Einfluss der Schaufelzahlpaarung auf den Rotor-Stator-Interaktionslärm unter Berücksichtigung einer Lärmbewertungsmethode

Stephen Schade[1], Robert Jaron[1], Sébastien Guérin[1]

[1] *DLR, Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik, 10623 Berlin, Email: Stephen.Schade@dlr.de*

Einleitung

Die Arbeit ist motiviert durch die Forschung an leisen, langsam drehenden und ummantelten Fanstufen für Kleinflugzeuge, bei denen der Fanlärm die dominante Lärmquelle darstellt.

Im Rahmen der Forschung an der „design-to-noise" Auslegung von Fanstufen werden Parameterstudien, unter anderem zum Einfluss der Schaufelzahlpaarung auf den Rotor-Stator-Interaktionslärm, durchgeführt. Der Interaktionslärm wird mit einem Verfahren berechnet, bei dem die Geometrie und Strömung, basierend auf einem Mittelschnittansatz, semi-analytisch modelliert und die Akustik rein analytisch berechnet wird. Das langfristige Ziel ist die Vorhersage des Lärmteppichs am Boden zu ermöglichen. In einem ersten Schritt werden die atmosphärische Dämpfung und zwei Lärmbewertungsmethoden berücksichtigt. Beides hat eine frequenzabhängige Gewichtung der Pegel zur Folge. Dies ist insbesondere relevant für die Auswahl akustisch günstiger Schaufelzahlpaarungen, da eine Variation der Anzahl der Rotorschaufeln die Blattfolgefrequenz des Rotors verschiebt, sodass sich der Bereich der geringsten Schallemission zu anderen Schaufelzahlpaarungen verlagern könnte.

Die Schaufelzahlvariation wird am Beispiel des Verdichterprüfstands CRAFT („Counter-Rotating Acoustic Fan Test Rig") der Abteilung Triebwerksakustik des Instituts für Antriebstechnik durchgeführt [1]. Der Fan kann entweder mit zwei gegenläufigen Rotoren oder einer Rotor-Stator-Stufe, welche in Abb. 1 dargestellt ist, betrieben werden.

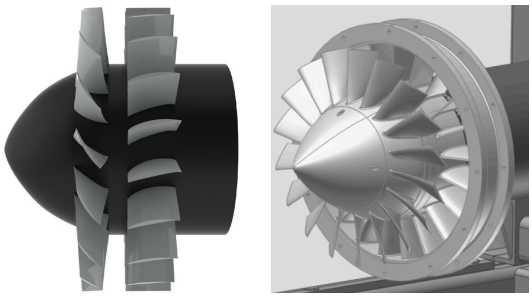


Abbildung 1: CRAFT Prüfstand als Rotor-Stator-Stufe.

Die um den Faktor 2 herunterskalierte Fanstufe erzeugt bei doppelter Ausführung ausreichend Schub, um ein Kleinflugzeug anzutreiben. Für die analytische Studie wird das skalierte Modell der Rotor-Stator-Stufe betrachtet. Die Ausgangsschaufelzahl beträgt 18 Rotorschaufeln und 21 Statorschaufeln. In Tab. 1 sind die Kenndaten der Betriebspunkte zusammengefasst.

Tabelle 1: Druckverhältnis (PR), Massenstrom (Q), Drehzahl (n) und relative Blattspitzen-Mach-Zahl der Zuströmung (M_{tip}) für das skalierte Modell des CRAFT Prüfstands.

CRAFT	Betriebspunkte		
	Design	Cutback	Approach
PR	1.039	1.049	1.025
Q [kg/s]	22.70	22.48	19.33
n [UpM]	2194	2348	1708
M_{tip}	0.34	0.36	0.26

Metriken zur Lärmbewertung

Zur Bewertung der Schaufelzahlkonfigurationen können verschiedene akustische Metriken angewendet werden. Typischerweise wird ein Schalldruckpegel oder ein Schallleistungspegel herangezogen. Diese Größen stehen in keinem linearen Zusammenhang zum Lautstärkeempfinden des menschlichen Gehörs.

