

Akustische Messungen an einem offenen gegenläufigen Rotor in einem offenen Windkanal

Stefan Funke, Larisa Kim und Henri Siller

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik,
Abteilung Triebwerksakustik, Müller-Breslau-Str. 8, 10623 Berlin, stefan.funke@dlr.de

Einleitung

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts DREAM fanden aeroakustische Messungen an einem Modell eines offenen gegenläufigen Rotors (CROR) im offenen Windkanal T-104 bei TsAGI in Zhukovsky, Russland statt. Die hier dargestellten Ergebnisse sollen den Einfluss der Windkanalscherschicht und der reflektierenden Umgebung auf die Messungen beschreiben.

Messaufbau

Abbildung 1 zeigt den Versuchsstand und den Windkanal mit der 13 m langen offenen Teststrecke. Der Durchmesser der Düse beträgt 7 m. 103 Mikrofone waren außerhalb der Strömung parallel zur Windkanalachse auf dem schallharten Boden der Versuchshalle mit einem konstanten Abstand $\Delta x = 15$ cm angeordnet. Das Mikrofonarray erfasste einen Winkelbereich von 70° bis 125° relativ zur Rotorposition und der Windkanalachse. Der Abstand der Mikrofone zur Windkanalachse betrug 14 m. Die Wände der Versuchshalle waren überwiegend schallhart.

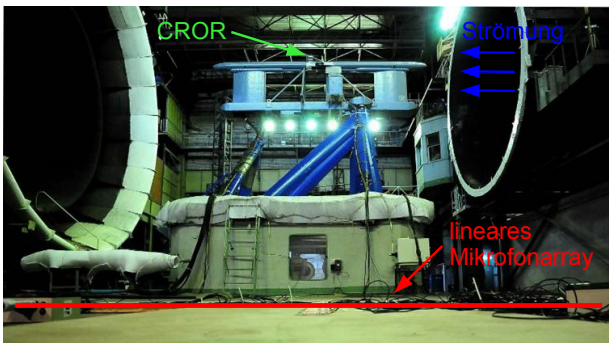


Abbildung 1: Offener gegenläufiger Rotor im offenen Windkanal T-104 bei TsAGI

Einflüsse der Windkanalscherschicht und der reflektierenden Umgebung

Die turbulente Scherschicht des Windkanals bewirkt die Brechung und die Abschwächung des Schalls bei der Ausbreitung von den Rotoren innerhalb der Strömung zu den Mikrofonen außerhalb der Strömung. Das von Amiet in [1] beschriebene Modell einer ebenen, unendlich dünnen Scherschicht ist ein gängiges Werkzeug für entsprechende Korrekturen und soll hier angewendet werden.

Messungen der Raumimpulsantworten (IR) zeigen für alle Mikrofonpositionen eine Reflexion von der Decke der Versuchshalle mit einem Schalldruckpegel von ca. -7 dB relativ zum Direktschall. Weit stromauf und stromab

positionierte Mikrofone werden zusätzlich durch starke Reflexionen von den seitlichen Wänden der Versuchshalle beeinflusst. Bei den Messungen des CROR verursacht die Überlagerung des Direktschalls des Rotors mit den Reflexionen frequenzabhängige Schwankungen der lokal gemessenen Schalldruckpegel. Eine Korrektur mit den gemessenen IR ist nicht möglich, weil diese lediglich ohne Windkanalströmung und die damit verbundene Änderung der Ausbreitung durch die Windkanalscherschicht gemessen werden konnten. Die Simulation der Impulsantworten für die energiereichen ersten Reflexionen durch die Überlagerung der komplexwertigen Übertragungsfunktionen entsprechender Spiegelschallquellen wurde in [3] dargestellt. Für den vorliegenden Fall wird diese Betrachtung um die Ausbreitung durch die Windkanalscherschicht erweitert. Aufgrund des vereinfachten Scherschichtmodells sind jedoch Fehler in der Größenordnung der Wellenlänge im relevanten Frequenzbereich $f > 1$ kHz zu erwarten. Bei der Auswertung einzelner Mikrofonensignale führt dies zu Amplitudenfehlern, eine Verbesserung der Schallquellenlokalisierung mit Array-Verfahren konnte jedoch, wie unten dargestellt, gezeigt werden.

