

Numerische Simulation der Schallabstrahlung vom Einlauf eines Flugtriebwerks

Norbert Schönwald, Christoph Schemel, Dandy Eschricht, Frank Thiele, Ulf Michel*

*Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Berlin; *Institut für Antriebstechnik, Abteilung Turbulenzforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Berlin;*

Email: schoenwald@pi.tu-berlin.de

Motivation

Die Konstruktion leiser Flugzeuge gewinnt durch den ständig zunehmenden Flugverkehr und der damit einhergehenden Lärmbelastung immer mehr an Bedeutung. Eine wichtige Lärmquelle am Flugzeug, die besonders beim Start eine Rolle spielt, sind die Triebwerke. Durch die Einführung von Nebenstromtriebwerken konnte der Strahlärm der Triebwerke stark reduziert werden. Dies führte aber dazu, dass der durch den Fan verursachte tonale Lärm, der sich durch den Triebwerkeinlauf ausbreitet, zu einer wichtigen Komponente des Triebwerkslärms wurde. Für den Entwurfsprozess bekommt die numerische Simulation der Schallausbreitung immer größere Bedeutung, da experimentelle Untersuchungen sehr aufwändig sind. Ziel ist die Simulation der Schallausbreitung von der Quelle bis ins Fernfeld mittels spezieller CAA-Verfahren für axialsymmetrische Rohre.

Einführung

Das für die Schallausbreitung zu betrachtende Gebiet kann entsprechend der physikalischen Gegebenheiten in verschiedene Bereiche aufgeteilt werden, die dann mit adäquaten numerischen Verfahren behandelt werden können. In einem Flugtriebwerk kann dabei zwischen dem Quellgebiet, das von einem den Schall erzeugenden instationären Strömungszustand um die Rotorblätter gekennzeichnet ist, dem von Wänden beeinflussten Ausbreitungsgebiet mit stationärer Grundströmung und dem unbeeinflussten freien Raum unterschieden werden. Die Simulation der Quellen soll hier nicht näher behandelt werden.

Im sich an das Quellgebiet anschließenden Ausbreitungsgebiet wird das Strömungsfeld in einen mittleren Grundströmungsanteil und einen Störungsanteil, der den Schall repräsentiert, zerlegt. Die Schallausbreitung in diesem Gebiet wird auf der Grundlage von Störungsgleichungen in Form der linearisierten Eulergleichungen berechnet, wobei der Grundströmungsanteil separat mittels eines CFD-Verfahrens (RANS) bestimmt wird. Als Schallquelle werden numerische Simulationsergebnisse aus dem Quellgebiet oder experimentelle Daten verwendet, die eine Randbedingung des Verfahrens darstellen. Für die Qualität der Simulation ist die Wiedergabe des Wellencharakters der Störungen von zentraler Bedeutung. Numerische Verfahren verhalten sich gewöhnlich unterschiedlich bei verschiedenen Frequenzen und verfälschen dadurch die Ausbreitung der akustischen Wellen. Diese Dissipations- und Dispersionsfehler entstehen durch die Wiedergabe der Wellenform mit einer begrenzten Punktzahl. Mit steigender Punktzahl werden diese Fehler minimiert, wobei aber der numerische Aufwand stark ansteigt. Daher wird zur Simulation ein CAA (Computational Aeroacoustic) Verfahren benutzt, das spezielle, für die Schallausbreitung optimierte, Diskretisierungsschemata höherer Ordnung verwendet. Die räumliche Diskretisierung erfolgt mit dem Dispersion-Relation-Preserving (DRP) Schema von Tam und Webb [1] und die Zeitintegration mit dem Low-Dissipation and Low-Dispersion Runge-Kutta (LDDRK) Schema von Hu u.a. [2] in der speicheroptimierten 2N-Storage-Formulierung nach Stanescu und Habashi [3].

Trotz der Optimierungen ist das CAA-Verfahren noch so aufwändig, dass eine Vorhersage des Schalls im Fernfeld nicht wirtschaftlich möglich ist. Die Schallausbreitung durch den Einlauf wird daher nur bis zu einer Interfacefläche im Nahfeld des Einlaufs simuliert. Von dort erfolgt dann die Fernfeldberechnung mit einem Integrationsverfahren basierend auf der akustischen Analogie von Ffowcs Willams und Hawksings (FWH) [4].