Die A-Bewertung des Schalldruckpegels ist eine lautstärkebasierte Metrik. Die frequenzabhängige Gewichtung orientiert sich am Empfinden des menschlichen Gehörs. Hintergrund der Bewertungsmetrik ist, dass bei konstantem Schalldruckpegel aus einer Frequenzänderung eine Änderung des Lautstärkepegels resultiert [2]. Diese Frequenzabhängigkeit wird vom menschlichen Gehör subjektiv wahrgenommen [2].

Eine lärmbasierte Metrik ist die Berechnung effektiv empfundener Schallpegel („effective perceived noise level", EPNL-Werte). Ziel der EPNL-Berechnung ist die Lästigkeit des Lärms in den Bewertungsprozess einfließen zu lassen. Dabei wird die Abstrahlungscharakteristik des Schalls ermittelt und die Pegel hinsichtlich tonaler Peaks und der Dauer der Schalleinwirkung korrigiert. Basierend auf den zeitabhängigen Schalldruckpegeln werden unter Berücksichtigung der Lästigkeit des Lärms empfundene Schallpegel („perceived noise level", PNL-Werte und „tone corrected perceived noise level", PNLT-Werte) berechnet. Die ton-korrigierten Schallpegel erfassen zeitliche Überhöhungen diskreter Töne gegenüber den Breitbandpegeln. Weiterhin wird die Steigung des zeitlichen Verlaufs der Schalldruckpegel erfasst und mittels dieser Kriterien eine Pegelkorrektur errechnet. Nach [3] ist die maximale Tonkorrektur auf 6.67 dB begrenzt. Den Faktor D zur Korrektur der Dauer der Schalleinwirkung erhält man aus der zeitlichen Integration eines 10 dB breiten Bereichs unterhalb des maximalen ton-korrigierten empfundenen Schallpegels (PNLTM):

$$\mathrm{D} = 10\log_{10}\left[\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{\mathrm{PNLT}}{10}}dt\right] - \mathrm{PNLTM} \quad [\mathrm{dB}]. \qquad (1)$$

In Gl. (1) beschreibt T eine Zeitkonstante und t_1 sowie t_2 markieren die Zeitpunkte, innerhalb derer die PNLT-Werte größer sind als der maximale ton-korrigierte empfundene Schallpegel abzüglich 10 dB. Die Normierungskonstante T beträgt $T = 10\,\mathrm{s}$. Der effektiv empfundene Schallpegel berechnet sich aus

$$\mathrm{EPNL} = \mathrm{PNLTM} + \mathrm{D} \qquad [\mathrm{dB}]. \qquad (2)$$

Die vollständige Berechnungsvorschrift der PNL-, PNLT- und EPNL-Werte kann [3] entnommen werden.

Virtuelle Überflugsimulation

Wie in Abb. 2 dargestellt, sind zur akustischen Zertifizierung subsonischer Flugzeuge mit Strahlantrieb drei Referenzpunkte definiert: Überflug („flyover“), Anflug („approach“) und Seitenlinie („sideline“ oder „lateral“) [3]. Für jeden Referenzpunkt wird die lärmbasierte Metrik angewendet und ein EPNL-Wert ermittelt. Diese werden linear summiert, sodass der kummulative Wert maßgeblich für die Einhaltung der Zertifizierungsrichtlinien ist.