Auswertung

Abbildung 2 zeigt das über alle gemessenen Emissionswinkel gemittelte Spektrum des Rotorgeräuschs. Das Hintergrundgeräusch der Versuchsanordnung dominiert im tieffrequenten Bereich bis zu den Frequenzen der Blattfolgetöne. Die Richtcharakteristik des Blattfolgetons 1F ist in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt. Die Interferenz mit den Reflexionen der Testhalle verursacht starke räumliche Schwankungen bis 8 dB zwischen benachbarten Mikrofonpositionen. Um diesen Effekt zu minimieren, kann die akustische Beschreibung unterschiedlicher Rotorkonfigurationen also nur durch die Mittelung über mehrere Mikrofonpositionen oder durch erweiterte Array-Signalverarbeitung erfolgen. Die Korrektur mit si-

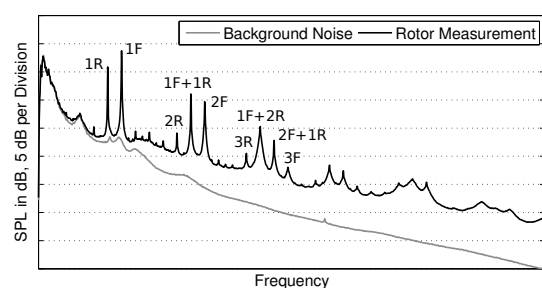


Abbildung 2: Spektrum des CROR-Geräuschs

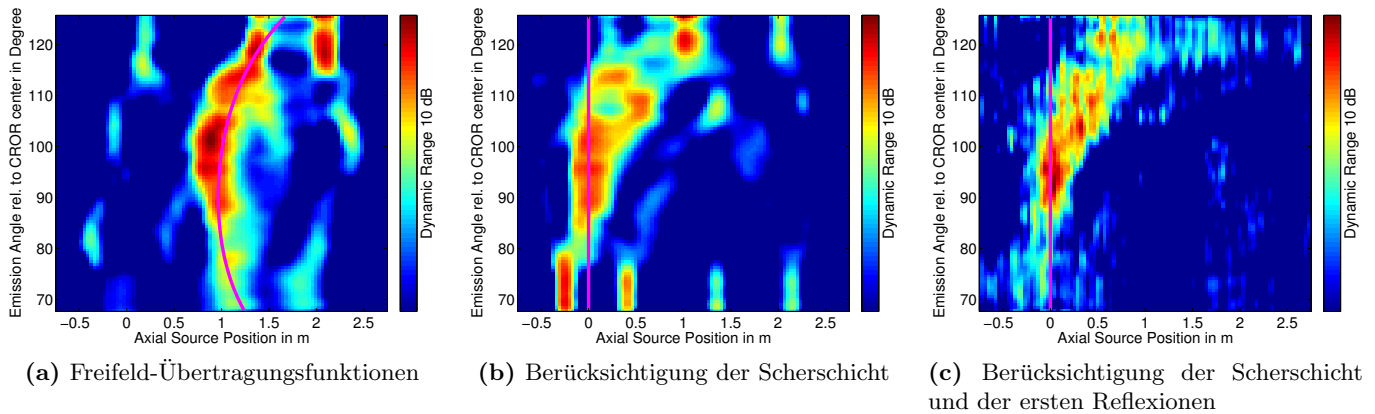


Abbildung 3: Aus den Arraymessungen mit SODIX modellierte Verteilung der breitbandigen Schallquellen des CROR, die nach [1, 2] von den Mikrofonen „gesehene“ axiale Position der Schallquelle ist für die drei verschiedenen Modelle der Übertragungsfunktionen magenta markiert, die tatsächliche Rotorposition ist $x = 0$ m

mulierten IR ist wie oben beschrieben für einzelne Mikrofone aufgrund des vereinfachten Scherschichtmodells zu ungenau.

