CAA-basierte Schallvorhersage für Windkraftanlagen

Christina Appel, Benjamin Fassmann, Shy-Yea Lin, Michaela Herr
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Abteilung Technische Akustik, Braunschweig

Einleitung und Motivation

Im Rahmen des **I**nternational **E**nergy **A**gency Wind **T**echnology **C**ollaboration **P**rogramme (IEA Wind TCP) Task 39 (Quiet Wind Turbine Technology) wurde ein Benchmark für die Schallvorhersage von Windenergieanlagen initiiert [1]. An diesen Arbeiten ist das DLR über das HGF-finanzierte Projekt ViSion (Validierung von Simulationswerkzeugen zur Beschreibung von Windenergieanlagen) beteiligt. Ziel ist zunächst die Vorhersage des die Gesamtschallabstrahlung dominierenden Hinterkantengeräuschs für eine 2,3 MW NM80 Windkraftanlage und Vergleich mit Messungen, die im EU-Projekt DANAERO MW [2] stattgefunden haben. Eingesetzt wird dabei eine Prozesskette, die den Rotor in einzelne Segmente zerlegt, für die dann jeweils 2D CAA-Simulationen (Computational Aeroacoustics) durchgeführt werden [3]. Hierbei werden die Drehung des Rotors, die damit verbundene Amplitudenmodulation und die Variation des Abstands zum Auswertepunkt für die einzelnen Rotorblattabschnitte berücksichtigt. Die einzelnen Beiträge der Blattsegmente des gesamten Rotors werden abschließend summiert und über den Rotorumlauf gemittelt. Als Auswertepositionen lassen sich neben beispielsweise der Zertifizierungsposition gemäß IEC-64100-11-Standard auch beliebige im Raum verteilte Positionen spezifizieren, um Geräuschsignaturen auszuwerten.

2D Berechnungskette für Hinterkantengeräusch

Um für eine Anlage eine Vorhersage zu erstellen, werden aus dem Rotorblatt im Bereich des äußeren Drittels mehrere charakteristische Profilschnitte extrahiert. Für den jeweiligen Betriebspunkt werden mit Hilfe eines Blattelemente-Verfahrens (BEM) oder durch Abgleich der Druckverteilung aus einer 3D Strömungssimulation (CFD) die effektiven Anstellwinkel und die lokalen Anströmgeschwindigkeiten für die Blattschnitte bestimmt. Für die so ermittelten Strömungsbedingungen werden 2D RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) Simulationen mit dem DLR TAU Code durchgeführt. Die daraus ermittelten Turbulenzstatistiken werden verwendet, um mit dem stochastischen Quellmodell FRPM [4] (Fast Random Particle Mesh Method) zeitlich fluktuierende akustische Quellen zu modellieren. Verwendet wird eine Wirbelschallquelle, in welcher der linearisierte Lambvektor (Glg. 1) modelliert wird. Der Index 0 bezeichnet dabei die Größen der Grundströmung, der Index t die der Turbulenzstatistik. ϵ_{ijk} ist das Levi-Civita Symbol.

$$L_i' = -\epsilon_{ijk}\omega_j^0 v_k^t - \epsilon_{ijk}\omega_j^t v_k^0 \qquad (1)$$

In der Schallausbreitungsrechnung mit dem DLR Code PIANO wird das sich ausbreitende Schallfeld basierend auf den modellierten Quellen simuliert. Die Grundströmung wird bei der Ausbreitung ebenfalls berücksichtigt. Für die Modellierung der Wirbelschallquellen wird die Drehung der Grundströmung aus der RANS Lösung bestimmt, die turbulente Geschwindigkeiten v_k^t werden mit FRPM modelliert und daraus auch die fluktuierende Vorticity ω_j^t berechnet. Ausgewertet werden die Simulationen an virtuellen Mikrofonen, die kreisförmig mit einem Radius von 2,5 Sehnenlängen um die Hinterkante verteilt sind. Dies erlaubt neben der Auswertung in Einzelspektren auch die Bestimmung von Richtcharakteristiken.

