DOI: 10.71568/daga2026.270

Numerische Studie über den Einfluss von Parametervariationen auf Propellergeräusch

Jürgen Dierke[1], Martin Hepperle[1], Roland Ewert[1], Jan Delfs[1]

[1] *DLR, Institut for Aerodynamics and Flow Technology, 38108 Braunschweig, E-Mail:Juergen.Dierke@dlr.de*

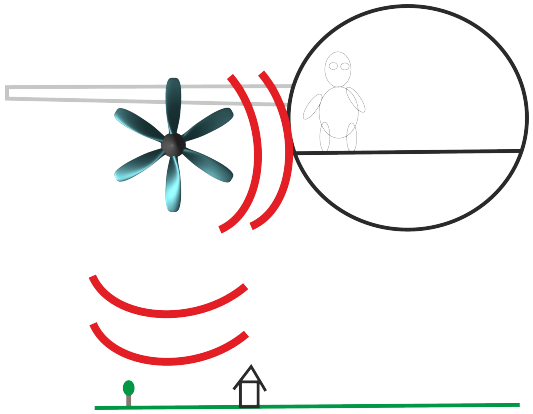


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Propellerschallproblematik zum Runpf und zum Boden

Einleitung

In den letzten Jahren hat die Entwicklung propellergetriebener Antriebssysteme erneut an Bedeutung gewonnen, insbesondere aufgrund ihrer hohen Antriebseffizienz und des potenziellen Beitrags zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sowie der umweltkritischen Emissionen von Treibhausgasen und Schadstoffen. Diese Vorteile stehen jedoch im Spannungsfeld mit der Herausforderung der erhöhten Geräuschemissionen im Vergleich zu konventionellen Strahltriebwerken, die insbesondere in der Nähe von Flughäfen und in urbanen Umgebungen akustische Belastungen verursachen können. Ein zentrales Ziel der europäischen „Flight Path 2050"-Initiative[1] ist die Reduktion der Geräuschemissionen von Luftfahrzeugen bis zum Jahr 2050 um insgesamt 65 % im Vergleich zu Referenzstandards. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, werden derzeit umfassende Forschungsaktivitäten zur Entwicklung akustisch optimierter Propellerkonfigurationen durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer Vorstudie zur Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter an isolierten Propellern präsentiert. Ziel ist es, potenzielle Reduktionsstrategien für die Geräuschemissionen zu identifizieren, ohne dabei den Schub und den Wirkungsgrad des Antriebssystems signifikant zu beeinträchtigen.

Die methodische Vorgehensweise basiert auf der Kombination der Blattelementetheorie (Blade Element Theory, BET) mit der Ffowcs Williams-Hawkings-Gleichung (FWH) in solider Formulierung für bewegte Oberflächen. Mit der BET werden die radialen Verteilungen der aerodynamischen Kräfte auf den Propellerblättern berechnet. Diese Kräfte werden anschließend in Flächenelemente mit zugehörigen Normalenvektoren und Druckverteilungen transformiert, die als Eingangsgrößen für die akustische Extrapolation dienen. Die resultierenden Schalldrücke werden im Fernfeld entlang eines Kreisrings spektral analysiert, um Frequenzgänge und Schalldruckpegel zu ermitteln. Die Studie untersucht insbesondere die Auswirkungen von Blattanzahl, azimuthaler Blattverteilung, Lastverteilung und der radialen Position des Kraftmaximums auf die akustische Abstrahlung.

