

Experimenteller Aufbau zu Untersuchungen der Modenausbreitung in Niederdruckturbinengittern

Akif Mumcu¹, Nicolas Thouault², Dominik Broszat², Jörg Seume¹,

¹ Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD), 30167 Hannover, E-Mail: mumcu@fd.uni-hannover.de

² MTU Aero Engines AG, 80995 München, E-Mail: Nicolas.Thouault@mtu.de

Einleitung

In der heutigen Industriegesellschaft ist die Globalisierung in allen Lebensbereichen gegenwärtig, doch selten polarisiert sie die Menschen so sehr wie in den Diskussionen über Nachtflüge an großen Flughäfen.

Der Flugverkehr ermöglicht als tragende Säule durch seinen schnellen und zuverlässigen weltweiten Personen- und Gütertransport die Globalisierung. Diese Entwicklung führte in den letzten Jahrzehnten zu einem deutlichen Anstieg der Flugbewegungen in Deutschland und der Welt. Die Deutsche Flugsicherung registrierte in dem Zeitraum von 1994 bis 2012 einen Anstieg von zwei auf drei Millionen Flüge pro Jahr im deutschen Luftraum [1].

Hauptursachen des vom Flugzeug verursachten Lärms sind zum einen die Schallentstehung in den Triebwerken und zum anderen die Umströmungsgeräusche der Flugzeugzelle und Fahrwerke. Heutzutage steht die Flugzeug- und Triebwerksindustrie unter einem wachsenden Druck, die Geräuschpegel der Flugzeuge, im Besonderen der Triebwerke, erheblich unter die bereits erreichten Werte zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alle Komponenten ihres Lärmbeitrags optimiert werden. Bezogen auf den Lärm sind diese Anstrengungen auch dann notwendig, wenn diese noch nicht zu den dominierenden lärmkritischen Komponenten gehören, wie z.B. die Niederdruckturbinen. Dies ist einerseits erforderlich, um erhöhte Beiträge dieser Komponenten zu vermeiden, andererseits aber auch, um zukünftigen Verschärfungen der Lärmgrenzwerte zu entsprechen.

Um konstruktive Maßnahmen zur Schallreduzierung ergreifen zu können, ist ein tiefes Verständnis über die physikalischen Mechanismen der Schallentstehung - und ausbreitung erforderlich. Dabei ist besonders das Reflexions- und Transmissionsverhalten mehrstufiger Turbomaschinen wichtig. Für die Weiterentwicklung und Optimierung präziser Lärmvorhersageverfahren werden neben aufwändigen numerischen Methoden standardmäßig semiempirische und analytische Verfahren eingesetzt, insbesondere im Rahmen der Vorauslegung. Diese 1D-Verfahren können anhand von experimentellen Daten kalibriert und weiterentwickelt werden. Empirische Modelle, die allein auf Korrelationen aus experimentellen Ergebnissen aufbauen, sind in der Literatur nicht bekannt.

Grundlagen des Schalltransports

Für die genaue Schallfeldanalyse in durchströmten Ringgittern und Turbomaschinen ist das Verständnis der sich ausbreitenden akustischen Moden von essentieller Bedeutung. Die Basis der Berechnung der Schallausbreitung

in zylindrischen Kanälen bildet die linearisierte Wellengleichung für Zylinderkoordinaten (x, r, θ)

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

Dabei sind a die Schallgeschwindigkeit und p der Schalldruck in dem akustischen Schallfeld. Durch einen Separationsansatz und Trennung der Variablen wird diese Wellengleichung gelöst, sodass sich die Lösung für die modale Schalldruckverteilung in zylindrischen Rohren durch

$$p_{mn}(x, r, \theta, t) = \quad (2)$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_{m,n}^+ e^{-ik_{m,n}^+ x} \right) f_{m,n} \left(\zeta_{m,n} \frac{r}{r_0} \right) e^{im\theta} e^{i\omega t}$$

