

Phasenbeziehung für die aktive Minderung des Drehklangs axialer Turbomaschinen bei Verwendung aeroakustischer Gegenschallquellen

Olaf Lemke¹, Lars Enghardt², Wolfgang Neise², Michael Möser³

¹ DFG-Sonderforschungsbereich 557 „Beeinflussung komplexer turbulenter Scherströmungen“
Technische Universität Berlin, Email: Olaf.Lemke@pi.tu-berlin.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik

³ Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, Technische Universität Berlin

Einleitung

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens wird der Drehklang eines Axialventilators durch das stationäre Einblasen von Druckluft zwischen Rotor und Stator gemindert. Es wird dabei das Druckfeld an den Hinterkanten der Rotorblattspitzen verändert, so dass dort zusätzliche instationär periodische Oberflächenkräfte entstehen, die ein sekundäres Schallfeld anregen. Damit unterscheidet sich dieses Verfahren wesentlich von konventionellen Lautsprecheranwendungen, da die Gegenschallquellen auf aeroakustischem Wege im Schallquellbereich erzeugt werden. Primär- und Sekundärschallfeld entstehen gleichzeitig nur im Betrieb des Ventilators, so dass klassische Regelungsstrategien, die auf Übertragungsfunktionen zwischen Sensor und Aktuator basieren, keine Anwendung finden. In den regelungstechnischen Anwendungen wurde daher ein Extremwertregler eingesetzt (vgl. Lemke et al. [1]), der zwar ohne Systemmodellierung auskommt, jedoch sehr langsam ist. Ziel ist die Auslegung schneller modellbasierter Regelungsalgorithmen auf Basis einer Phasenbeziehung zwischen Primär- und Sekundärschallfeld, wobei zunächst der Einfluss verschiedener Einblasparameter auf diesen Zusammenhang untersucht wird.

Theoretische Grundlagen

Die Ursache der tonalen Geräuschenstehung in axialen Strömungsmaschinen sind instationäre periodische Oberflächenkräfte, die aus der Wechselwirkung von Zuströmung und Rotor sowie Rotor und Stator entstehen. Tyler und Sofrin [2] beschrieben die abgestrahlten Azimutalmoden des Primärfeldes bei der Blattpassierfrequenz (BPF) und deren Harmonischen h in Abhängigkeit von der Anzahl der Rotorblätter Z sowie der Anzahl der Statorschaufeln V .

Durch die Verwendung der gleichen Anzahl von Einblasdüsen wie Statorschaufeln ist in jedem Fall sichergestellt, dass das Sekundärfeld in seiner Umfangstruktur dem Primärfeld nachgebildet wird. Wesentliche Parameter zur Kontrolle von Amplitude und Phasenlage sind der Einblasmassenstrom $M_{in}/M_{vent.}$ und die Umfangspositionen i der Düsen innerhalb einer Statorpassage $\Delta\theta = 22,5^\circ$. Es können die Schallfeldanteile für verschiedene tonale Frequenzkomponenten beeinflusst werden, wobei die Anzahl der Pegelminima der dominanten Moden innerhalb einer Statorpassage gleich der Ordnung h der Harmonischen der BPF ist (vgl. Lemke et al. [3]).

Die Phasenbeziehung basiert auf der Hypothese, dass es sich bei der Geräuschkürzung durch aeroakustische Sekundärschallquellen um eine lineare Überlagerung von Primär- und Sekundärschallfeld nach Gl. (1) handelt.

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

In den Experimenten wird das Primärschallfeld mit den komplexen Drücken \hat{p}_{Prim} sowie das durch Einblasung kontrollierte, resultierende Schallfeld \hat{p}_{ANC} für die jeweiligen TylerSofrin-Moden erfasst. Aus Gl. (1) kann der komplexe Schalldruck des Sekundärschallfeldes \hat{p}_{Sek} und damit die Phasenlage sowie die Amplitude in Abhängigkeit der Umfangsposition der Düsen und des Einblasmassenstroms bestimmt werden.

