

## Entwicklung einer variablen Messeinheit für Schallfeldanalysen in Turbomaschinen

J.D. Laguna<sup>1</sup>, M. Bartelt, B. Drechsel, J. Seume

Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, 30167 Hannover, Deutschland, <sup>1</sup>Email: laguna@tfd.uni-hannover.de

### Einleitung

Für die kommenden Jahrzehnte wird ein starkes Anwachsen des allgemeinen Luftverkehrsaufkommens prognostiziert, was unmittelbar zu Emissionsanstiegen führt [1]. Dabei sind insbesondere die Lärmemissionen in der Umgebung von Flughäfen eine große Belastung für Mensch und Umwelt. Neben den einzelnen Strukturkomponenten (Fahrwerk, Klappen) stellt der Antrieb die dominierende Lärmquelle des Flugzeugs dar. Dementsprechend ist die Reduzierung der Lärmemissionen eines der herausragenden Ziele in der Entwicklung zukünftiger Flugantriebe.

Moderne Lärminderungsmaßnahmen nutzen dabei verschiedene Möglichkeiten, die bereits im Design der Antriebskomponenten, wie etwa der Anordnung der Stator-schaufeln oder die Düsengeometrie, Eingang finden. Eine weitere viel versprechende Möglichkeit ist das Auskleiden der Ein- und Auslasskanäle mit Schall absorbierenden Strukturen – den so genannten Linern. Diese wirken meist schmalbandig und sind auf charakteristische Triebwerksfrequenzen hin optimiert [2]. Während heutzutage bereits Linersysteme vielfach in den Fan- und Bypasskanälen eingesetzt werden, stellt die Applikation im Heißgaspfad der Turbine aus materialspezifischen Gründen eine weitaus größere Herausforderung dar.

Die Entwicklung und Optimierung neuartiger Lärminderungsmaßnahmen erfordert jedoch ein tiefes Verständnis der in realen Turbinen wirkenden Entstehungs- und Transportmechanismen. Im Rahmen des Verbundprojekts „Bürgernahe Flugzeug“ werden in Kooperation zwischen der Technischen Universität Braunschweig (TUBS), der Leibniz Universität Hannover (LUH) und dem DLR unter anderem lärmreduzierte Flugkonzepte entwickelt. Dazu werden am Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) der LUH experimentelle und numerische Untersuchungen zum Schalltransport durch reale Niederdruckturbinen durchgeführt und heißgasfähige Linersysteme entwickelt. Einen wesentlichen Aspekt stellt die experimentelle Vermessung der Turbinenschallfelder bei verschiedenen Betriebspunkten der Maschine dar. Dies erfordert die Entwicklung einer variablen Messeinheit, die in den Turbinenkanal integriert werden kann, um so mittels verschiedener Messmethoden wie etwa der Radialmodenanalyse (RMA) Rückschlüsse auf die dominanten Schallfeldanteile ziehen zu können.

### Theoretische Betrachtungen

Für die gezielte Schallfeldanalyse ist das Verständnis, der sich innerhalb eines schallhart berandeten Ringkanals

ausbreitenden Modenstruktur von entscheidender Bedeutung. Das akustische Druckfeld innerhalb eines Ringkanals lässt sich dabei über die linearisierte Wellengleichung in Zylinderkoordinaten  $(x, r, \theta)$  gemäß

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

angeben. Dabei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit und  $p$  der Schalldruck im akustischen Feld. Die Lösung dieser Differentialgleichung erfolgt über einen Separationsansatz und Trennung der räumlichen Variablen, so dass sich mit

$$p(x, r, \theta, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left( A_{m,n}^{\pm} e^{-ik_{m,n}^{\pm} x} \right) f_{m,n} \left( \zeta_{m,n} \frac{r}{r_o} \right) e^{im\theta} e^{i\omega t} \quad (2)$$

schließlich eine Lösung für die modale Schalldruckverteilung formulieren lässt [3]. Dabei handelt es sich um zwei Wellen gleicher Frequenz  $\omega$ , die sich in positiver und negativer Axialrichtung spiralförmig ausbreiten, in Abhängigkeit der Axialwellenzahl  $k_{mn}^{\pm}$ . Die sich im Kanal ebenfalls einstellende Schalldruckverteilung in radialer Richtung  $r$  und Umfangsrichtung  $\theta$  werden durch die Besselfunktion  $f_{mn}$ , die Eigenwerte  $\zeta_{mn}$  und den ganzzahligen Index  $m$  charakterisiert. Das resultierende Gesamtschallfeld ergibt sich schließlich aus der Summe aller einzelnen auftretenden Spiralwellen, den so genannten Moden.

