

Regelungskonzept zur aktiven Minderung des Drehklangs axialer Turbomaschinen bei Verwendung aeroakustischer Gegenschallquellen

Olaf Lemke¹, Rifet Muminovic², Wolfgang Neise³, Lars Enghardt³, Rudibert King², Michael Möser¹

¹ Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, Technische Universität Berlin
Email: olaf.lemke@pi.tu-berlin.de

² Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Technische Universität Berlin

³ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik

Einleitung

Die Hauptursache der Entstehung des Drehklangs in axialen Turbomaschinen sind nach Tyler und Sofrin [1] instationäre periodische Kräfte als Folge der Rotor-Stator-Interaktion (RSI). In einem DFG-geförderten Forschungsvorhaben wird, abweichend von konventionellen Lautsprechermethoden, ein alternatives Verfahren zur Minderung dieses tonalen Lärms auf Basis der Erregung aeroakustischer Sekundärschallquellen mittels Drucklufteinblasung im Blattspitzenbereich untersucht. Mit dieser Methode können verschiedene Harmonische der Blattpassierfrequenz (BPF) gemindert werden (vgl. Lemke et al. [2] und [3]). Die wesentlichen Einflussparameter zur Anpassung von Amplitude und Phasenlage des erzeugten Sekundärschallfeldes sind der Einblasmassenstrom und die Umfangsposition der Düsen bezüglich des Stators.

Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung geeigneter Regelungsstrategien für diese Methode der aktiven Geräuschkinderung. Frühere Untersuchungen von Lemke et al. [4] verwendeten einen Extremwertregler, welcher zwar keine Informationen über das System benötigt, dafür aber hohe Regelzeiten aufweist. In aktuellen Untersuchungen wird der in Lemke et al. [5] vorgestellte lineare Zusammenhang zwischen der Phase des Sekundärschallfeldes und der Umfangsposition der Düsen innerhalb einer Statorpassage zum Aufbau einer Regelung verwendet. Die Bestimmung von Phase und Amplitude der zu kontrollierenden Umfangsmode erfolgt dabei mit Hilfe eines erweiterten Kalman-Filters nach Gelb [6].

Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Hochdruck-Axialventilator mit einem Gehäusedurchmesser von $D_{Geh} = 358$ mm und einem Nabenverhältnis von $\varepsilon = 0,62$ durchgeführt. Der Rotor hat $Z = 18$ profilierte Schaufeln vom Typ NACA 5-63-(10) mit $c = 53,6$ mm Sehnenlänge und einem Stafflungswinkel von $\nu = 27^\circ$ an der Blattspitze. Der Kopfspalt beträgt $s = 0,3$ mm. Der Stator hat $V = 16$ unprofilierte Kreisbogenschaukeln. Der Axialventilator wird im Versuchsstand in einer Anordnung mit Ansaug- und Ausblaskanal mit reflexionsarmen Kanalabschlüssen be-

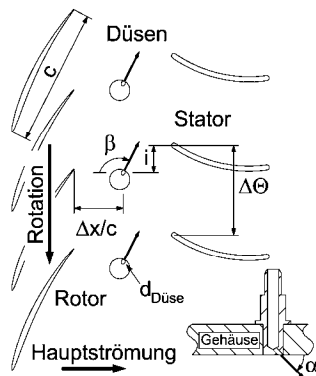


Abbildung 1: Beeinflussungskonfiguration und verwendete Düsen im Blattspitzenbereich.

trieben. Die Schalldruckmessung für die Regelung erfolgt über acht äquidistant in Umfangsrichtung verteilte wandbündig eingebaute $\frac{1}{4}$ Zoll-Mikrofone im Ausblaskanal. Damit ist eine Zerlegung der gemessenen Wanddruckschwankungen in Umfangsmode möglich.

Die Drucklufteinblasung erfolgt über 16 zylindrische Düsen mit einem Einblaswinkel von $\alpha = 45^\circ$ und einer Einblasrichtung von $\beta = 117^\circ$ bei einem Axialabstand von $\Delta x/c = 0,12$, schematisch dargestellt in Abb. 1

Modellbildung

Die Geräuschkinderung mittels aeroakustischer Sekundärschallquellen wird als eine lineare Überlagerung von Primär- und Sekundärschallfeld nach Gl. (1) angenommen.