Summation und Extrapolation

Nachdem die 2D CAA Simulationen für alle benötigten Schnitte durchgeführt worden sind, kann die Extrapolation für die Gesamtanlage erfolgen. Neben den geometrischen Randbedingungen wie Turmhöhe, radiale Position der ausgewählten 2D Schnitte, Anzahl der Blätter, Precone und Tilt Winkel, sowie Umdrehungs- und Windgeschwindigkeit, werden auch die Richtcharakteristiken für den Gesamtschalldruckpegel (OASPL, Overall Sound Pressure Level) aus der CAA Simulation eingelesen. Weiter werden Beobachterpositionen oder Gruppen von Auswertepunkten für Schallsignaturen definiert.

Die Beobachterpositionen sind beliebig im Raum in einem stationären Koordinatensystem, das seinen Ursprung in der Rotornarbe hat (Index O), definiert. Weiter wird ein rotierendes Koordinatensystem, dessen Ursprung am jeweiligen Hinterkantenpunkt des Blattelements lokalisiert ist (Index E), definiert. Die Aufgabe besteht nun darin, die Transformation von einem ins andere Koordinatensystem durchzuführen und die Beobachterpunkte bezüglich des rotierenden Systems anzugeben und abschließend in Polarkoordinaten umzuwandeln. Diese komplexe Transformation wird zerlegt in mehrere einfache Starrkörperbewegungen in Form von Rotationen und Verschiebungen. Um dies zu bewerkstelligen verwenden, wir eine affine Transformationsmatrix, in der alle Transformationen mit jeweils einer Matrixmultiplikation abgebildet werden können. Damit kann die komplexe Koordinatentransformation sehr elegant in einer Gleichung (Glg. 2) ausgedrückt werden. Im Einzelnen sind die folgenden Bewegungsschritte berücksichtigt:

- Drehung um den Tilt-Winkel $\longrightarrow T_{Tilt}$
- Drehung des Rotors $\longrightarrow T_{Rot}$
- Drehung um den Precone-Winkel $\longrightarrow T_{Prec}$

- Drehung um den Pitch-Winkel $\longrightarrow T_{Pitch}$
- Verschiebung um die radiale Position des Blattschnittes $\longrightarrow T_{Rad}$
- Drehung um den Twist-Winkel $\longrightarrow T_{Twist}$
- Verschiebung vom Fädelpunkt (0,75 Sehnenlänge) des Profils zur Hinterkante $\longrightarrow T_{TE}$

Der Hinterkantenpunkt bezüglich eines Beobachters ergibt sich dann aus der Multiplikation der Inversen der einzelnen Transformationsmatrizen mit dem Ortsvektor des Beobachters.

$$\mathbf{X_E} = T_{Tilt}^{-1} T_{Rot}^{-1} T_{Prec}^{-1} T_{Pitch}^{-1} T_{Rad}^{-1} T_{Twist}^{-1} T_{TE}^{-1} \mathbf{X_0} \tag{2}$$

Dieses Ergebnis lässt sich in den Polarwinkeln ϕ und θ und dem Abstand r zum Beobachter ausdrücken. Die Abb.1 aus [5] nach Ffowcs Williams und Hall [6] veranschaulicht den Zusammenhang.

$$\mathbf{X_E} = (x_e, y_e, z_e) \tag{3}$$

$$r = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \tag{4}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{y_e}{r}\right) \tag{5}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{x_e}{z_e}\right) \tag{6}$$

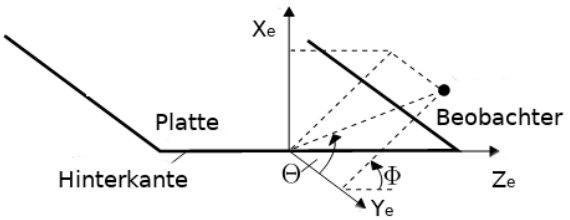

Abbildung 1: Strömung über eine halb-unendliche Platte [5]. Aufgetragen sind die Polarwinkel ϕ und θ bezüglich eines Beobachters.

Mit diesen Informationen lässt sich der OASPL-Beitrag des jeweiligen Segments berechnen. Der Abstrahlwinkel ergibt sich aus $\theta + \alpha_{eff}$, dem effektiven Anstellwinkel des Blattsegments. Damit kann der korrekte OASPL aus der Richtcharakteristik ausgewählt werden. Die Minderung des Pegels infolge des Abstandes wird mit $20\log(r/r_{Mic})$ berechnet. r_{Mic} ist dabei der Radius des Mikrofonkreises in der CAA Simulation. Der Effekt, dass die CAA Richtcharakteristik 2D, aber das Blattsegment 3D ist, kann mit dem Polarwinkel ϕ ausgedrückt werden. Nach [6] skaliert die Schallintensität einer halb-unendlichen Platte mit $\sin(\phi)$. Weiterhin wird eine 2D/3D-Korrektur der Fernfeld-Schalldruckpegel für die einzelnen Blattelemente durchgeführt, die die Spannweite der Blattsegmente berücksichtigt. Dies ist in [7] näher erläutert.

