

Aktive Beeinflussung des Drehklanges von Axialventilatoren mittels störkörperinduzierter Sekundärschallquellen

Mathias Steger¹, Graham Ashcroft², Dirk Nürnberger² und Frank Thiele¹

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik,
10623 Berlin, Deutschland, Email: mathias.steger@cfp.tu-berlin.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik,
51147 Köln, Deutschland, Email: graham.ashcroft@dlr.de

Einleitung

Das Gebläsegeräusch wird durch vielfältige strömungsakustische Mechanismen erzeugt und besteht im Klangbild sowohl aus tonalen als auch aus breitbandigen Komponenten. Eine Identifizierung der strömungsakustischen Schallquellen gelingt mit Hilfe der konvektiven Lighthillgleichung bzw. deren Lösung beschrieben durch die Ffowcs-Williams & Hawkings Gleichung für Gebiete mit bewegten Berandungen. Befindet sich die Blattspitzengeschwindigkeit des Gebläsefans im Unterschallbereich, wird das abgestrahlte Schallfeld von diskreten Tönen bei der Blattfolgefrequenz (BPF) und ihren höheren Harmonischen dominiert. Die tonalen Geräuschanteile der Schallabstrahlung eines Axialgebläses sind im Wesentlichen die Folge von Rotor/Stator-Interaktionen. Strömungsinhomogenitäten in Gehäuseumfangsrichtung und deren Interaktionen zwischen stehenden und rotierenden Bauteilen erzeugen periodisch instationäre Kräfte auf den Schaufeloberflächen. Derart angeregte Druck- und Geschwindigkeitsfluktuationen können sich stromauf und stromab innerhalb der Anschlusskanäle in Form akustischer Moden bis ins Fernfeld der Gebläsestufe ausbreiten [1].

Im Rahmen des von der DFG an der Technischen Universität Berlin (TUB) geförderten Sonderforschungsbereichs 557 "Beeinflussung komplexer turbulenter Scherströmungen" werden Möglichkeiten zur aktiven Minderung des Drehklanges von axialen Gebläsestufen untersucht. Ziel ist die aktive Minderung der tonalen Geräuschentwicklung hervorgerufen durch Rotor/Stator-Wechselwirkungen. Hierbei wird das Primärschallfeld gezielt mit einem durch strömungsinduzierte sekundäre Schallquellen erzeugten Gegenschallfeld überlagert. Im Gegensatz zu konventionellen Techniken, in denen Lautsprecher für die Erzeugung des Gegenschallfeldes zur Anwendung kommen, wird hier durch aeroakustische Aktuatoren die akustische Energie des Gegenschallfeldes der Hauptströmung entnommen. Die Beeinflussung erfolgt im Axialspalt zwischen Rotor/Stator über äquidistant am Gehäuseumfang verteilte Aktuatoren.

Die strömungsakustischen Untersuchungen erfolgen anhand eines Versuchsgebläses der TUB. Wesentliche konstruktive Parameter sind Tab. 1 zu entnehmen. Hierbei handelt es sich um ein einstufiges Axialgebläse mit ungleichem Schaufelzahlverhältnis. Daraus ergeben sich für die Blattfolgefrequenz $1\text{BPF}=1.200\text{Hz}$ ausbreitungsfähige Moden mit der Umfangsmodenordnung $m=2$

bzw. für den ersten Oberton $2\text{BPF}=2.400\text{Hz}/m=4$. Die

Rotorschaufelanzahl	B	18
Statorschaufelanzahl	V	16
Gehäuseradius	R	179mm
Rotorprofilsehnenlänge	c	53.6mm
Statorprofilsehnenlänge	c_s	75.0mm
Rotorstaffelungswinkel	Θ	63deg
Statorstaffelungswinkel	Θ_s	13deg
Statorteilung	t	70.2mm
Axialspalt Rotor/Stator	l	0.7c

Tabelle 1: Parameter des Versuchsgebläses (Gehäuseschnitt)

Berechnung des nichtlinearen Schallquellbereichs der Gebläsestufe erfolgt mit TRACE (DLR Köln). Hierbei handelt es sich um ein Finite-Volumen-Verfahren zur zeitgenauen Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (URANS), wobei die turbulenten Transportvorgänge statistisch durch ein lineares Wirbelviskositätsmodell Berücksichtigung finden [2]. Die Ergebnisse basieren auf kompressiblen Simulationen für einen quasi dreidimensionalen Gehäuseschnitt (Q3D). Stromauf der Gebläsestufe wird das Schallfeld in seine modalen Anteile zerlegt.