$$\hat{p}_{ANC(m,n)} = \hat{p}_{Prim(m,n)} + \hat{p}_{Sek(m,n)} \quad (1)$$

In den Experimenten werden das Primärschallfeld mit dem komplexen Schalldruck $\hat{p}_{Prim(m,n)}$ sowie das durch Einblasung kontrollierte Schallfeld $\hat{p}_{ANC(m,n)}$ für die jeweiligen Tyler-Sofrin-Moden m sowie die zugehörigen radialen Modenordnungen n erfasst. Aus Gl. (1) kann der komplexe Schalldruck des Sekundärschallfeldes $\hat{p}_{Sek(m,n)}$ und damit die Phase $\varphi_{Sek(m,n)}$ sowie die Amplitude $A_{Sek(m,n)}$ in Abhängigkeit der Umfangsposition der Düsen und des Einblasmassenstroms bestimmt werden. Die Phasendifferenz zwischen Primär- und Sekundärschallfeld, welche $\Delta\Phi = 180^\circ$ für eine destruktive Überlagerung betragen muss, ergibt sich zu:

$$\Delta\Phi_{(m,n)} = \varphi_{Sek(m,n)} - \varphi_{Prim(m,n)} \quad (2)$$

Werden die Pegeländerung der Schallleistung gegenüber dem Grundgeräusch ΔL_W (grau) sowie die nach Gl. (1) und (2) bestimmte Phasendifferenz $\Delta\Phi$ (schwarz) für jeden Messpunkt über der Umfangsposition i der Düsen innerhalb einer Statorpassage $\Delta\Theta$ aufgetragen, so ist für die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ ein linearer Zusammenhang erkennbar.

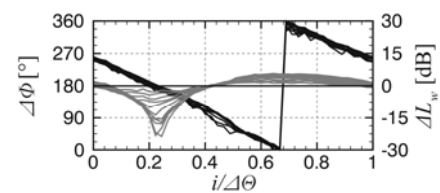


Abbildung 2: Phasendifferenz $\Delta\Phi$ (schwarz) und Änderung der Schallleistung ΔL_W (grau) innerhalb einer Statorpassage $\Delta\Theta$ der dominanten Mode $m = 2$ bei BPF für verschiedene Einblasmassenströme.

In Abb. 2 sind die Ergebnisse für die RSI-Mode $m = 2$ bei der BPF für verschiedene Einblasmassenströme dargestellt.

Im Punkt $i/\Delta\Theta = 0,22$ ist die Pegelminderung bei einer Phasendifferenz von $\Delta\Phi = 180^\circ$ maximal.

Bei der Betrachtung (hier nicht dargestellt) von weiteren RSI-Moden bei Harmonischen h der BPF ergibt sich, dass der Anstieg der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ proportional zum Produkt aus Ordnung der BPF Harmonische h und der Anzahl der Statorblätter V ist. Damit ergibt sich der lineare Zusammenhang für die Phasendifferenz in Abhängigkeit der Umfangsposition i zu:

$$\Delta\Phi_{(m,n)} = h \cdot V \cdot i + \Delta\Phi_{0(m,n)}. \quad (3)$$

Die Größe $\Delta\Phi_{0(m,n)}$ ist eine Konstante, welche aus einer Kalibrationsmessung bestimmt werden kann. Als Führungsgröße der Regelung wird $\Delta\Phi = 180^\circ$ verwendet.

Ergebnisse

Die Regelung wurde zunächst auf die Umfangsposition i der Düsen bei vorgegebenem Einblasmassenstrom beschränkt, d.h. eine Regelung der Amplitude fand nicht statt. Aus Sprungversuchen ergab sich ein PI-Regler mit einer Verstärkung von $K = -0,06$ 1/s als besonders geeignet. Die Analyse der Mikrofondaten, und damit die Bestimmung der Phasendifferenz, erfolgte mittels eines erweiterten Kalman-Filters (EKF), der die Amplitude und Phase der dominanten RSI-Mode online mitschätzt. Aus diesen Daten erfolgt die Berechnung des Sekundärfeldes, wobei das Primärfeld in einer Vormessung bestimmt und für die Regelung abgespeichert wurde.

Abb. 3 zeigt das Verhalten von Phasendifferenz $\Delta\Phi$ und Schalldruckpegel L_p der dominanten Mode $m = 2$ bei BPF auf eine rampenförmige Änderung der Stellgröße $i/\Delta\Theta$ (Umfangsposition i der Düsen innerhalb eine Statorpassage $\Delta\Theta$) im Vergleich zwischen Messung (schwarz) und EKF (grau). Für die Untersuchungen zur Regelung wurde eine von Abb. 2 abweichende Düsenanordnung verwendet, um das Modell auch an anderen Konfigurationen zu testen.

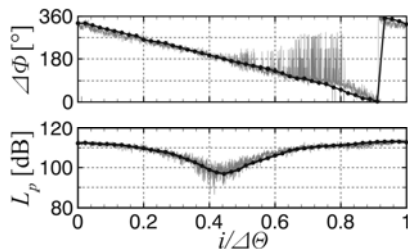


Abbildung 3: Vergleich von Messung (schwarz) und EKF (grau) für die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ und den Schalldruckpegeländerung ΔL_p innerhalb einer Statorpassage $\Delta\Theta$ der dominanten Mode $m = 2$ bei BPF und vorgegebenen Einblasmassenstrom.

