hz zu finden.

## Schall im Fernfeld

Abbildung 5 zeigt den aus der Analyse der harmonischen Akustik ermittelten Schalldruck für eine Frequenz von 2.000 Hz auf einer Schnittfläche der die Maschine umgebenden Fluidzone. Bei einer Frequenz von 2.000 Hz beträgt die dominante räumliche Wellenzahl vier. Das Feld des akustischen Drucks weist vier Knoten mit positivem und vier Knoten mit negativem Druck und so

mit eine ausgeprägte umfangsgerichtete Modenform auf. Das spiralförmige Muster weist darauf hin, dass es sich um eine rotierende Schallquelle handelt. Dieser Effekt ist auch in den Simulationen erkennbar. Sie dreht mit einer Frequenz, welcher der Erregungsfrequenz entspricht. Während der Rotor der Maschine – und damit die Kraftwelle im Luftspalt – sich im Uhrzeigersinn dreht, rotiert das resultierende Feld am Gehäuse gegen den Uhrzeigersinn.

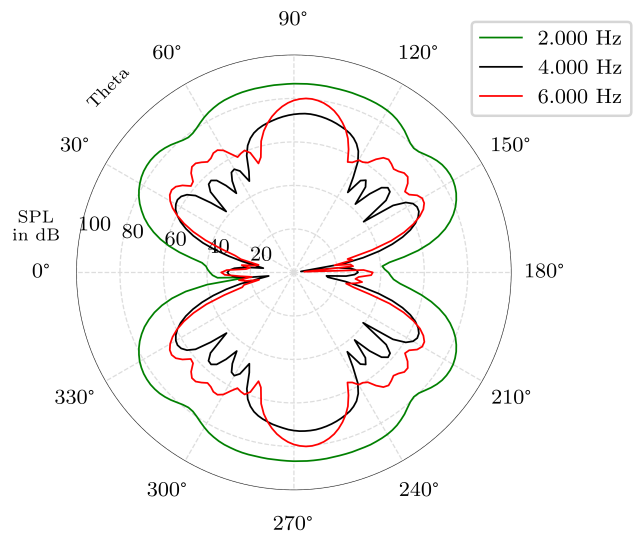


**Abbildung 5:** Schalldruck innerhalb einer Kugel um die Maschine für die erste Anregungsfrequenz von 2.000 Hz.

Die Richtcharakteristik des von der Maschine abgestrahlten Schalls ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Schalldruckpegel wurde an 180 Positionen auf einem Kreis um die Maschine mit einem Radius von 1 m für drei Frequenzen ermittelt. Die ermittelten Schalldruckpegel unterscheiden sich in Abhängigkeit der untersuchten Frequenz. Die Verläufe weisen eine symmetrische Form auf, wobei die höchsten Pegel auf der Oberseite der Maschine zwischen  $30^\circ$  und  $150^\circ$  sowie auf der Unterseite zwischen  $210^\circ$  und  $330^\circ$  auftreten. In diesen Richtungen liegt der Schalldruckpegel bei einer Frequenz von 2.000 Hz zwischen 78,8 und 86,9 dB, bei 4.000 Hz zwischen 39,7 und 73,2 dB und bei 6.000 Hz zwischen 52,7 und 80,2 dB. Ab einer Frequenz von 4.000 Hz treten zusätzliche Nebenkeulen im Abstand von  $10^\circ$  auf, beginnend bei einem Winkel  $\theta$  von  $30^\circ$ . Die höchsten Schalldruckpegel liegen zwischen  $70^\circ$  und  $110^\circ$ , also in radialer Richtung des Gehäuses. Im Gegenzug ist der Schalldruckpegel in axialer Richtung der Maschine, also bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , am niedrigsten.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Lärm einer elektrischen Maschine abgeschätzt, welche in einem parallel-hybriden Antriebsstrang eines EC145 zur Unterstützung der Gasturbinen während spezifischer Flugphasen eingesetzt wird. Die Untersuchungen erfolgten mittels simulationsbasierter Verfahren. Der Prozess umfasst den Vorentwurf als auch die nachfolgende Optimierung der Maschine und integriert sowohl vereinfachte als auch hochauflösende Methoden zur Abschätzung der abgestrahlten Schalleistung und ihrer Richtcharakteristik.



**Abbildung 6:** Richtcharakteristik des Schalldruckpegels in einem Meter Abstand für drei verschiedene Frequenzen.

## Literatur

- [1] S. Hakansson, “Noise estimation of an electric machine for a parallel hybrid helicopter propulsion system,” in *51st European Rotorcraft Forum*, (Venice, Italy), Sept. 2025.
- [2] I. Bolvashenkov, J. Kammermann, Z. Wenbin, I. Frenkel, and H.-G. Herzog, “Comparative Reliability Analysis of Different Traction Drive Topologies for a Search-and-Rescue Helicopter,” in *Stochastic Models In Reliability Engineering*, pp. 331–354, CRC Press, 2020.
- [3] T. Donato, A. Carlà, and G. Avanzini, “Fuel consumption of rotorcrafts and potentiality for hybrid electric power systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 429–442, 2018.
- [4] A. Radar, “Flight tracking using AirNav Radar.” <https://www.airnavradar.com/>. Accessed: 2024-07-30.
- [5] J. M. Seddon and S. Newman, *Basic Helicopter Aerodynamics, Second Edition*. Blackwell Science Ltd, 2001.
- [6] S. Kalt, J. Erhard, and M. Lienkamp, “Electric machine design tool for permanent magnet synchronous machines and induction machines,” *Machines*, vol. 8, no. 1, p. 15, 2020.
- [7] S. Hakansson, P. Schulze, R. Burgmayer, E. W. Schneehagen, and T. F. Geyer, “Numerical investigation of the noise generation of electric motors in urban air mobility vehicles,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 158, pp. 2647–2658, 10 2025.