Zur vollständigen Bestimmung des Schallfelds wird allerdings die in Gl. (2) aufgeführte Radialmodenamplitude  $A_{mn}^{\pm}$  benötigt, welche mittels eines empirischen Analyseverfahrens, der Radialmodenanalyse (RMA), bestimmt werden kann. So lassen sich etwa die einzelnen Modalanteile eines gemessenen Schallspektrums ermitteln und die Amplituden der dominanten Komponenten berechnen. Dazu wird zunächst das Schallfeld an mehreren, äquidistant über dem Umfang verteilten Positionen gemessen, um anschließend mittels Fouriertransformationen analytisch die Azimuthalmoden zu bestimmen. Durch Lösung eines linearen Gleichungssystems kann darüber hinaus die Radialmodenverteilung bestimmt werden.

### Messeinheit

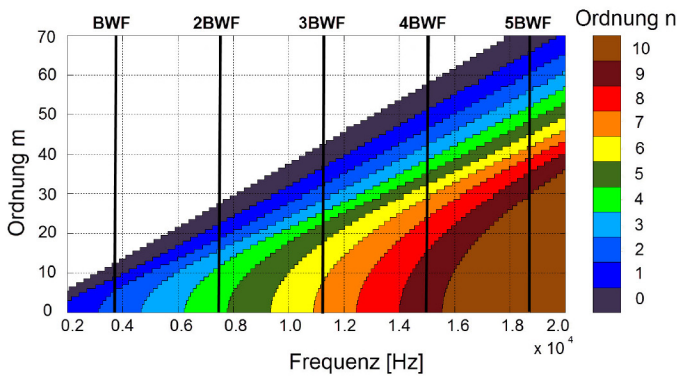
Wie eingehend bereits dargestellt ist, soll das Schallfeld innerhalb einer realen Turbine mittels einer RMA bestimmt werden, um so detaillierte Kenntnisse über die

Schalltransportmechanismen zu gewinnen. Dazu wird eine variable, in Umfangsrichtung während des Turbinenbetriebs verstellbare, Messeinheit entwickelt. Die mehrstufige Luftturbine des TFD dient dabei als Versuchsträger, wobei für diese aeroakustischen Untersuchungen eine zweistufige beschaufelte Konfiguration gewählt wird. Weitere relevante Maschinendaten sind in Tab. 1 zu entnehmen:

**Tabelle 1:** Betriebsdaten zweistufiger LT

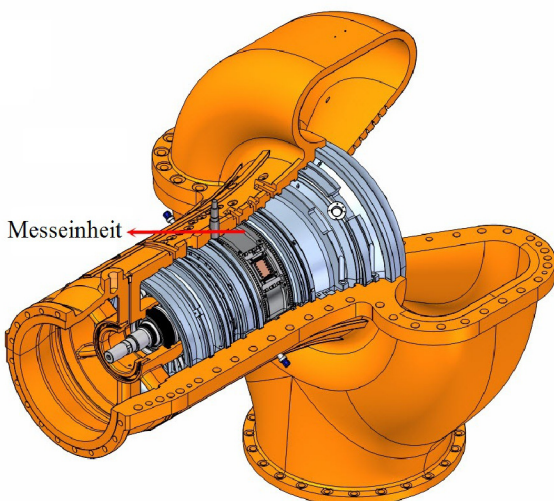
Nennleistung $P$	300 kW
Nennmassenstrom $\dot{m}$	7,8 kg/s
Nennzahl $n$	7500 $\text{min}^{-1}$
Laufschaufel	30
Leitschaufel	29

Auf Basis dieser Betriebsdaten und der Schaufelanzahlen wird zunächst eine Analyse der zu erwartenden dominanten Moden durchgeführt, um die benötigte Sensoranzahlen und Positionen zu bestimmen. Für die Luftturbine bei einer 29/30-Beschaufelung sind die in Abb. 1 dargestellten Modenstrukturen zu erwarten.



