

Entwicklung einer Software zur Kurzzeit-Azimutalmodenanalyse

P. Böhning, L. Enghardt *, W. Neise *, P. Költzsch

TU Dresden, Institut für Akustik und Spracherkennung

* DLR, Insitut für Antriebstechnik, Abt. Turbulenzforschung, Berlin

1. Einleitung

Der von einer Turbomaschine erzeugte Schall breitet sich zunächst im Gehäuse der Maschine aus, bevor er in die Umgebung abgestrahlt wird. Im Gehäuse, das zumeist einen Rohrkanal formt, breitet sich der Schall über einen großen Frequenzbereich in Form von höheren Moden aus. Die Überlagerung aller Moden ergibt das Schallfeld im Kanal. Eine Mode in einem Rohrkanal besitzt eine azimutale und eine radiale Struktur. Bezieht man sich nur auf die azimutale Struktur, spricht man von Azimutalmoden. Für die Optimierung einer Turbomaschine hinsichtlich einer geringen Schallabstrahlung ist die Untersuchung der modalen Struktur dieses Schallfeldes notwendig. Mittels dieser Analyse lassen sich Rückschlüsse auf die schall-erzeugenden Mechanismen ziehen oder auch die Effizienz von Maßnahmen zur Reduzierung der Schallabstrahlung bewerten. Für viele Anwendungen ist nur die azimutale Struktur des Schallfeldes in einem Rohrkanal von Interesse.

Im Vortrag wird die Entwicklung einer Software zur Analyse von Schallfeldern in Rohrkanälen vorgestellt. Die Analysesoftware wurde in einem Versuch eingesetzt, welcher der Überprüfung eines Modells zur Bestimmung von erzeugbaren Azimutalmoden bei einer Rotor-Stator-Stator-Konfiguration diente.

2. Schallausbreitung im Rohrkanal

Bei der Schallausbreitung in einem Kanal gelten definierte Randbedingungen für den Schalldruck und die Schallschnelle. So muß in einem Kanal mit schallharten Wänden für alle Kanalgeometrien die radiale Komponente der Schallschnelle v_r an der Wand verschwinden. Für den Schalldruck p folgt daraus, daß er an der starren und schallharten Kanalwand ein Maximum aufweist. Diese Bedingungen führen dazu, daß in einem Kanal nur bestimmte Schwingungsformen ausbreitungsfähig sind. Für die mathematische Beschreibung der Schallausbreitung in Rohrkanälen geht man für den einfachsten Fall (keine überlagerte Strömung, Rohr ohne Nabenkörper, keine rücklaufende Welle) von der Wellengleichung der linearen Akustik aus. Mit den oben genannten Randbedingungen läßt sich die vollständige Lösungsmenge der Wellengleichung als Doppelsumme beschreiben.

$$p(r, \theta, x, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{m,n}^+ e^{-jk_x m x} J_{|m|}(k_{r,m,n} r) e^{jm\theta} e^{j\omega t}$$

Dabei bedeutet p Schalldruck, x eine Distanz auf der Rohrachse zu einem Bezugspunkt, r ist der Radius, θ der Winkel um die Rohrachse, t die Zeit und a_0 die Schallgeschwindigkeit im Fluid. k_x und k_r sind Wellenzahlen. Mit J_m ist die Besselfunktion erster Art gekennzeichnet. Der erste Term beschreibt die Wellenausbreitung in x-Richtung, der zweite in r- und der dritte in θ -Richtung. Der letzte Term beschreibt die Zeitabhängigkeit der Lösung. Jede Einzellösung ist durch ein Paar der Modenordnungen m (azimutal) und n (radial) gekennzeichnet und wird als Mode bezeichnet. Jeder einzelnen Mode ist eine definierte Anregungsfrequenz (*cut-on*-Frequenz) zugehörig, ab der sie ausbreitungsfähig wird. Wird eine Turbomaschinen so ausgelegt, dass die Anregungsfrequenz einer Mode kleiner als die *cut-on*-Frequenz ist, so ist die Mode erst für höhere Harmonischen der Anregungsfrequenz ausbreitungsfähig.

3. Analyseverfahren und Meßsystem

Eine interessierende Frequenzkomponente $p(x, \theta, \omega)$ an einer azimutalen Position θ läßt sich als Summe der Amplituden $A_m(x, \omega)$ der Azimutalmoden ausdrücken.

$$p(x, \theta, \omega) = \sum_{m=-M}^M A_m(x, \omega) e^{jm\theta}$$

Für die Azimutalmodenanalyse sind die Schalldruck-Zeitsignale $p(x, \theta, t)$ an über den Kanalumfang verteilten Positionen θ für eine axialen Position x mittels wandbündiger Mikrofone zu messen. Die Signale müssen simultan und für eine spätere Mittlung der Modenspektren getriggert auf eine Rotorposition bestimmt werden. Aus den Zeitsignalen sind die Fouriertransformierten zu berechnen. Anschließend ist eine Fouriertransformation (räumlich) über eine Frequenzkomponente $p(x, \omega)$ aller Mikrofonpositionen auszuführen. Das setzt äquidistante Mikrofonpositionen auf dem Kanalumfang voraus. Sind die Mikrofonpositionen nicht äquidistant, ist ein Gleichungssystem zu lösen. Um Aliasing zu vermeiden, muß die höchste ausbreitungsfähige Azimutalmodenordnung M vor der Messung bestimmt und daraus die Mindest-

anzahl der Mikrofonpositionen ($2M$) abgeleitet werden.

Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Auslastung aller Systemressourcen wurden Funktionsblöcke (Datenerfassung, Analyse, Ergebnisdarstellung, Nutzerkommunikation) gebildet, die zur Laufzeit des Programmes als verschiedene Prozesse parallel und synchronisiert arbeiten. Die Erfassung der Schalldruck-Zeitsignale erfolgt mit einem System von LMS. Die Software wertet die Daten aus und stellt sie grafisch dar.

4. Anwendungsbeispiel

Die Software wurde in einem Versuch zur Verifizierung eines erweiterten Modells zur Beschreibung der in Turbomaschinen durch die Interaktion von Rotor und Stator erzeugbaren Azimutalmode eingesetzt. Das erweiterte Modell nach Holste, Zhang, Enghardt, Neise [1] liefert eine Bestimmungsgleichung für Konfigurationen mit verschiedener Anzahl von Rotoren und Statoren. Es handelt sich um eine Erweiterung des Modell von Tyler, Sofrin [2]. Im Versuch wurde ein Axialventilator mit 12 Rotorblättern und 8 Statorschaufeln eingesetzt. Ein zweiter Stator wurde durch radial angeordnete Streben (dicht vor dem Stator) simuliert. Die Anzahl der Streben wurde variiert ($s=0;5;10$). Das Bild 1 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau.

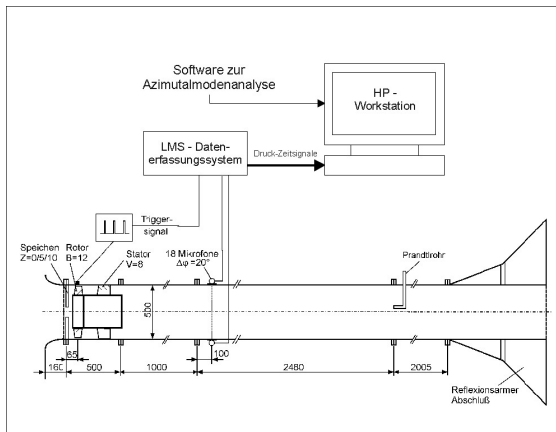
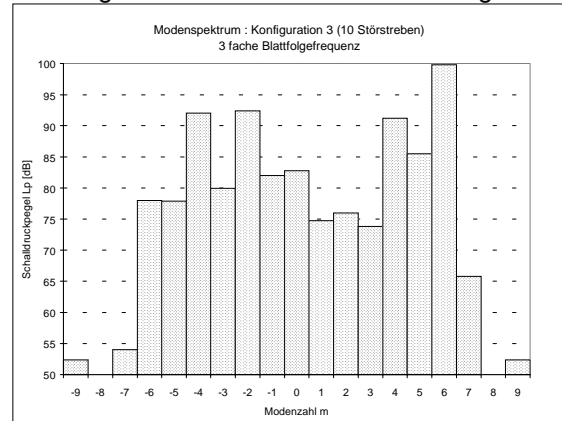


Bild 1: Versuchsaufbau

Beispielhaft soll hier auf das gemessene Azimutalmodepektrum für die Ventilator-konfiguration mit 10 Streben im Einlauf eingegangen werden. Das erweiterte Modell unter Berücksichtigung der Dämpfung der nicht ausbreitungsfähigen Moden (*cut-on*-Kriterium) sagt für die 3-fache Blattfolgefrequenz f_{BPF} eine Dominanz der Azimutalmode $m=-2; \pm 4; 6$ voraus.

Ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen



senen dominanten Moden zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. In den gemessenen Azimutalmodepekturen ließen sich die dominanten Moden weitgehend mit dem erweiterten Modell erklären.

5. Vorteile der Software

Die Software zur Kurzzeit-Azimutalmodeanalyse hat sich als effizientes Werkzeug in Untersuchungen von Schallfeldern von axialen Strömungsmaschinen mit den verschiedensten Motivationen bewährt. Im Gegensatz zur nun möglichen Online-Analyse am Meßobjekt waren zuvor die Messung der Schalldruck-Zeitsignale und die Auswertung zwei verschiedene zumeist räumlich getrennte Arbeitsschritte. Die Zusammenfassung dieser Schritte ermöglicht nun eine sofortige Bewertung von passiven und aktiven Maßnahmen an der Maschine und eine Kontrolle des Schallfeldes während aufwendiger Messungen, um z.B. Fehlmessungen zu vermeiden.

6. Literatur

- [1] Holste, F.; Zhang, Y.; Neise, W.: Experimental analysis of acoustical modes generated by the interaction of two non-synchronous rotors, AIAA /CEAS Aeroacoustics Conference, 1996, Paper AIAA/CEAS 96-1690
- [2] Tyler, J. M.; Sofrin, T. G.: Axial flow compressors noise studies, Transactions of the Society of Automotive Engineers 70, 1962