mit

$$k_{mn}^+ = \frac{k M_x^+ \sqrt{k^2 - (1 - M_x^2) \beta_{mn}^2}}{1 - M_x^2} \quad (3)$$

formulieren lässt. Die Gleichung (2) liefert das Schallfeld einer Schallmode m, n . Die sich im Strömungskanal ebenfalls einstellende Schalldruckverteilung in radialer Richtung r und Umfangsrichtung θ werden durch die Besselfunktion $f_{m,n}$, die Eigenwerte $\zeta_{m,n}$ und dem ganzzahligen Index m charakterisiert. Hierbei ist m die Umfangsmodenordnung und n die Ordnung der Radialmode. Das Gesamtschallfeld im Strömungskanal ergibt sich aus der Summe aller einzelnen auftretenden Schallmoden.

Das Vorzeichen der Modenordnungen bestimmt somit die Drehrichtung der Mode, das Vorzeichen von k_{mn}^+ bestimmt die axiale Ausbreitungsrichtung im Kanal in oder entgegen der Strömungsrichtung. Zur vollständigen Bestimmung des Schallfeldes werden die Radialmodenamplituden $A_{m,n}^+$ benötigt, welches mittels der Radialmodenanalyse (RMA) bestimmt werden kann. Für die RMA werden die Schalldrücke mittels axialem, radial oder äquidistant über den Umfang verteilten Mikrofonen gemessen, um anschließend mittels räumlicher Fouriertransformationen die Umfangsdruckverteilung der azimuthalen Ordnungen der Schalldruckmoden zu bestimmen. Durch Lösung eines linearen Gleichungssystems wird anschließend die Ordnung der Schalldruckmoden in radialer Richtung berechnet. Die höchste Ordnung der Mode, die mit der RMA erfasst werden

kann, wird durch die Anzahl der Mikrofone und der Anordnung bestimmt [2].

Modularer Aufbau der Messstrecke

Um die Vorhersagequalität von Modellen zur Transmission und Reflexion durch Niederdruckturbinengitter zu verbessern, wird in dem Aeroakustischen Windkanal (AWT) des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) eine nichtrotierende Schaufelreihe mit überlagerter Grundströmung für Variationen akustischer, strömungstechnischer und geometrischer Größen untersucht. Ziel dieser experimentellen Untersuchungen ist es, den Schalltransport - d.h. die Transmission und Reflexion einer ausbreitungsfähigen Schallwelle, die auf ein Schaufelgitter trifft - physikalisch besser zu verstehen und aus den gewonnenen Erkenntnissen ein erweitertes Transmissionsmodell von akustischen Moden in Niederdruckturbinen zu generieren. Dafür wird die Messstrecke des Aeroakustischen Windkanals konstruktiv und messtechnisch modifiziert (siehe Abb.1). Der modular ausgelegte Versuchsaufbau ermöglicht das Untersuchen verschiedener Schaufelgitter in einer Grundströmung mit variablem Drall. Dabei stehen insbesondere die Reduktion des Hintergrundlärms in der Messstrecke sowie die Instrumentierung im Vordergrund. Für die aeroakustischen Untersuchungen werden durch den Verbund mehrerer Lautsprecher (Schallgeneratorsegment) Schallmoden generiert, die gezielt in die Messstrecke eingekoppelt werden [3,4]. Der Aufbau der Messstrecke kann flexibel an den zu untersuchenden Versuchsgegenstand angepasst werden, d.h. insbesondere die Positionen der Messtechnikträgersegmente (MTS), des Schallgeneratorsegments, des Vordrallgitters und der Leitschaufelreihe können untereinander ausgetauscht werden (siehe Abb. 1).