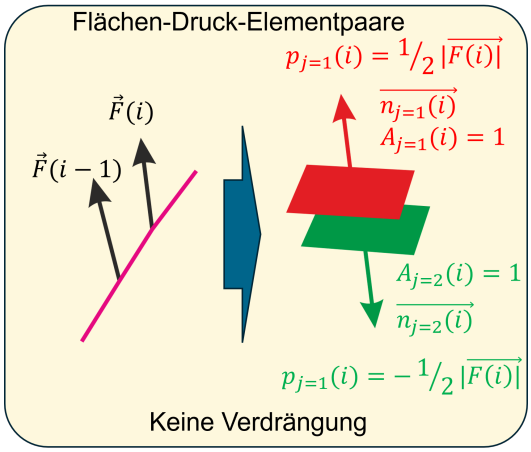


Abbildung 2: Umwandlung der Kraftverteilung in Druck-Flächenelementpaare

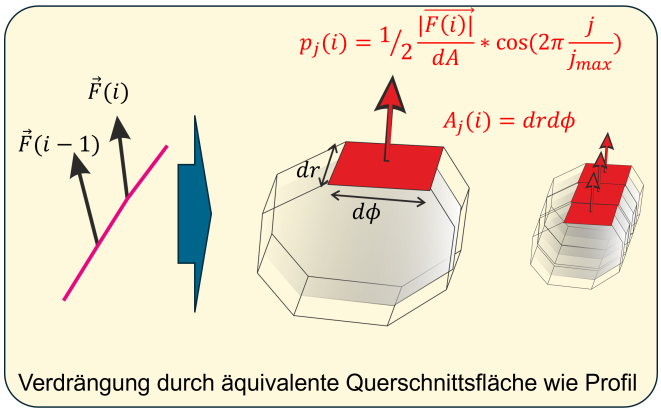


Abbildung 3: Umwandlung der Kraftverteilung in Druck-Flächenelemente auf einem Zylinder

Numerische Methode

Die vorgestellte Methode kombiniert die Blattelementetheorie (BET) mit der Ffowcs Williams-Hawkings-Extrapolation (FWH) zur akustischen Vorhersage von Propellerschall. Die BET ermöglicht die Berechnung der radialen Verteilung der aerodynamischen Kräfte unter Berücksichtigung der lokalen Anströmbedingungen, der Blattgeometrie und des Flugzustands. Die resultierenden Kraftverteilungen werden anschließend in Flächen-Druck-Verteilungen umgewandelt, die als Eingabedaten für die FWH-Gleichung dienen. Zwei unterschiedliche Ansätze zur Transformation der Kraftverteilungen in Flächen-Druck-Verteilungen werden genutzt.

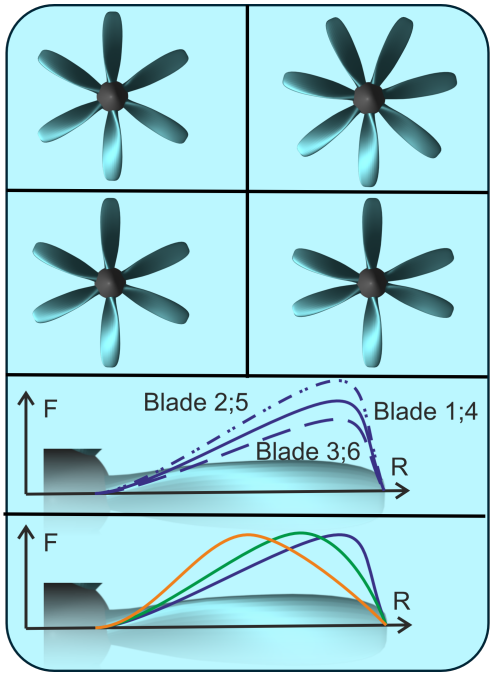


Abbildung 4: Darstellung untersuchter Parameter; oben links: Referenzpropeller mit 6 Blättern; oben rechts: Propeller mit 7 Blättern; 2.Zeile: Ungleichmäßige azimuthale Blattverteilung 5% und 10% Abweichung von gleichmäßiger Verteilung; 3. Zeile: Ungleichmäßige Lastverteilung für verschieden Blätter; unten: Verschieben der maximalen Last nach Innen um 10%, 20%, 30% bei gleicher Gesamtlast

Blattelementtherorie Tool

Das BET-Tool folgt dem in E. E. Larrabee [2] beschriebenen Ansatz. Es berechnet die radialen Verteilungen der aerodynamischen Kräfte basierend auf folgenden Eingabeparametern: Propellereigenschaften (Drehzahl, Durchmesser, Anzahl der Blätter), Blatteigenschaften (Profilgeometrie, Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte, Twist- und Chordverteilung), sowie Flugzustandsgrößen (Anströmgeschwindigkeit, Dichte, Schallgeschwindigkeit). Die berechneten Kraftverteilungen dienen als Grundlage für die nachfolgende akustische Extrapolation.