Die konvektive Verstärkung infolge der Rotorbewegung wird als Skalierung der Direktivität D nach Brooks und Burley [8] berücksichtigt. Dabei ist ξ der Winkel zwischen dem Vektor der Blattanströmung und der Verbindungslinie Hinterkante - Beobachter. Ma_{tot} ist die Machzahl der Blattumströmung.

$$D \propto \frac{1}{(1 - Ma_{tot}\cos(\xi))^4} \tag{7}$$

Ergebnisse

Die praktische Anwendung des Verfahrens erfolgt im Rahmen des IEA Wind TCP Task 39 Benchmarks. Im Vorfeld wurden experimentelle Untersuchungen an einer NM80 2,3 MW Windkraftanlage (Abb. 2 links) im EU-Projekt DAN-AERO [2] durchgeführt. Das CAD Modell des Rotors ist in Abb. 2 rechts dargestellt. Die Linien mit den Markierungen c1 bis c16 kennzeichnen die charakteristischen Profilschnitte. Bearbeitet wurden mit dem im obigen Abschnitt vorstellten Verfahren jedoch nur die Schnitte c1 bis c10. Insbesondere die Schnitte c13 bis c16 weisen auf Grund der großen Profildicke Ablösungen auf, deren Effekt auf das Hinterkantengeräusch mit dem eingesetzten CAA Verfahren nicht erfasst werden kann. Des Weiteren ist der Beitrag zum Hinterkantengeräusch wegen der deutlich verminderten Umströmungsgeschwindigkeiten im Innenbereich auch geringer. Bis zum Schnitt c12 ist die Strömung aber anliegend. Die effektiven Anstellwinkel und Anströmgeschwindigkeiten wurden ermittelt, indem die 2D Ergebnisse mit einer 3D CFD Simulation des rotierenden Rotors verglichen wurden. Der Anstellwinkel wurde jeweils solange modifiziert, bis die Druckbeiwerte im 2D Schnitt den extrahierten Werten aus der 3D CFD Simulation entsprachen. Eine direkte Verwendung der 3D Rechnungen ist wegen der stark unterschiedlichen Gitteranforderungen für die Verwendung als CAA Input nicht möglich. Die Anströmgeschwindigkeit wurde ebenfalls mit den Werten aus den Schnitten der 3D Rechnung abgeglichen. Insofern ist der Effekt der induzierten Geschwindigkeiten am Rotor mitberücksichtigt. Im späteren Verlauf der Benchmark-Teilnahme sollen allerdings auch Daten aus einer BEM eingesetzt werden.

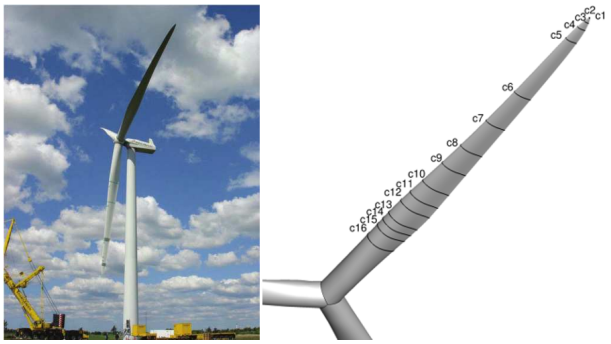

Abbildung 2: Links: NM80 2,3 MW Windkraftanlage, vermessen im Projekt DAN-AERO MW [2]. Rechts: CAD Geometrie des Rotors mit den charakteristischen Profilschnitten c1 bis c16.