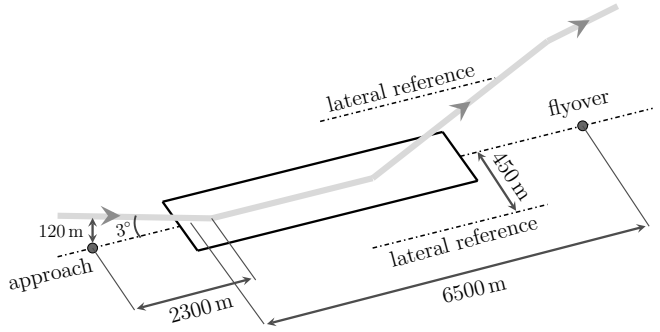


Abbildung 2: Definition der Referenzpunkte zur akustischen Zertifizierung von Flugzeugen nach [3].

Zwei Leitkonzepte der DLR Luftfahrtforschung sind „das virtuelle Flugzeug“ und „die digitale Triebwerksentwicklung“. Die vorgestellte Methode greift die Leitkonzepte auf und stellt einen Schritt in Richtung numerische Flugzeugzertifizierung dar. Die akustische Zertifizierung soll in den „design-to-noise“ Entwicklungsprozess von Fanstufen integriert werden. Bereits in der Vorauslegung können so zeitabhängige Schalldruckpegel berechnet, ein virtueller Überflug simuliert und zertifizierungsrelevante Lärmbewertungsmethoden angewendet werden.
Abb. 3 zeigt eine schematische Darstellung der Prozesskette zur Simulation des virtuellen Überfluges. Ausgangspunkt sind die Abstrahlungscharakteristiken der dominanten Schallquellen. Die Richtcharakteristiken des Fanlärms im Fernfeld werden mit dem vom DLR entwickelten Tool PropNoise analytisch vorhergesagt [4, 5, 6]. Die Interaktion mit der Flugzeugzelle wird dabei vernachlässigt. Die von Frequenz und Winkel abhängigen Schalldruckpegel sind als $\frac{1}{3}$-Oktavbandspektrum berechnet. Die Wahl der Flugbahn erfolgt in Anlehnung an die in Abb. 2 gezeigte Definition der Referenzpunkte. Die Flugbahn ist mit äquidistanten Intervallen Δt zeitlich diskretisiert. Es wird angenommen, dass die Flugzeugbewegung stückweise linear und gleichbleibend ist. Die geometrische Beschreibung der Trajektorie liefert zu jedem Zeitpunkt einen Emissionswinkel und einen Emissionsradius zwischen Beobachter und Flugbahn. Aus dem Emissionswinkel und der Richtcharakteristik können zu jedem Emissionszeitpunkt frequenzabhängige Schalldruckpegel berechnet werden.

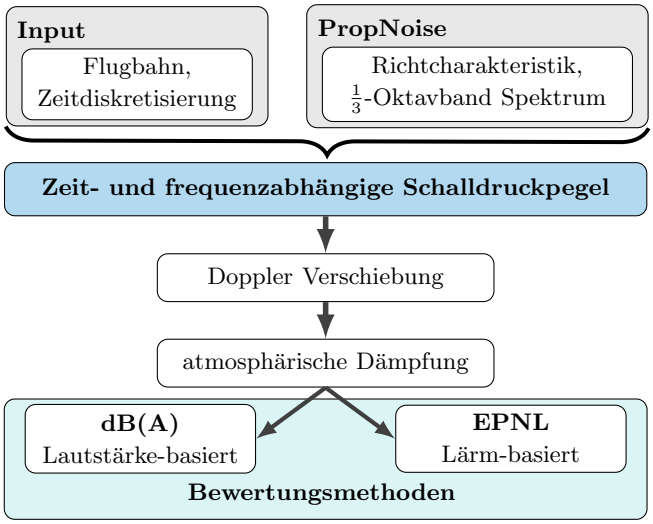
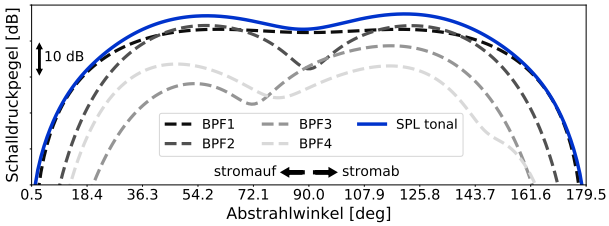
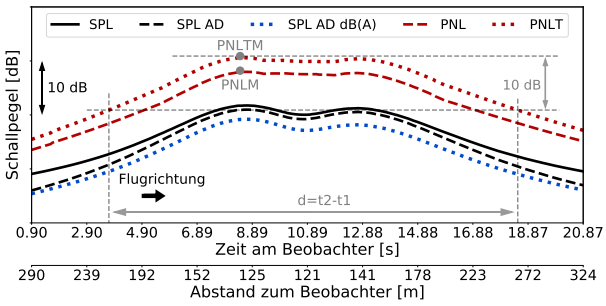