Durchführung

Wird die Wechselwirkung der Rotornachläufe mit den Statorschaufeln als maßgeblicher Geräuschentstehungsmechanismus des Grundgeräusches (Primärschallfeld) eines Axialgebläses zugrunde gelegt, lässt sich der dominante Quellbereich der tonalen Geräuschanteile anhand der Druckamplituden auf den Statoroberflächen identifizieren. Numerische Untersuchungen in [3] haben ergeben, dass das Primärschallfeld des Axialgebläses durch Quellpositionen bestimmt werden, welche im Wesentlichen mit den Statorvorderkanten zusammenfallen. Eine Abschätzung der hier zu erwartenden akustischen Wellenlängen erlaubt in erster Näherung eine Approximation der Statoroberflächen als linienhaft verteilte kompakte Schallquellen. Die jeweiligen Positionen werden durch die Statorvorderkanten definiert.

Als aeroakustische Aktuatoren für die Erzeugung des Sekundärschallfeldes sollen äquidistant am Gehäuseumfang verteilte zylindrische Störkörper im Axialspalt zwischen Rotor und Stator dienen. Wird auch hier als wesentlicher Geräuschentstehungsmechanismus für die Entstehung

des Sekundärschallfeldes die Wechselwirkung zwischen Rotornachlauf und Zylinder vorausgesetzt, lässt sich analog zur Entstehung des Primärschallfeldes durch periodisch instationäre Kräfte auf der Statoroberfläche auch die Entstehung des Sekundärschallfeldes durch periodisch instationäre Kräfte auf der Zylinderoberfläche interpretieren. Somit ist die Position der Sekundärschallquellen durch die Zylinderpositionen bestimmt. Im Rahmen der Approximation durch kompakte Quellen lässt sich für das geometrische Fernfeld eine analytische Beziehung der Phasenbeziehung zwischen Primär- und Sekundärschallfeld angeben. Daraus abgeleitet bestimmt

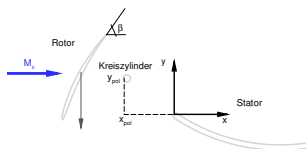


Abbildung 1: Winkel- und Positionsbeziehungen aus (1).

sich in Abhängigkeit der axialen Zylinderpositionen die bestmögliche Umfangspositionen für eine destruktive Überlagerung des Primär- und Sekundärschallfeldes.

$$y = \frac{(2\pi n + \pi) + x \left(\frac{hB}{R} \tan \beta + k_x^\pm \right)}{\frac{hB}{R} - k_y} \quad (1)$$

Darin ist h die Harmonische der Blattfolgefrequenz, R der Gehäuseradius, β der Rotorabströmwinkel, B die Rotor-schaufelanzahl, $k_y = m/R$ die Wellenzahl in Umfangsrichtung und $n \in N$ eine ganzzahlige Laufvariable. Die axiale Wellenzahl k_x^\pm lässt sich bei drallfreier Zu- und Abströmung für stromauf (+) / stromab (-) laufende Moden durch

$$k_x^\pm = \frac{M_x \left(\frac{\omega}{a} \right) \pm \sqrt{k_y^2 (M_x^2 - 1) + \left(\frac{\omega}{a} \right)^2}}{M_x^2 - 1} \quad (2)$$

angeben, worin a die Schallgeschwindigkeit ist, M_x die Machzahl der Grundströmung in axialer Richtung, $\omega = hB\Omega$ die Frequenz der Anregung und Ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors. Die geometrischen Beziehungen für eine ebene Abwicklung im Gehäuseschnitt sind Abb. 1 zu entnehmen.