Für die Schnitte c1 bis c8 ist in Abb. 3 die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie (TKE) dargestellt. Alle Abbildungen sind gleich skaliert. Die RANS Simulationen werden unter Nutzung dimensionsbehafteter Größen

durchgeführt, die CAA Rechnungen hingegen dimensionslos. Die Profillänge ist daher in Abb. 3 bereits auf 1.0 mit der jeweiligen Sehnenlänge normiert. Man erkennt die Zunahme der Profildicke im Innenbereich. Gleichzeitig nehmen die relativen Werte der TKE wegen den geringeren Anströmgeschwindigkeiten ab. Für den Schnitt c8 liegt der maximale TKE-Wert bereits um etwa den Faktor 4 niedriger.

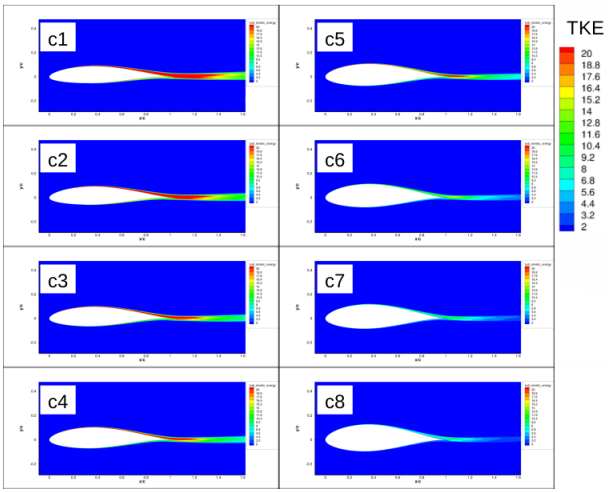

Abbildung 3: Turbulente kinetische Energie in m^2/s^2 für die Profilschnitte c1 bis c8.

In Abb. 4 sind die mit PIANO/FRPM berechneten Terzspektren der Profilschnitte c1 bis c10 dargestellt. Die Spektren sind normiert auf einen Abstand von 1m und einer Spannweite von ebenfalls 1m. Im Verlauf von der Rotorblattspitze (c1) zur Innenbereich (c10) erkennt man, dass sich das Maximum der Terzspektren von etwa 1.1 kHz zu 150 Hz zu kleineren Frequenzen verschiebt. Auch die maximalen Pegel variieren zwischen 56 und 65 dB. Die höchsten Werte werden im Außenbereich bei den Schnitten c3 bis c5 erreicht. Noch weiter außen sind die Anströmgeschwindigkeiten zwar höher, aber die Sehnenlängen deutlich geringer und damit der Anteil am Hinterkantengeräusch auch geringer. Im weiteren Verlauf verringert sich der maximale Pegel zusehends. Ab dem Schnitt c8 liegen die Werte unterhalb von 60 dB. Diese Profilschnitte werden bei Summation des Schalls für die Gesamtanlage zunächst weggelassen.

Des Weiteren sollen im Benchmark Daten für zwei Einzelpositionen gemäß IEC-64100-11-Standard vorhergesagt werden. Die Abb. 5 zeigt das Ergebnis für die Extrapolation auf einen Punkt, der sich stromabwärts auf Nabenhöhe und in einer Entfernung von Turmhöhe addiert mit dem Rotorradius, also insgesamt 100m Entfernung, befindet. Aufgetragen ist der OASPL-Wert über den Rotorazimut von 0° bis 360°. Der Azimutwinkel gibt dabei die Position des ersten Blattes an. 0° entspricht senkrecht nach oben. Die farbigen Linien sind die aufsummierten Werte des OASPL über die drei Rotorblätter jeweils für eine radiale Position. Die schwarze Linie ist die Summe für alle radialen Positionen und Blätter. Durch die Lage der Beobachterposition auf Nabenhöhe ergibt sich ein konstanter Wert über den Rotorumlauf. Für den Zertifizierungspunkt im gleichen Abstand stromabwärts aber auf dem Erdboden (Abb. 6) vollzieht der OASPL eine Schwingung über den Rotorumlauf.