Abbildung 3: Prozesskette zur Berechnung zeitabhängiger Schalldruckpegel unter Berücksichtigung zertifizierungsrelevanter Lärmbewertungsmethoden.

Zur Beschreibung der Schallausbreitung in Richtung des Beobachters wird die Doppler Frequenzverschiebung und der Effekt der atmosphärischen Dämpfung berücksichtigt. Die Umgebungsbedingungen zur Berechnung der atmosphärischen Dämpfung sind gemäß den Richtlinien der akustischen Zertifizierung gewählt [3]. Die mathematische Beschreibung der Dämpfung der Pegel bei der Ausbreitung im Fernfeld erfolgt nach der Norm ISO 9613-1 [7].



(a) Richtcharakteristik der Fantöne im Fernfeld



(b) zeitabhängige und empfundene Schallpegel

Abbildung 4: Abstrahlcharakteristik des tonalen Nachlauf-Interaktionslärms sowie zeitabhängige und empfundene Schallpegel aus einer Überflugsimulation mit PropNoise beim Zertifizierungspunkt während des Anflugs.

In Abb. 4(a) ist die Abstrahlcharakteristik des tonalen Nachlaufinteraktionslärms für 11 Rotorschaufeln

und 13 Statorschaufeln im Betriebspunkt Anflug dargestellt. Die vorhergesagte Richtcharakteristik ist von der Schallabstrahlung der ersten, zweiten und dritten Blattfolgefrequenz des Rotors (BPF1, BPF2 und BPF3) dominiert. Die Charakteristik dient als Eingangsgröße für die virtuelle Überflugsimulation. In Abb. 4(b) sind die zeitabhängigen Schalldruckpegel aus der virtuellen Überflugsimulation gezeigt. Der Schalldruckpegel (SPL) ist die Summe der Pegel aller dominanten Quellen: Tonaler Nachlaufinteraktionslärm, Breitband-Nachlaufinteraktionslärm und tonaler Potentialfeldlärm. Auf die SPL-Daten ist die atmosphärische Dämpfung (SPL AD) und die A-Bewertung (SPL AD dB(A)) angewendet. Die PNL- und PNLT-Daten beschreiben die empfunden und ton-korrigierten empfundenen Schallpegel. Der Beobachter wird nach einer Flugzeit von 10.9 s überflogen. Zu diesem Beobachtungszeitpunkt beträgt der Abstand zur Flugbahn 121 m. Der Vergleich der ton-korrigierten mit den empfundenen Schallpegeln zeigt, dass der virtuelle Überflug von tonalen Schallquellen dominiert wird. Jedoch ist aus anderen Studien mit PropNoise bekannt, dass die Turbulenz in den Rotornachläufen und damit auch der Breitband-Interaktionslärm tendentiell unterschätzt wird.