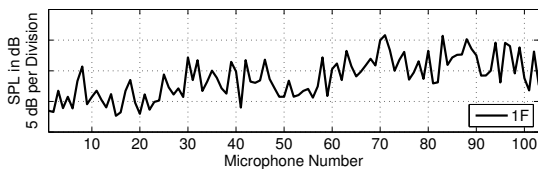


Abbildung 4: Richtcharakteristik des Blattfolgetons 1F

Die Hinlänglichkeit des in [1] beschriebenen Scherschichtmodells kann mit Schallquellenlokalisierungsverfahren überprüft werden. Klassisches Beamforming liefert aufgrund der räumlichen Mittelung über viele Mikrofonpositionen nur begrenzte Informationen. Besser geeignet ist das in [4] beschriebene Verfahren SODIX, das breitbandige Schallquellen mit einer hoch aufgelösten Richtcharakteristik aus den gemessenen Kreuzleistungsspektren modellieren kann. Nachfolgend wird das Breitbandgeräusch zwischen 1F und 1R (s. Abb. 2) betrachtet. Die zu modellierenden Punktschallquellen werden entsprechend des auf die x-Dimension begrenzten Auflösungsvermögens des Linienarrays auf der Achse des CROR angenommen. Abbildung 3 zeigt die mit SODIX modellierten Quellverteilungen für drei unterschiedliche Modelle der Übertragungsfunktionen. Für Abbildung 3a wurden Freifeldübertragungsfunktionen ohne Berücksichtigung der Scherschicht und der Raumakustik benutzt. Trotz des in diesem Frequenzbereich schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses $SNR < 5$ dB (s. Abb. 2) kann SODIX die Schallquellen des CROR mit einer Dynamik > 10 dB auflösen. Durch den Einfluss der Scherschicht werden die Schallquellen stromab der tatsächlichen Position lokalisiert. Der Vergleich mit den nach [1, 2] zu erwartenden Positionen zeigt gute Übereinstimmungen im gesamten Winkelbereich. Bezieht man das Modell der Scherschicht in die Berechnung der Übertragungsfunktionen für die Array-Signalverarbeitung ein, werden die Quellen an den tatsächlichen Positionen lokalisiert, s. Abb. 3b. Für große Emissionswinkel werden die Quellen weiterhin stromab

lokalisiert. Die Annahme einer unendlich dünnen Scherschicht ist für den schrägen Schalldurchgang zu stromab liegenden Mikrofonen demnach nicht mehr ausreichend. Weiterhin sind Artefakte bei Emissionswinkeln bis 80° zu beobachten. Die Berücksichtigung der ersten Reflexionen kann diese Fehler deutlich verringern, s. Abb. 3c, und bewirkt darüber hinaus eine Verbesserung des räumlichen Auflösungsvermögens. Die optisch unruhigere Quellverteilung begründet sich in der verbleibenden Ungenauigkeit der simulierten Übertragungsfunktionen.

Zusammenfassung

Die getrennte Auswertung einzelner Mikrofonensignale ist für die betrachtete Messumgebung aufgrund starker raumakustischer Einflüsse deutlich fehlerbehaftet. Die Mittelung über mehrere Mikrofonpositionen kann diesen Effekt verringern. Es wurde gezeigt, dass das Scherschichtmodell nach [1] im vorderen Winkelbereich gute Ergebnisse liefert, für eine zunehmende Scherschichtdicke bei großen Emissionswinkeln des CROR jedoch nicht ausreichend ist. Das inverse Verfahren SODIX konnte die gerichteten breitbandigen Schallquellen des CROR mit einer Dynamik > 10 dB modellieren, die Berücksichtigung der ersten Reflexionen der Testhalle verbesserte die Auflösung des Lokalisierungsverfahrens.

Großer Dank gilt sowohl TsAGI als auch Snecma für die sehr gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Amiet, R. K.: Refraction of Sound by a Shear Layer, JSV, Vol. 58, S. 467–482, 1978
- [2] Ingard, U.: Noise Reduction Analysis, Jones and Bartlett Publishers, 2010
- [3] Guidati, S., Brauer, C. und Wagner, S.: The Reflection Canceller - Phased Array Measurements in a Reverberating Environment, AIAA-2002-2462
- [4] Michel, U. und Funke, S.: Noise Source Analysis of an Aeroengine with a New Inverse Method SODIX, AIAA-2008-2860