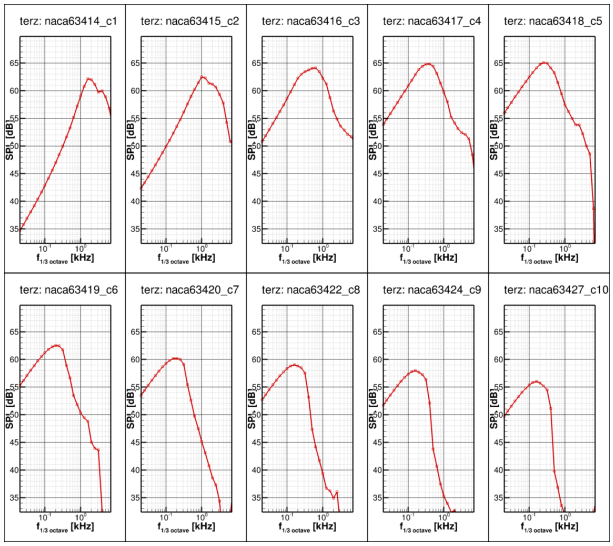

Abbildung 4: Terzspektren der einzelnen Profilschnitte c1 bis c10. Die Mikrofonpositionen befindet sich senkrecht zur lokalen Anströmung unterhalb der Hinterkante, d.h. $\theta = 270°$ (Beobachterwinkel: $270° + \alpha_{eff}$)

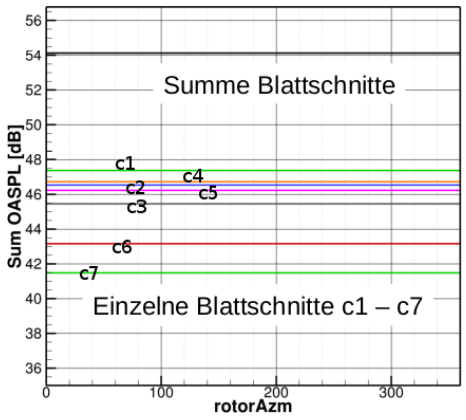

Abbildung 5: Ergebnis der Extrapolation für ein Mikrofon auf Nabenhöhe im Abstand von 100m. OASPL-Wert im Verlauf des Rotorumlaufs. x-Achse: Rotorazimut für das erste Blatt. Farbigen Linien: Beiträge der radialen Positionen aufsummiert über Rotorblätter. Schwarze Linie: stellt die Summe über alle Positionen und Blätter dar.

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung ist die Definition von ganzen Gruppen von Mikrofonpositionen als Schallsignatur. Dies ist in den Abbildungen 7 und 8 exemplarisch dargestellt. Über eine Fläche von rund 100m x 100m sind gleichmäßig 420 Auswertepunkte verteilt. Für diese Punkte werden jeweils die Abstrahlwinkel und zugehörigen aufsummierten OASPL-Werte bestimmt. Das abgespeicherte Datenfeld wird über den Rotorumlauf gemittelt und trianguliert. Die Auswertepositionen können beliebig verteilt werden.

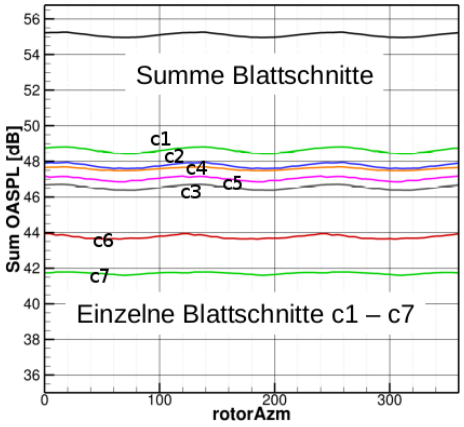

Abbildung 6: Ergebnis der Extrapolation für ein Mikrofon auf dem Erdboden im Abstand von 100m. OASPL-Wert im Verlauf des Rotorumlaufs. x-Achse: Rotorazimut für das erste Blatt. Farbigen Linien: Beiträge der radialen Positionen aufsummiert über Rotorblätter. Schwarze Linie: stellt die Summe über alle Positionen und Blätter dar.