Einfluss der Metrik auf die Ergebnisse der Schaufelzahlvariation

Die Auswirkung der Anwendung der lärmbasierten Metrik auf eine Variation der Statorschaufelanzahl für den Zertifizierungspunkt Überflug ist in Abb. 6 dargestellt. Der Schallleistungspegel (PWL) ist die Summe der Pegel der dominanten Quellen. Die zugrunde liegende Schaufelzahlvariation wurde bei konstantem Teilungsverhältnis durchgeführt. Der axiale Abstand zwischen Rotorhinterkante und Statorvorderkante ist für jede Konfiguration identisch. Folgende Effekte sind gekennzeichnet:

a) **BPF1 invers cut-off** Bereich.

b) **BPF1 cut-off** Grenze. Diese fällt in den den invers cut-off Bereich der BPF2 (siehe c)).

c) **BPF2 invers cut-off** Bereich.

d) **BPF3 invers cut-off** Bereich.

e) **BPF2 cut-off** Grenze.

f) **BPF3 cut-off** Grenze.

g) **BPF4 cut-off** Grenze.

h) Der Phasenausbreitungswinkel der **dominanten, ausbreitungsfähigen BPF1 Mode** ist kongruent zum Stator-Vorderkantenwinkel. Dadurch steht die Ausbreitungsrichtung der Mode nahezu senkrecht zur Dipol-Abstrahlungsachse, sodass eine schwache Anregung erfolgt.

i) Der Phasenausbreitungswinkel der **dominanten, stromauflaufenden BPF2 Mode** ist im Bereich des Stator-Vorderkantenwinkels. Dadurch wird die Dipolquelle nur schwach angeregt.

Anhand von Abb. 5 und Abb. 6 können drei Effekte analysiert werden: Die Lästigkeit des Lärms, der Einfluss der Ton-Korrektur und der Einfluss der Zeit-Korrektur.
Für jede Schaufelzahlkonfiguration zeigt der Unterschied zwischen den maximalen empfunden Schallpegeln (PNLM-Daten) und den Pegeln unter Anwendung der atmosphärischen Dämpfung (SPL AD) die Lästigkeit der Schalleinwirkung. Diese steigt in den cut-off und invers cut-off Bereichen der ersten und zweiten Blattfolgefrequenz sprunghaft an. Weiterhin zeigt sich ein Anstieg mit steigender Statorschaufelzahl. Der Grund ist, dass die Umrechnung von Schalldruckpegeln zu empfundenen Schallpegeln durch das Frequenzband der dominanten Blattfolgefrequenz bestimmt wird. In Bereichen, in denen die Moden der BPF1 und BPF2 nicht ausbreitungsfähig sind, dominieren die BPF3 und BPF4 die Schallabstrahlung. Diese liegen im Frequenzbereich, in dem das menschliche Gehör besonders sensitiv ist, was durch einen Anstieg der Lästigkeit widergespiegelt wird. Die Folge ist, dass für eine entsprechende Schaufelzahlkonfiguration die bewerteten Pegel, trotz reduzierter Schallleistung, größer werden.

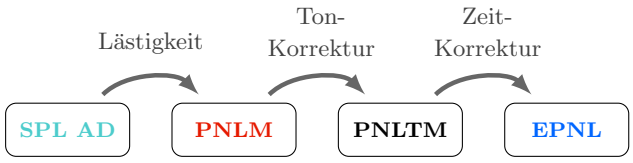


Abbildung 5: Prozesskette zur Berechnung der Schallpegel.