Für einen gegebenen Betriebspunkt lassen sich aus Gleichung 1 die Zylinderpositionen für die destruktive Überlagerung der Mode $m=2$ bei der BPF (Abb. 2a) und der Mode $m=4$ bei dem ersten Oberton (Abb. 2b) angeben. Bemerkenswert ist, dass für die BPF bei einer Axialposition genau eine Umfangsposition existiert. Mit den Obertönen der BPF kommen zusätzliche Umfangspositionen für jeweils eine feste Axialposition hinzu. Die akustischen Ergebnisse der numerischen Simulation der aus Abb. 2a für die axiale Zylinderposition $-x/l = 0.88$ angegebenen Umfangsposition $y/t = 0.64$ sind in Abb. 3 dargestellt. Darin wird die Mode $m=2$ bei der BPF um 8.2dB gesenkt und entsprechend der für eine destruktive Überlagerung ungünstigen Zylinderposition die Mode $m=4$ bei dem ersten Oberton um 6.3dB angehoben.

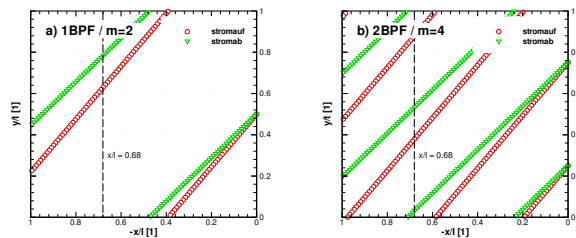


Abbildung 2: Zylinderpositionen für die Beeinflussung a) der Mode $m=2/1BPF$ und b) der Mode $m=4/2BPF$.

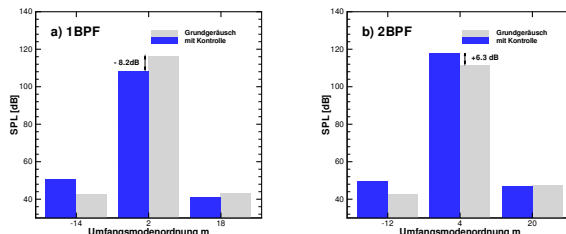


Abbildung 3: Schalldruckpegel der dominanten Azimutalmoden m für a) 1BPF und b) 2BPF.

Zusammenfassung

Für ein besseres Verständnis einer gezielten Strömungsbeeinflussung zur Minderung der tonalen Geräuschteile werden zylindrische Störkörper als aeroakustische Aktuatoren im Axialspalt zwischen Rotor und Stator betrachtet. Auf Grundlage kompakter Schallquellen für eine Approximation des Schallfeldes im geometrischen Fernfeld des Schallquellgebietes konnte ein Modell entwickelt werden, welches einen Zusammenhang zwischen den bestmöglichen Störkörperpositionen und der destruktiven Überlagerung einer gewünschten Azimutal-mode mit entsprechender Frequenz liefert. Dabei kann zwischen stromauf und stromab laufenden Moden unterschieden und wesentliche Parameter des Betriebspunktes berücksichtigt werden. Die numerischen Simulationen für einen Gehäuseschnitt des Versuchsgebläses konnten die Vorhersagen des Modells bestätigen.

Literatur

- [1] Neise, W.: Lärm und Lärmbekämpfung bei Ventilatoren - Eine Bestandsaufnahme, DFVLR-Forschungsbericht 80-16, Köln, 1986
- [2] Nürnberger, D., Eulitz, F., Zachial, A.: Recent Progress in the Numerical Simulation of Unsteady Viscous Multistage Turbomachinery Flow, Proceedings of the 15th International Symposium on Air Breathing Engines, 2001
- [3] Ashcroft, G., Schulz, J.: Numerical Modelling of Wake-Jet Interaction with Application to Active Noise Control in Turbomachinery, AIAA Paper 2004-2853, 2004