Versuchsaufbau

Die Experimente zur Minderung der Drehklangkomponenten 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 einer Sehnenlänge von $c = 53,6$ mm und einem Staffelungswinkel von $\nu = 27^\circ$ an der Blattspitze. Der Kopfspalt beträgt $s = 0,3$ mm ($\zeta = s/c = 0,6\%$). Das Leitrad hat $V = 16$ unprofilierte Kreisbogenschaufeln. Der Axialventilator wird im Versuchsstand in einer Anordnung mit Ansaug- und Ausblaskanal mit reflexionsarmen Kanalabschlüssen betrieben. Die Schalldruckmessung erfolgt über 32 äquidistant über den Umfang verteilte wandbündig eingebaute $\frac{1}{4}$ Zoll-Mikrofone im Ansaug- und Ausblaskanal. Damit ist eine Zerlegung der Wanddruckschwankungen in azimutale Moden möglich.

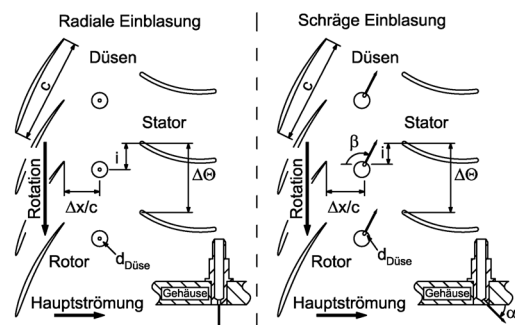


Abbildung 1: Einblaskonfiguration und verwendete Düsen.

Die Drucklufteinblasung erfolgt über zwei verschiedene Konfigurationen von $V = 16$ zylindrische Düsen, siehe Abb. 1, mit einem Durchmesser von $d_{Düse} = 1,5$ mm. Im ersten Fall wird die Druckluft in radialer Kanalrichtung und im zweiten Fall unter einem Einblaswinkel von $\alpha = 45^\circ$ bezüglich der Gehäusewand in Richtung der Profilsehne der Rotorschaufeln ($\beta = 117^\circ$) eingeblasen. Der Axialabstand der Düsen von der Rotorhinterkante beträgt $\Delta x/c = 0.13$ (radial) sowie $\Delta x/c = 0.15$ (schräg).

Ergebnisse

Alle Untersuchungen fanden im optimalen Arbeitspunkt des Ventilators bei einer Drehzahl von $n = 4000/\text{min}$ und einer Lieferzahl von $\varphi = 0,260$ statt. Dabei wurden die Umfangsposition der Düsen innerhalb einer Statorpassage und der Einblasmassenstrom schrittweise verändert.

Die Abb. 2 zeigt die Ergebnisse für die dominante Azimutalmode $m = 2$ bei der BPF ($f = 1200 \text{ Hz}$). Aufgetragen sind oben die Pegeldifferenzen $\Delta L_{p, m=2}$ zwischen der Basiskonfiguration und dem Fall mit Drucklufteinblasung für den jeweiligen Einblasmassenstrom, bei dem die maximale Pegelminderung für diesen Schallfeldanteil zu erreichen sind, sowie unten die Phasenlage des Sekundärschallfeldes $\Phi_{Sec, m=2}$ über einer Statorpassage $\Delta\theta$. Die schwarze Kurve kennzeichnet die radiale Einblasung und die rote Kurve die schräge Einblasung. Ähnliche Ergebnisse für die Pegelminderungen bei der BPF für verschiedenen Einblasparameter können Schulz [4] entnommen werden.

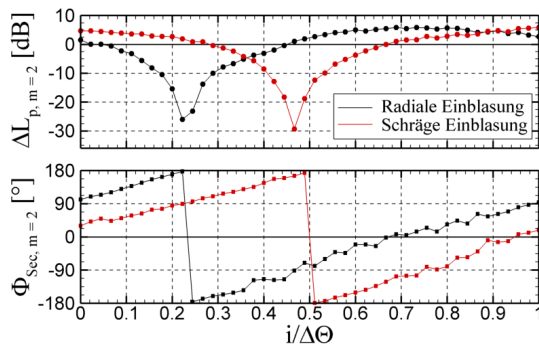


Abbildung 2: Pegelminderung (oben) und Phasenverlauf des Sekundärschallfeldes (unten) der dominanten Mode $m = 2$ bei $f = 1200 \text{ Hz}$ innerhalb einer Statorpassage $\Delta\theta$.

Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Umfangspositionen der Düsen für die maximalen Pegelminderungen, die für beide Fälle ähnlich stark ausfallen. Die beiden Einblaskonfigurationen unterscheiden sich in ihrer Axialposition um 2 %. Dies hat auch einen Einfluss auf die Optimalpositionen, welcher aber hier vernachlässigt werden kann. Der wesentlichere Faktor ist die stark unterschiedliche Einblasrichtung. Als Folge der konstanten Betriebsbedingungen müssen die Sekundärquellen auf dem Rotor in ihrer Phasenlage gleich sein, da das Primärfeld für beide Fälle auch gleich ist. Durch die Schrägeinblasung muss die Düse gegenüber der radialen Einblasung an einer anderen Umfangsposition platziert werden, um die Sekundärquelle optimal gegenphasig anzupassen.

Die Betrachtung der Phasenlage des Sekundärschallfeldes gegenüber dem Primärschallfeld bezogen auf die Umfangsposition der Düsen zeigt deutlich einen Phasensprung im Bereich der Minima von $\Phi_{Sec} = 180$ auf $\Phi_{Sec} = -180^\circ$. Im Nulldurchgang sind die Pegelanhebungen maximal. Damit folgt die Geräuschminderung mittels aeroakustischen Gegenschallquellen der klassischen Überlagerung zweier Wellen. Der Kurvenverlauf ist in beiden Fällen linear mit gleichem Anstieg. Rechts der Minima werden die Kurven etwas verrauscht, da in diesem Bereich die Düsenfreistrahlen auf die Statorblätter treffen. Da die Sekundärquellen vermutlich auf den Hinterkanten der Blattspitzen liegen, verhält sich das Sekundärfeld weiterhin linear.

Die Abb. 3 zeigt in Analogie zu Abb. 2 die Ergebnisse für die dominante Azimutalmode $m = 4$ bei der doppelten BPF, ($f = 2400 \text{ Hz}$). Deutlich zu erkennen sind zwei Minima innerhalb einer Statorpassage. Die Minderungen sind für beide Minima unterschiedlich, da in diesem Fall der Einblasmassenstrom für die jeweilige maximale Pegelminderung konstant gehalten wurde. Die Unterschiede in den Minima werden ausführlich in Lemke et al. [3] diskutiert.

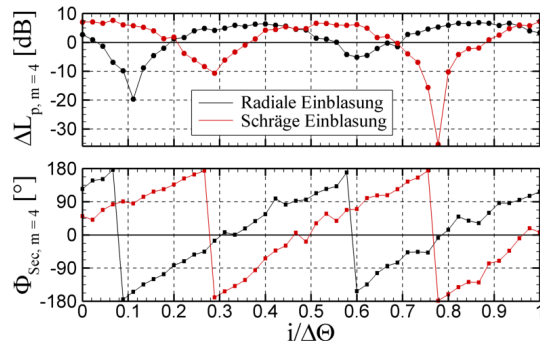


Abbildung 3: Pegelminderung (oben) und Phasenverlauf des Sekundärschallfeldes (unten) der dominanten Mode $m = 4$ bei $f = 2400 \text{ Hz}$ innerhalb einer Statorpassage $\Delta\theta$.

Im Verlauf der Phasenlage ist auch hier ein ausgeprägtes lineares Verhalten mit Phasensprüngen bei destruktiver sowie Nulldurchgängen bei konstruktiver Überlagerung beider Schallfelder zu erkennen. Im Fall des zweiten (radial) bzw. ersten (schräg) Minimums sind die Amplituden, und damit die Einblasmassenströme, nicht optimal angepasst, jedoch ist im Phasenverlauf zu erkennen, dass die richtige Umfangsposition eingestellt ist.

Zusammenfassung

Bei der Drucklufteinblasung zur Minderung des Drehklangs axialer Strömungsmaschinen kann eine lineare Phasenbeziehung für jeden Schallfeldanteil aus den Messdaten bestimmt werden. Dabei hat eine Veränderung der Einblasrichtung, die zwar über die erreichbare Pegelminderung entscheidet, keine Auswirkungen auf die Linearität. Diese Phasenbeziehung, mit der eine Vorhersage der optimalen Einstellungen des Sekundärschallfeldes möglich ist, soll zukünftig zur Entwicklung schneller, modellbasierter Regler verwendet werden.

Literatur

- [1] 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, Braunschweig, 7./8. März 2006.
- [2] Tyler, J. M., Sofrin, T. G.: Axial flow compressor noise studies., Transactions of the Society of Automotive Engineers 70, 309-332 (1962).
- [3] 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.
- [4] Schulz, J.: Aktive Geräuschminderung des Drehklangs axialer Turbomaschinen durch Strömungsbeeinflussung., Dissertation TU-Berlin Juni 2004.