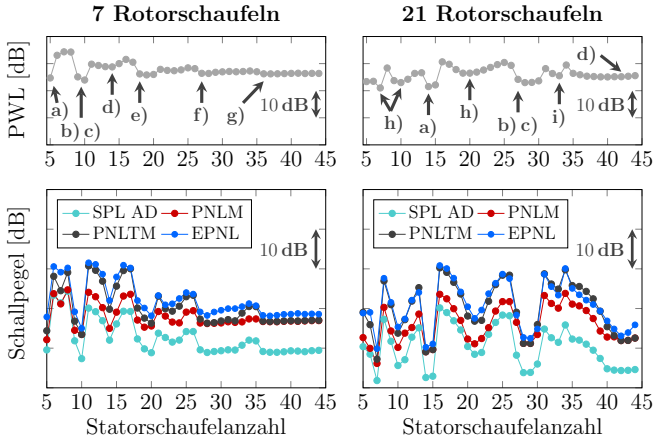
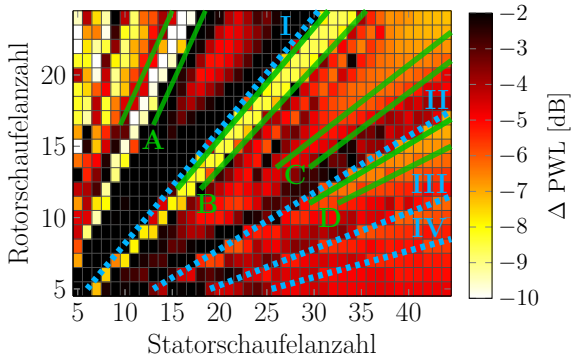


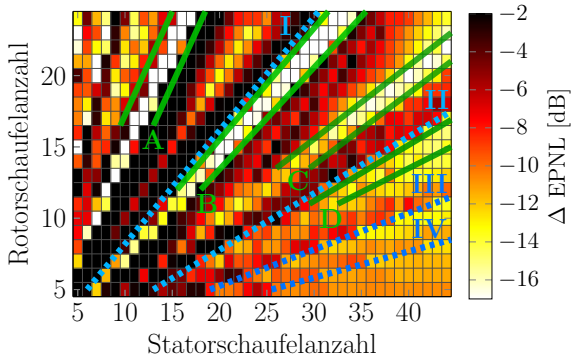
Abbildung 6: Einfluss der gewählten Metrik auf eine Statorschaufelzahlvariation bei gewählter Rotorschaufelzahl für den Referenzpunkt Überflug (Betriebspunkt „Cutback“).

Der Unterschied zwischen den PNLTM- und PNLM-Daten zeigt die Größenordnung der Pegelkorrektur aufgrund tonaler Peaks. Drei Bereiche werden durch die Anwendung der Metrik, insbesondere von der Ton-Korrektur, deutlich begünstigt: Cut-off und invers cut-off Bereiche sowie Konfigurationen mit hoher Statorschaufelanzahl. Als Beispiel, für die Konfiguration mit 21 Rotorschaufeln und 15 Statorschaufeln sind die Moden der ersten und zweiten Blattfolgefrequenz nicht ausbreitungsfähig. Dadurch hat der Breitbandanteil des Nachlaufinteraktionslärms ähnliche Pegel wie der tonale Anteil, was sich vor allem aus zwei Gründen vorteilhaft auf die Lärmbewertung auswirkt. Einerseits werden die

hohen Frequenzen des Breitbandspektrums stark atmosphärisch gedämpft. Andererseits sind Überhöhungen diskreter Töne gegenüber den Breitbandpegeln minimal, sodass nahezu keine tonale Pegelkorrektur erfolgt.
Konfigurationen mit hoher Statorschaufelanzahl sind begünstigt, da mit zunehmender Statorschaufelanzahl der Breitbandanteil des Nachlauf-Interaktionslärms tendentiell zur dominanten Lärmquelle wird. Dementsprechend wird keine tonale Pegelkorrektur aufgeschlagen.
Ein Vergleich zwischen den EPNL- und PNLTM-Daten verdeutlicht, welche Konfigurationen durch die Korrektur der Dauer der Schalleinwikung begünstigt sind. Für den Zertifizierungspunkt „flyover“ liefert die virtuelle Überflugsimulation eine Dauer der Schalleinwirkung $d \geq T = 10\,\mathrm{s}$, sodass für den Faktor der Zeitkorrektur $D \geq 0$ gilt und die EPNL-Werte höher als die PNLTM-Werte sind (siehe Gl. 1 und Gl. 2). Die vorhergesagte Größenordnung der Dauer der Schalleinwirkung für den Referenzpunkt Überflug wird in [2] bestätigt.