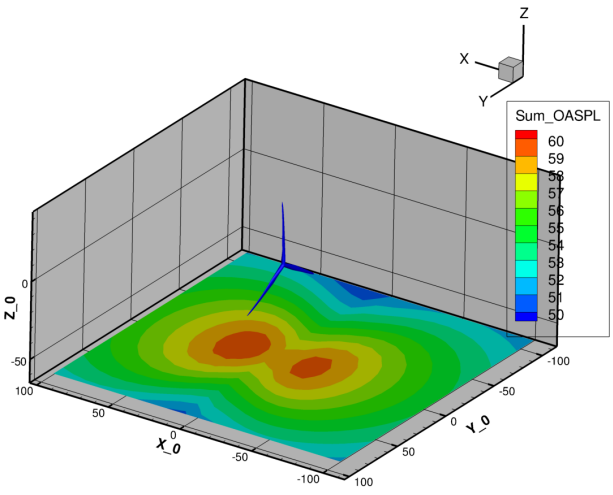

Abbildung 7: Darstellung des gemittelten und über alle betrachteten radialen Schnitte und Rotorblätter aufsummierten OASPL als Schallsignatur auf dem Erdboden bei -60m. Der Rotor befindet sich im Ursprung bei (x,y,z)= (0,0,0).

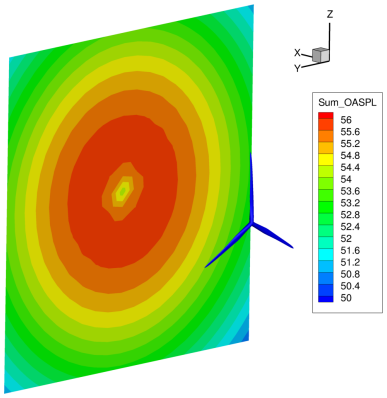

Abbildung 8: Darstellung des gemittelten und über alle betrachteten radialen Schnitte und Rotorblätter aufsummierten OASPL als Schallsignatur 100m stromabwärts des Rotors. Der Rotor befindet sich im Ursprung bei (x,y,z)= (0,0,0).

Zusammenfassung und Ausblick

In Rahmen dieser Arbeit wurde basierend auf der 2D CFD/CAA-Berechnungskette für Hinterkantengeräusch ein Verfahren vorgestellt, mit dem schnelle Schallvorhersagen für eine gesamte Windkraftanlage an beliebigen Beobachterpositionen gemacht werden können. Dazu verwendet das Verfahren Richtcharakteristiken aus dem hybriden CAA Verfahren PIANO/FRPM. Es werden die Abstrahlwinkel für die Hinterkantenpunkte bezüglich der Auswertepositionen bestimmt und so die OASPL-Werte aus der Richtcharakteristik mit dem richtigen Abstand und Normierung für dreidimensionale Blattsegmente aufsummiert und über den Rotorumlauf gemittelt. Weiter wird die konvektive Verstärkung in Folge der Blattbewegung berücksichtigt. In Zukunft wäre eine direkte Verwendung von Daten aus einer Blattelementenmethode sinnvoll, um schneller die aerodynamischen Randbedingungen festzulegen. Es ist auch denkbar, anstelle des OASPL-Wertes einzelne Terzbänder zu verwenden. Dies würde eine spektrale Analyse über den Rotorumlauf an den Beobachterpositionen ermöglichen.

Literatur

[1] Bertagnolio, F., Madsen, H., Hornung, C., Schepers, G.: IEA Wind Task 39 – Quiet Wind Turbine Technology, Wind Turbine Noise Code Benchmark (Phase I), 2019.

[2] Madsen, H., Fuglsang, P., Romblad, J., Enevoldsen, P., Larsen, J., Jensen, L., Bak, C., Paulsen, U., Gaunna, M., Sorensen, N., Olsen, N.: The DAN-AERO MW Experiments, AIAA 2010-645.

[3] Rautmann, C., Dierke, J., Ewert, R., Hu, N.: Generic Airfoil Trailing-Edge Noise Prediction using Stochastic Sound Sources from Synthetic Turbulence, AIAA 2014-3298.

[4] Ewert, R.: RPM - the fast Random Particle-Mesh method to realize unsteady turbulent sound sources and velocity fields for CAA applications, AIAA 2007-3506.

[5] Rautmann, C.: Numerical Simulation Concept for Low-Noise Wind Turbine Rotors, DLR Forschungsbericht 2017-35.

[6] Ffowcs Williams, J. E., Hall, L.H.: Aerodynmaic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering plane. JFM, 40, No. 4, 1970.

[7] Ewert, R., Appel, C., Dierke, J., Herr, M.: RANS/CAA Based Prediction of NACA 0012 Broadband Trailing Edge Noise and Experimental Validation, AIAA 2009-3269.

[8] Brooks, T. F., Burley, C. L.: Rotor Broadband Noise Prediction with Comparison to Model Data, AIAA 2001-2210.