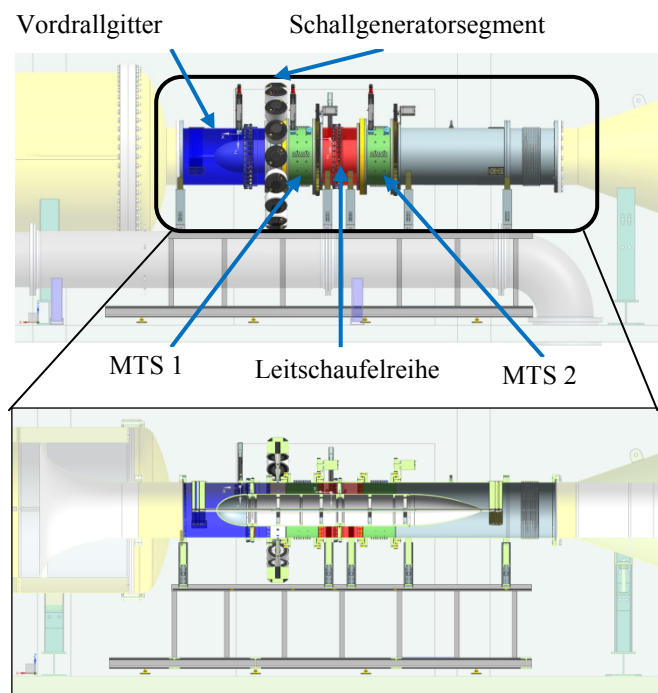


Abbildung 1: Modularer Aufbau der AWT-Messstrecke

Das Vordrallgitter hat die Funktion, einen variablen Strömungsdrall von $\pm 20^\circ$ zu generieren. Die Verstellereinheit ist durch die einfache Montierbarkeit und den Einsatz für verschiedene Schaufelgeometrien gekennzeichnet. Um die hohe Genauigkeit des Verdrehwinkels bei gleichzeitig hohen Betriebslasten zu ermöglichen, wurde ein Linearantrieb ausgewählt. Die Antriebskraft des Linearantriebs wird über einen verfahrbaren Hubkolben auf einen in Umfangsrichtung verdrehbaren Verstellring übertragen. Der Verstellring ist über speziell ausgelegte Stellhebel mit dem Zapfen der Leitradbeschaufelung verbunden (siehe Abb.2).

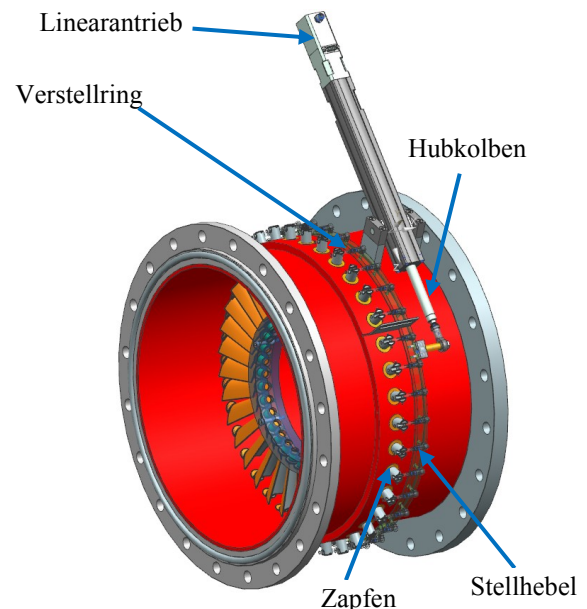


Abbildung 2: Darstellung der Leitrad Verstellereinheit

Wie eingehend bereits dargestellt wurde, soll das Schallfeld innerhalb der AWT-Messstrecke mittels einer Azimutalmodenanalyse (AMA) und einer Radialmodenanalyse (RMA) bestimmt werden, um so detaillierte Kenntnisse über die Schalltransportmechanismen zu gewinnen. Zur messtechnischen Abtastung des Schallfelds und der aerodynamischen Strömungsgrößen wird ein Messtechnikträgersegment konstruiert. Relevante Betriebsgrößen des Aeroakustischen Windkanals sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Betriebsgrößen AWT-Messstrecke

Max. Massenstrom \dot{m}	9,2 kg/s
Messstrecke \varnothing	495,6 mm
Nabendurchmesser \varnothing	330,0 mm
Eintrittstemperatur T	300 K
Max Eintrittsdruck Pt	3,2 bar
Axiale Mach-Zahl Ma_{ax}	0,16

Basierend auf diesen Betriebs- und Geometriedaten wird zunächst eine Analyse der zu erwarteten ausbreitungsfähigen Moden durchgeführt, um die benötigte Mikrofonanzahl und -positionen zu bestimmen. Die ausbreitungsfähigen Moden sind in Abb. 3 abhängig von der Frequenz dargestellt.