Umwandlung Kraftverteilungen in Flächen-Druck-Verteilungen

Die Eingangsgrößen für die FWH-Extrapolation ist, bei solider Fläche, der Druck, die Flächenelement und deren Normalen. Gegeben sind jedoch Kraftverteilungen über den Radius. Es werden zwei Möglichkeiten beleuchtet die Blattkraftverteilungen in Flächen-Druck-Verteilungen umzuwandeln:

- **Unendlich dünne Flächenelementpaare:** Die Kräfte werden auf zwei gegenüberliegenden, infinitesimal dünnen Flächenelementen modelliert, wobei die Verdrängung des Blattmaterials vernachlässigt wird. Dieser Ansatz ist rechnerisch effizient, erfasst jedoch keine dynamischen Effekte durch Flüssigkeitsverdrängung.
- **Zylindrische Verdrängungsmodellierung:** Die Kräfte werden auf einem zylindrischen Mantel mit Querschnittsfläche entsprechend dem Profilquerschnitt des Propellerblatts für die jeweilige radiale Position verteilt. Dieser Ansatz berücksichtigt die Verdrängung des umgebenden Mediums und ermöglicht eine realistischere Darstellung des Dicken- und Verdrängungslärms.

Mit diesem Ansatz sind die folgenden Effekte berücksichtigt: 1) die Radiale Verteilung der Blattkräfte; 2) die Fluggeschwindigkeit in der Schallausbreitung; 3) optional der Verdrängungsschall der Blätter. Der Ansatz ist daher geeignet Effekte von veränderten Kraftverteilungen; Blattpositionen (azimuthal) oder individuellem Pitch (indirekt durch verändern der Blattkräfte) zu berücksichtigen und gute Abschätzungen für den Schalldruck zu liefern. Eine Rechnungung für 6 Rotationen dauert ca. 6 Sekunden ohne Verdrängungslärm und ca. 12 Sekunden mit Verdrängugnslärm.

FWH-Tool

Das Tool benutzt die Formulierung von Najafi-Yazdi[3] für bewegte Oberflächen und strömendes Medium. Die Gleichungen haben folgende Form:

$$
\begin{aligned}
4\pi p'_T = &\int_S \dot{\Theta}\left[\frac{f_{\Theta,1}}{(1-M_R)^2}\right] \\
&+ \Theta\left[\frac{\dot{f}_{\Theta,1}}{(1-M_R)^2} + \frac{\dot{M}_R f_{\Theta,1}}{(1-M_R)^3} + \frac{f_{\Theta,2}}{1-M_R}\right] dS \\
4\pi p'_L = &\int_S \dot{\vec{F}}\left[\frac{\vec{f}_{F,1}}{(1-M_R)^2}\right] \\
&+ \vec{F}\left[\frac{\dot{\vec{f}}_{F,1}}{(1-M_R)^2} + \frac{\dot{M}_R \vec{f}_{F,1}}{(1-M_R)^3} + \frac{\vec{f}_{F,2}}{1-M_R}\right] dS
\end{aligned}
\tag{1}
$$

mit den Variablen

$$
\begin{aligned}
\Theta &= [\rho(v_n - v_{H,n}) + \rho_\infty(v_{H,n} - v_{\infty,n})] \\
\vec{F} &= \rho(\vec{v} - \vec{v}_\infty)\cdot(v_n - v_{H,n}) + p'\cdot\vec{n}\ .
\end{aligned}
$$

Das Problem wird Sender-basiert angegangen, d.h. zu jedem Sendezeitpunkt werden die Informationen aller Oberflächenelemente zum Beobachterpunkt extrapoliert und dort in den Zeitstrahl einsortiert und aufsummiert.

Setup und Parameter

Die numerische Studie wird an einem Referenzpropeller mit sechs äquidistant verteilten Blättern durchgeführt. Die Blattspitzenmachzahl ist $Ma_{tip} = 0.72$ und die Flugmachzahl $Ma_\infty = 0.195$. Ein Mikrofonring befindet sich in einer Entfernung von 120 m vom Propellerzentrum und ermöglicht die Analyse der Richtcharakteristik sowie der spektralen Verteilung der Schallabstrahlung. Die untersuchten Parameter umfassen:

- Erhöhung der Blattanzahl von 6 auf 7 bei gleichem Schub,
- Ungleichmäßige azimuthale Blattverteilung mit Abweichungen von 5% und 10% von der gleichmäßigen Verteilung,
- Ungleichmäßige Lastverteilung über die Blätter,