**Abbildung 1:** Ausbreitungsfähige Moden stromauf der Turbinenbeschaufelung

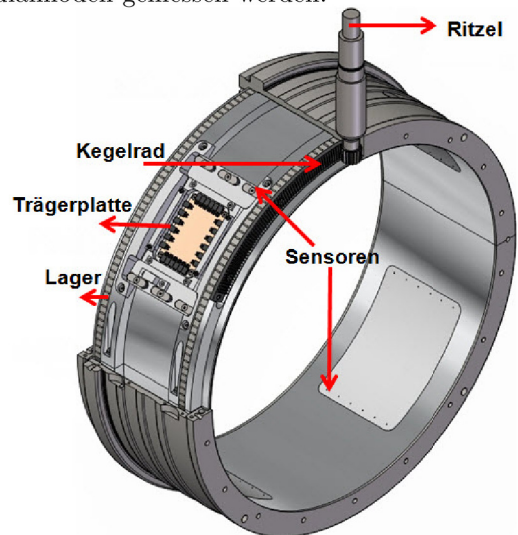
Die Bestimmung höherer Moden erfordert allerdings eine große Anzahl von umfangsverteilten Sensoren. Aus diesem Grund wird eine drehbare Messeinheit entwickelt, welche es ermöglicht mit einer geringen Sensoranzahl ausreichend viele Umfangs- und Radialmoden zu detektieren (vgl. Abb. 2).



**Abbildung 2:** Integrierte Messeinheit in die Luftturbine

Da diese Messeinheit direkt hinter der letzten Rotorreihe in den Strömungskanal der Turbine eingesetzt und während des Betriebs gedreht werden muss, ergeben sich komplexe Anforderungen an die konstruktive Umsetzung, wie etwa der Verstellmechanismus, die Integration und Versorgung der Sensoren oder die Druckabdichtung gegen die Umgebung. Schließlich wird eine geteilte Stahlringkonstruktion entworfen, die in das Turbinengehäuse eingesetzt werden kann (vgl. Abb. 2).

Die Einheit verfügt über vier austauschbare Messtechnikträgerplatten, die individuell mit Drucksensoren oder Mikrofonen bestückt werden können. Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, erfolgt die Drehung des Systems über einen Zahnring und eine Antriebswelle die durch das Turbinengehäuse nach außen geführt wird. Somit ist ein Drehwinkel von über 50 ° realisierbar. Mit einer symmetrischen Sensoranordnung auf den Trägerplatten können so beispielsweise mit 48 Mikrofonen 179 Umfangsmoden und 2 Radialmoden gemessen werden.



**Abbildung 3:** Darstellung der Messeinheit

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die entwickelte Messeinheit wird zukünftig ein wichtiges Instrument zur messtechnischen Analyse der Schallfelder in der TFD-Luftturbine darstellen. Wie es ausgelegt ist, soll es möglich sein, eine gezielte Schallfeldanalyse in einer realen Turbine durchzuführen. Nach Integration in den Strömungskanal und Inbetriebnahme, soll die Messeinheit die Messung bis zu 179 Umfangsmoden und 2 Radialmoden ermöglichen.

## Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt. <http://www.destatis.de/>
- [2] Neise, W.; Dobrzynski, W.; Michel, U.: Bewertung des Standes der Technik in der Lärmreduktionstechnologie für Verkehrsflugzeuge, 2010
- [3] Enghardt, L.; Tapken, U.; Neise, W.; Kennepohl, F.; Heinig, K.: Turbine blade/vane interaction noise: acoustic mode analysis using in-duct sensor rakes, 2001