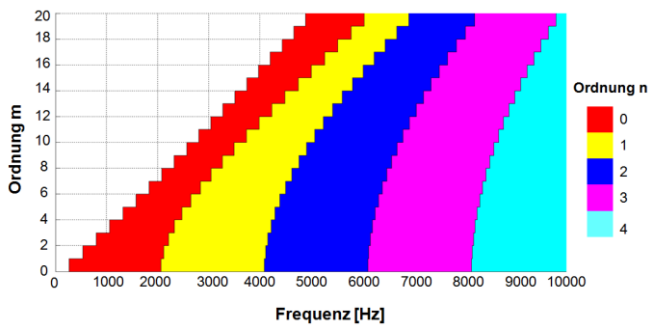


Abbildung 3: Ausbreitungsfähige Moden in der AWT-Messstrecke mit eingebautem Nabenkörper

Die Bestimmung höherer Moden erfordert eine große Anzahl von über den Umfang verteilten Mikrofonen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird wie eingangs beschrieben ein Messtechnikträgersegment ausgelegt, das um 360° rotierbar ist und flexibel mit Messtechnik bestückt werden kann. Auf dieser Messeinheit können Mikrofone und instationäre Druckaufnehmer axial, azimutal und radial angeordnet werden. Das Rotieren dieser MTS ermöglicht mit einer geringen Sensoranzahl ausreichend viele Umfangs- und Radialmoden zu detektieren, um so detaillierte Rückschlüsse über die Schalltransportmechanismen zu gewinnen [5,6]. Auf die MTS wird neben akustischer auch aerodynamische Messtechnik implementiert. Zur aerodynamischen Messtechnik zählen unter anderem radiale Sondentraversiereinheiten, Grenzschichtkämme und weitere Sondentypen. Der AWT kann druckbeladen betrieben werden, sodass sich komplexe Anforderungen an die konstruktive Umsetzung der Ansteuerung der beiden MTS und der Druckabdichtung gegen die Umgebung ergeben. Die Umfangstraversierung der MTS erfolgt über einen Schrittmotor, an dem ein Übersetzungsgetriebe angeflanscht ist, welches die Antriebskraft über eine Verzahnung auf das MTS überträgt (siehe Abb.4).

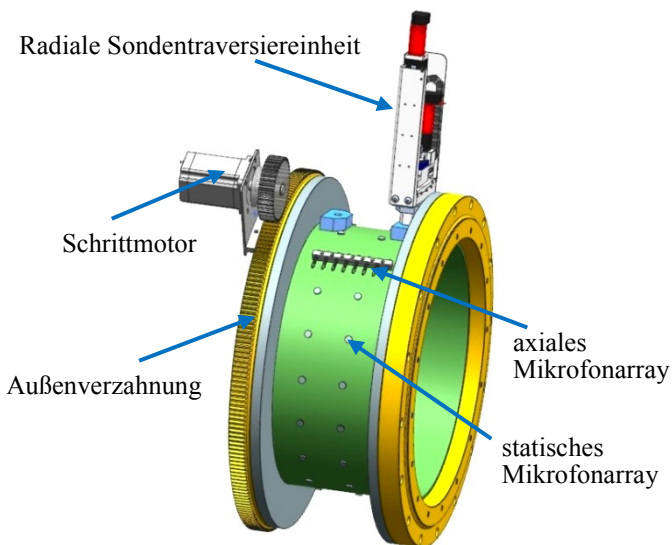


Abbildung 4: Darstellung des Messtechnikträgersegments (MTS)