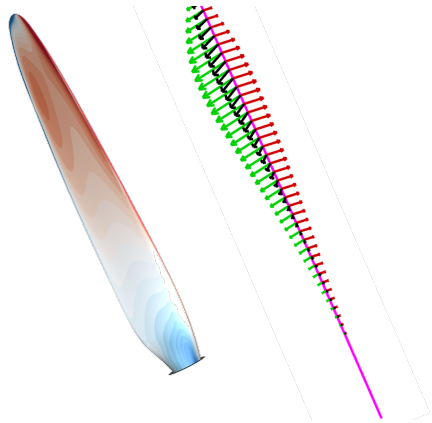


Abbildung 5: RANS Oberflächendrücke und Linienkräfte aus BET

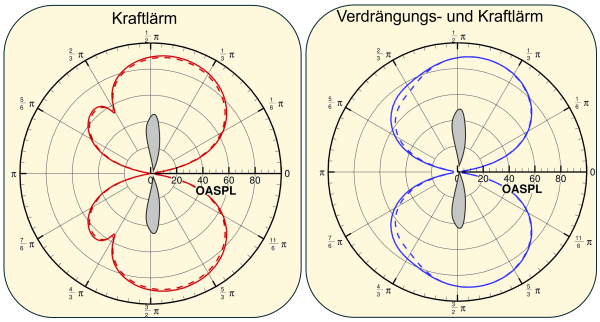


Abbildung 6: Richtcharakteristikenvergleich von RANS-Oberflächendrücken extrapoliert (gestrichelt) und von BET-Kraftverteilungen extrapoliert (durchgezogen); links der Vergelich für reinen Kraftlärm und rechts für Kraft- und Dickenlärm

- Radiale Verschiebung des Kraftmaximums nach innen um 10%, 20% und 30% bei konstanter Gesamtkraft.

Alle Konfigurationen werden unter Beibehaltung des Schubs und des Wirkungsgrads simuliert, um eine Vergleichbarkeit der akustischen Ergebnisse zu gewährleisten.

Validierung und Vortest

Um zu überprüfen, ob das ganze ein sinnvoller Ansatz ist wurde ein Vergleich mit einem klassischen Verfahren durchgeführt. Das klassische Verfahren bestimmt die Blattkräfte mittels RANS-Simulation im rotierenden System. Die Akustik wird mittels FWH-Extrapolation erhalten. Dargestellt sind 2 Richtcharakteristiken für die RANS-Ergebnisse gestrichelt und der hier vorgestellte Ansatz durchgezogen. Links für den Kraflärmanteil alleine und rechts für den Kraft und Verdrängungslärm. Zu erkennen ist, dass die Übereinstimmung recht ordentlich ist und dass der Dickenlärm den Dip im Kraftlärm kaschiert. Ein weiteres interessantes Ergebnis ist das radial Verhalten des Schalldruckpegels der verschiedenen Blattfolgefrequenzen. Da keine Vereinfachung im FWH-Teil vorliegt ist auch das Nahfeld sinnvoll berechnet. Im Fernfeld haben wir den typischen $1/R$-Verlauf, aber im Nahbereich für Radien kleiner des Sonic Circles steigt der Verlauf steil an und ist unterschiedlich für die verschiedenen Blattfolgefrequenzen. Das gleiche Verhalten wurde bei Jan Delfs analaytischem Model beobachtet [4]. In Abbildung 8 werden die Ergebnisse beider Umwandlungsansätze verglichen. Die Richtcharakteristik zeigt, dass der Verdrängunglärm einen Dip in der Kraftlärmcharakteristik aufgefüllt und dass im Bereich des Maximums der Level verringert ist. Es scheint destruktive Überlagerung von Verdrängungs- und Lastlärm zu geben. Die spektrale Analyse des 90°-Mikrofons zeigt einen flacheren Abfall der höher Harmonischen Blattfolgefrequenzen für den Gesamtlärm, als für den Kraftlärmanteil alleine.