(a) ohne Überflug



(b) virtueller Überflug

Abbildung 7: Einfluss der lärmbasierten Metrik auf eine Rotor- und Statorschaufelzahlvariation für den Referenzpunkt Überflug (Betriebspunkt „Cutback“). Die Pegel sind auf die lauteste Konfiguration bezogen.

Abb. 7 zeigt den Einfluss der EPNL-Metrik auf die gesamte Parameterstudie. Die Daten sind auf den Schallpegel der lautesten Konfiguration bezogen. In Abb. 7(a) erfolgt die Lärmbewertung unter Verwendung der Schallleistung. Diese ist die Summe der Schallleistungspegel der dominanten Schallquellen. Die blau markierten Grenzen stellen jeweils die cut-off Bereiche (I−IV), in denen die Moden der ersten, zweiten, dritten und vierten Blattfolgefrequenz nicht mehr ausbreitungsfähig sind, dar. Die invers cut-off Bereiche der jeweiligen Blattfolgefrequenzen sind grün markiert (A−B). Die Anwendung der lärmbasierten Metrik auf die virtuelle Simulation des Referenzpunktes Überflug ist in Abb. 7(b) dargestellt. Neben den anhand von Abb. 6 ausgearbeiteten Designräumen, scheinen ausgewählte Konfigurationen mit niedriger Statorschaufelanzahl und hoher Rotorschaufelanzahl günstig zu sein („low count OGV“ Design). Einerseits ist für diese Konfigurationen der Breitbandanteil, aufgrund der niedrigen Statorschaufelanzahl, gering. Andererseits ist der Phasenausbreitungswinkel, insbesondere der stromauflaufenden Mode, kongruent zum Stator-Vorderkantenwinkel, sodass die Dipolquelle nur schwach angeregt wird.

Fazit

Für die untersuchte, langsam drehende Fanstufe hat die Anwendung der lärmbasierten Metrik den Bereich der geringsten Schallemission nicht zu anderen Schaufelzahlpaarungen verlagert. Die Trends der Schallleistungspegel wurden reproduziert, jedoch deutlich verstärkt, sodass die Differenz zwischen besonders leisen und lauten Konfigurationen anwächst. Die EPNL-Bewertung hebt cut-off und invers cut-off Bereiche hervor. Insbesondere der invers cut-off Bereich der ersten Blattfolgefrequenz scheint im Hinblick auf die Zertifizierung vielversprechend zu sein. Basierend auf der gezeigten Studie können niedrige EPNL-Werte erzielt werden, wenn der Breitbandanteil des Nachlaufinteraktionslärms gegenüber dem tonalen Anteil dominiert, da die hohen Frequenzen des Breitbandspektrums eine starke atmosphärische Dämpfung erfahren und Überhöhungen diskreter Töne gegenüber den Breitbandpegeln minimal werden, sodass keine tonale Pegelkorrektur erfolgt.

Literatur

[1] Jaron, R.: Vorauslegung einer Rotor-Stator-Stufe mit Hilfe von semi-analytischen Tools. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, 2010

[2] Bräunling, W. J. G.: Flugzeugtriebwerke. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

[3] Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Environmental Protection, Volume I, Aircraft Noise, International Civil Aviation Organization, Juli 2008

[4] Guérin, S.: Farfield Radiation of Induct-Cutoff Pressure Waves. AIAA AVIATION Forum (2017), AIAA 2017-403

[5] Moreau, A. und Guérin, S.: Development and application of a new procedure for fan noise prediction. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2010), AIAA 2010-4034

[6] Moreau, A.: A unified analytical approach for the acoustic preliminary design of modern aero-engine turbofans. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2017

[7] ISO 9613-1: Akustik; Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft. Norm, 1993