Auf jedem der MTS ist ein Mikrofonarray mit 8 axial und ein Rechen mit 8 radial angeordneten Mikrofonen vorge-

sehen. Da in den geplanten Untersuchungen Moden mit einer maximalen Radialmodenordnung $n=3$ zu erwarten sind, ist die Anzahl der radial verteilten Messtellen ausreichend, um das Schallfeld aufzulösen. Alternativ ist die Durchführung der Radialmodenanalyse auch über axial angeordnete Mikrofone durchführbar, sodass die Störung der Strömung durch den Rechen vermieden werden kann [3]. Für die Radialmodenordnung $n=3$ sind auch hier acht Mikrofone notwendig. Allerdings ist aus aerodynamischen Gründen, die Grenzschichtaufdickung an den Rohrwänden bei großer axialer Länge des Nabenkörpers, eine kompakte axiale Baulänge des Nabenkörpers notwendig, sodass einerseits die Anzahl der Sensoren und andererseits deren Abstand untereinander limitiert sind. Aus diesem Grund kann die RMA über die axial angeordneten Mikrofone nur in einem eingeschränkteren Frequenzbereich durchgeführt werden, weshalb sie sich vor allem als Referenzmessung anbietet. Ein weiterer Vorteil der 8 axial angeordneten Sensoren ist eine Erhöhung der Genauigkeit der Umfangsmodenanalyse durch Mittelung der Einzelergebnisse.

Die Flexibilität dieses MTS wird durch zwei äquidistant über den Umfang angeordnete Mikrofonmesstellen, durch die z.B. schnelle Testmessungen mit einfacheren Auswertalgorithmen durchgeführt werden können, erweitert.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Um die Genauigkeit von Vorauslegungswerkzeugen hinsichtlich der Transmission und Reflexion durch Turbinengitter zu verbessern, wird ein modularer Versuchsaufbau ausgelegt und konstruiert. Der modulare Versuchsaufbau ermöglicht experimentelle Untersuchungen zur Schallausbreitung durch Strömungskanäle, wie sie in typischen Turbomaschinenanwendungen und in Flugzeugtriebwerken zu finden sind. Unter anderem sind dies die Schalltransmission durch Schaufelgitter, sowie auch Untersuchungen von schalldämpfend verkleideten Kanalwänden oder Kanaleinbauten. Außerdem ist der Versuchsstand hervorragend für die Validierung numerischer Verfahren geeignet. Weitere Anwendungsbereiche des Prüfstands stellt die Erprobung und Weiterentwicklung synthetischer Schallgeneratoren und neuartiger Schallfeldanalysetechniken dar.

Danksagung

Diese Arbeit wird im Rahmen des Luftfahrtforschungsprojektes Leise Installiertes Triebwerk (LIST TP 2.1) durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) und der MTU Aero Engines AG unter dem Förderkennzeichen LUFOV1-549-021 auf Beschluss des Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] DFS (2012): Deutsche Flugsicherung Mobilitätsbericht 2012. Langen

- [2] Moser, M.; (2009): Messtechnik der Akustik, Berlin: Springer-Verlag
- [3] Bartelt, M.; Laguna, J.D.; Seume, J.R. (2013): Synthetic Sound Source Generation for Acoustical Measurements in Turbomachines. Proceedings of the ASME Turbo Expo, 3-7 June 2013, San Antonio, USA, GT2013-95045
- [4] Bartelt, M.; Meinzer, C.E.; Laguna, J.D.; Seume, J.R. (2012): Design Methodology and Experimental Validation of an Aeroacoustic Test Rig for Turbomachinery Applications.
- [5] Laguna, J.; (2012): Entwicklung einer variablen Messeinheit für Schallfeldanalysen in Turbomaschinen (DAGA 2012), Darmstadt
- [6] Laguna, J.D.; Bartelt, M.; Seume, J. R. (2013): Impact of Swirl on the Sensitivity of the Radial Mode Analysis in Turbomachinery. Proceedings of the ASME Turbo Expo, 3-7 June 2013, San Antonio, USA, GT2013-95460