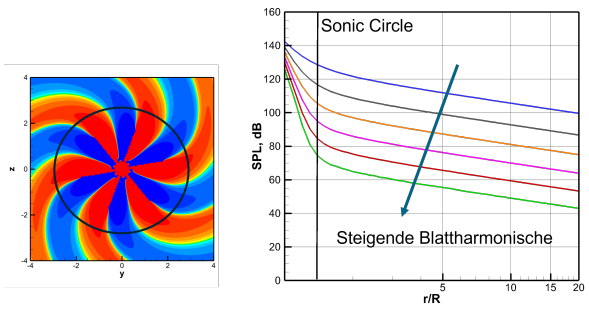


Abbildung 7: Darstellung des akustischen Drucks in der Propellerebene mit Markierung für den Sonic Circle (links); Schalldruckpregelabfall über den Abstand für verschiedene Blattfolgefrequenzen

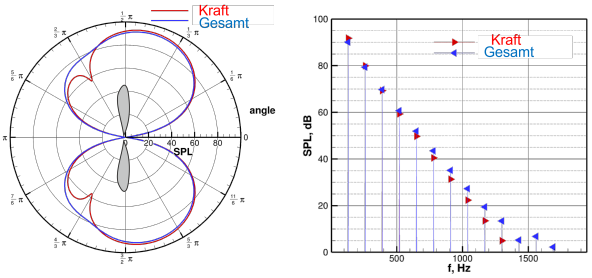


Abbildung 8: Vergleich der Ergebnisse nach den zwei Varianten der Umwandlung der Kraftverteilungen in Druck-Flächen-Verteilungen als FWH Input; links Richtcharakterisiken und rechts Spektrum der Blattfolgefrequenzen in der Propellerebene

Ergebnisse der Parameteruntersuchung

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtlärmergebnisse, da die Parameterabhängigkeit der einzelnen Komponenten qualitativ konsistent ist. Die Erhöhung der Blattanzahl um eins führt zu einer Reduktion des maximalen Gesamtschallpegels um etwa 1.7 dB