Die EKF-Schätzung stimmt mit dem Verlauf der gemessenen Daten relativ gut überein. Der Schalldruckpegel der Basiskonfiguration beträgt $L_p = 108,5$ dB. Bei $i/\Delta\Theta = 0,41$ befindet sich mit $L_p = 98,0$ dB ein Minimum, welches bei einer Phasendifferenz von $\Delta\Phi = 180^\circ$ erreicht wird. Die Minderung beträgt für den vorgegebenen Einblasmassenstrom $\Delta L_p = -10,5$ dB.

Im nächsten Schritt erfolgt die Rückkopplung der Regelstrecke. Abb. 4 zeigt im linken Bild den Verlauf von Umfangsposition $i/\Delta\Theta$, Phasendifferenz $\Delta\Phi$ und Schalldruckpegel L_p der dominanten Mode $m = 2$ bei der BPF als Funktion der Zeit. Der Regelkreis wird bei $t = 0$ geschlossen und erreicht

nach ca. 3 s überschwingfrei das Minimum im Schalldruckpegel für die oben gefundene Umfangsposition (vgl. Abb. 3). Der Startwert liegt bei $i/\Delta\Theta = 0,88$. Die Phasendifferenz zwischen Sekundär- und Primärschallfeld beträgt hier ca. $\Delta\Phi = 20^\circ$, d.h. beide Schallfelder sind nahezu gleichphasig, so dass für Zeiten $t < 0$ der Schalldruckpegel über dem des Grundgeräusches liegt. Im Minimum beträgt die Phasendifferenz zwischen Sekundär- und Primärfeld $\Delta\Phi = 180^\circ$, d.h. der Regler kann die Führungsgröße halten.

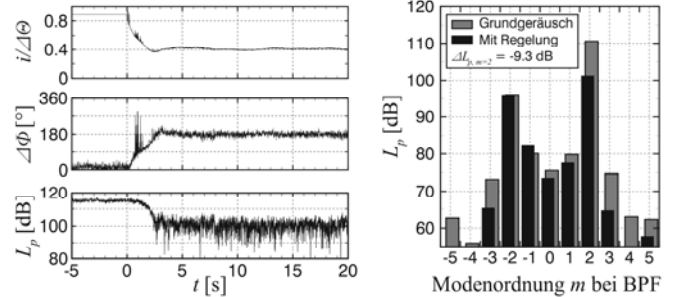


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf von Umfangsposition $i/\Delta\Theta$, Phasendifferenz $\Delta\Phi$ und Schalldruckpegel L_p (links). Umfangsodenspektrum bei BPF im eingeschwingenen Zustand (rechts).

Im rechten Bild von Abb. 4 ist das Umfangsmodenspektrum bei der BPF dargestellt. Die dominante Mode $m = 2$ wird um $\Delta L_p = -9,3$ dB gegenüber dem Grundgeräusch gemindert, was ungefähr der Minderung des unregulierten Falls (vgl. Abb. 3) entspricht.

Zusammenfassung

Die aktive Kontrolle des Drehklangs eines Axialventilators mittels aeroakustischer Sekundärschallquellen wurde mit einem einfachen PI-Regler realisiert. Dabei erfolgte die Analyse der Regelgröße, basierend auf der linearen Phasenbeziehung zwischen Sekundärschallfeld und Umfangsposition der Einblasdüsen, durch einen erweiterten Kalmanfilter.

Literatur

- [1] Tyler, J. M., Sofrin, T. G.: Axial flow compressor noise studies., Transactions of the Society of Automotive Engineers 70, 309-332 (1962).
- [2] Lemke, O., Neise, W., Möser, M.: Aktive Minderung höherer Harmonischer des Drehklangs axialer Turbomaschinen durch Strömungsbeeinflussung. Fortschritte der Akustik DAGA 06, 20.-23.3.2006, Braunschweig.
- [3] Lemke, O., Neise, W., Möser, M., Enhardt L.: Control of higher-order modes at blade passage frequency harmonics of axial turbomachines by steady air jet actuation. Fan Noise 2007, 17.-19. September Lyon, France, 2007.
- [4] Lemke, O., Becker, R., Neise, W., Möser, M., King, R.: Aktive Minderung des Drehklangs axialer Turbomaschinen durch Strömungsbeeinflussung unter Einsatz einer Mehrgrößenregelung., 5. VDI Fachtagung Ventilatoren, 7./8. März 2006, Braunschweig..
- [5] Lemke, O., Enhardt, L., Neise, W., Möser, M.: Phasenbeziehung für die aktive Minderung des Drehklangs axialer Turbomaschinen bei Verwendung aeroakustischer Gegenschallquellen. Fortschritte der Akustik DAGA 07, 19.-22.3.2007, Stuttgart.
- [6] Gelb, A., "Applied optimal estimation", 10th printing, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1988.