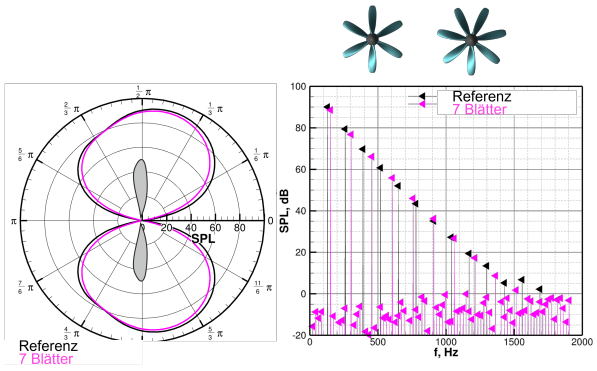


Abbildung 9: Parameter: Blattanzahl

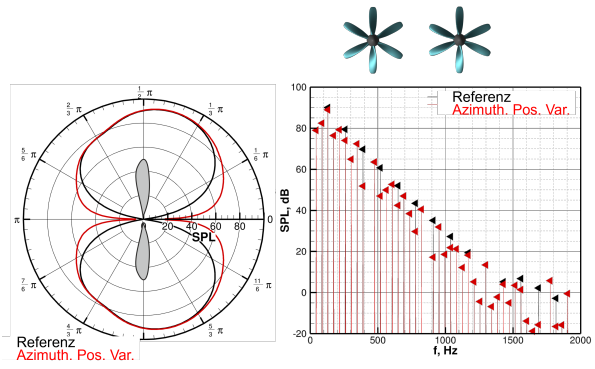


Abbildung 10: Parameter: Azimuthaler Abstand

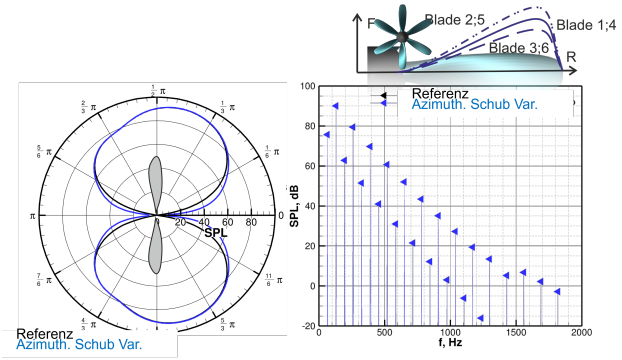


Abbildung 11: Parameter: Kraftvariation für Blätter

(Abb. 9), während die spektrale Abfall zu höheren Frequenzen unverändert bleibt. Die Grundharmonische verschiebt sich jedoch aufgrund der veränderten Blattfolgefrequenz. Ungleichmäßige azimuthale Blattabstände führen zu einer Erhöhung der axialen Schallabstrahlung und zur Entstehung zusätzlicher Zwischentöne, ohne jedoch den Gesamtschallpegel signifikant zu verändern (Abb. 10). Die Verschiebung der mittleren Blattpositionen lag bei $\pm 10°$. Ein ähnliches Verhalten wird beobachtet, wenn die Lasten über die Blätter ungleichmäßig verteilt werden (Abb. 11) oder durch Pitchvariationen verändert werden (Abb. 12). Die Verschiebung des Kraftmaximums nach innen erweist sich als besonders wirksam: Eine Verschiebung um 10% führt zu einer Reduktion um 0.7 dB, eine weitere Verschiebung um 10% ergibt eine weitere Reduktion von 0.7 dB, und bei einer Verschiebung um 30% erreicht man eine Gesamtreduktion von 2.1 dB (Abb. 13). Bei dieser Extremposition zeigt sich jedoch ein leichter Effizienzverlust des Propellers.

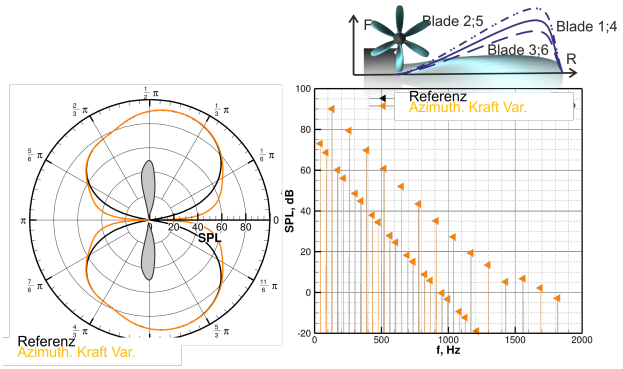


Abbildung 12: Parameter: Schubvariation für Blätter

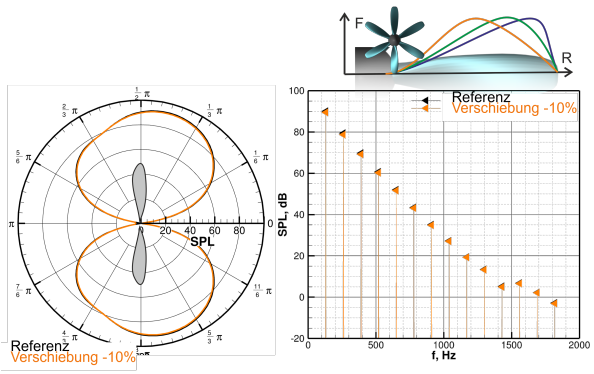


Abbildung 13: Parameter: Maximumverschiebung

Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Kombination aus Blattelementetheorie und Ffowcs Williams-Hawkings-Gleichung ein effizientes und zuverlässiges Werkzeug zur Vorhersage von Propellerschall darstellt. Die Validierung gegenüber RANS-Simulationen bestätigt die physikalische Konsistenz und Genauigkeit des Ansatzes. Zusammenfassend ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Erhöhung der Blattanzahl um eins führt zu einer Reduktion des maximalen Schalldruckpegels um etwa 1.7 dB.
- Die radiale Verschiebung des Kraftmaximums nach innen um 30% ermöglicht eine akustische Reduktion von bis zu 2.1 dB bei nur geringfügigen Effizienzverlusten.
- Die Kombination beider Maßnahmen könnte eine Gesamtreduktion von bis zu 4 dB ermöglichen, was einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Ziele der „Flight Path 2050“ darstellt.
- Die Rechenzeit von weniger als 10 Sekunden pro Rotation macht den Ansatz besonders geeignet für parametrische Studien und die Vorauslegung akustisch optimierter Propellerkonfigurationen.

Die Ergebnisse unterstreichen das hohe Potenzial der vorgestellten Methode zur Unterstützung der akustischen Optimierung von Propellerantrieben in zukünftigen Luftfahrzeugen.

Literatur

[1] Flightpath 2050 – Europe's Vision for Aviation Report of the High-Level group on Aviation Research. Technical report, European Commission, 2012.

[2] E. Eugene Larrabee. Practical design of minimum induced loss propellers. *SAE Transactions*, 88:2053–2062, 1979.

[3] Alireza Najafi-Yazdi, Guillaume A Brès, and Luc Mongeau. An acoustic analogy formulation for moving sources in uniformly moving media. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467(2125):144–165, 2011.

[4] J.W. Delfs. Towards an analytical model for propeller noise including potential near field contributions. *Proceedings of DAGA*, 2026.