Axialsymmetrisches 3D-CAA-Verfahren

Das Schallfeld in einem Triebwerkeinlauf ist dreidimensional, was die Simulation für hohe Frequenzen der Schallquelle mit einem vollständigen 3D-CAA-Verfahren schnell sehr aufwändig macht, da eine entsprechend hohe Anzahl von Gitterpunkten zur Auflösung des Wellencharakters erforderlich ist. Unter der Voraussetzung von Axialsymmetrie für die akustischen Randbedingungen und die Grundströmung ist es aber möglich, das Schallfeld mittels Fouriertransformation in Umfangsrichtung in Azimutalmoden zu zerlegen. Diese Reihenzerlegung überführt die ursprünglichen 3D-Gleichungen in ein äquivalentes System von 2D-Gleichungen. Aus der Praxis ist bekannt, dass in Flugtriebwerken nur eine begrenzte Anzahl von ausbreitungsfähigen Azimutalmoden angeregt wird. So reduziert sich der Simulationsaufwand auf die Lösung etwa zehn zweidimensionaler komplexer Differenzialgleichungssysteme [5]. Unter der für einen Triebwerkeinlauf sinnvollen Annahme von drallfreier Grundströmung sind Real- und Imaginärteil der Schwankungsgrößen in den Störungsgleichungen für die einzelnen Azimutalmoden entkoppelt und können unabhängig voneinander gelöst werden. Aus den separat gelösten Moden kann anschließend wieder ein vollständiges dreidimensionales Schallfeld zusammengesetzt werden.

Die Quellen werden genau wie die Störungsgleichungen in Azimutalmoden zerlegt und so die vorkommenden Moden mit Amplitude und Phasenlage bestimmt. Die eigentliche Simulation erfolgt mit normalisierten Moden, die durch die analytische Lösung als Randbedingung vorgegeben werden. Bei der anschließenden Rekonstruktion des 3D-Schallfeldes werden die einzelnen Moden dann mit der Amplitude der entsprechenden Quellmode skaliert und unter Berücksichtigung ihrer Phase überlagert. Für Parameterstudien verschiedener Schaufelgeometrien, bei denen die Frequenz und die Grundströmung nahezu gleich bleiben, bietet dieses Vorgehen den Vorteil, dass statt der numerisch aufwändigen Simulation der Moden lediglich eine neue Rekonstruktion mit veränderten Amplituden und Phasen durchgeführt werden muss.

Validierung und Anwendung

Die Validierung dieses Verfahrens erfolgte an Testfällen für kreiszylindrische Rohre und Ringspalte, bei denen die analytische Lösung bekannt ist. Abbildung 1 (links) zeigt die momentanen Druckkonturen für die Mode $m = 6$ eines kreiszylindrischen Rohres bei einer konstanten Anströmung ($M = -0.5$) von rechts. Die Wellen breiten sich vom linken Rand entgegen der Strömung aus. Oberhalb der Achse ($y = 0$) ist die numerische Lösung dargestellt, unterhalb

die analytische. In Abbildung 1 (rechts) sind Druckkonturen für die Mode $m = 10$ eines Ringspalts unter den gleichen Strömungsbedingungen dargestellt. Für beide Testfälle ist eine gute Übereinstimmung in der Phasenlage zwischen analytischer und numerischer Lösung zu erkennen. Die Amplituden der numerischen Lösung fallen aber mit der Lauflänge der Welle leicht ab, was im numerischen Verfahren begründet liegt. Bei der typischen Länge eines Triebwerkseinlaufs liegt der Fehler aber in akzeptablen Bereichen, so dass das Verfahren als einsetzbar betrachtet werden kann.

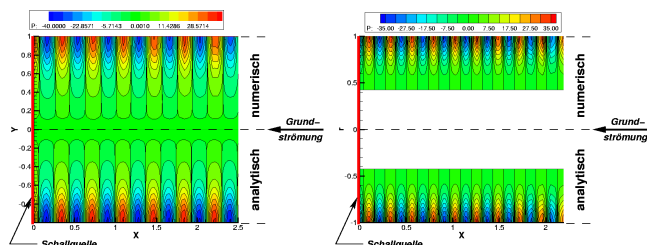


Abbildung 1: Vergleich der momentanen Druckschwankungen zwischen numerischer und analytischer Lösung für ein zylindrisches Rohr (links) und einen Ringspalt (rechts)

Als eine erste Anwendung wurde die Schallausbreitung durch einen generischen glockenförmigen Triebwerkseinlauf simuliert. Abbildung 2 zeigt die momentanen Druckschwankungen für die 2D-Lösung der $m = 4$ Mode. Aus allen im Quellgebiet angeregten und im Einlauf ausbreitungsfähigen Moden wurde dann das vollständige dreidimensionale Schallfeld rekonstruiert. Abbildung 3 zeigt eine Momentaufnahme der Druckisoflächen des rekonstruierten 3D-Schallfeldes.

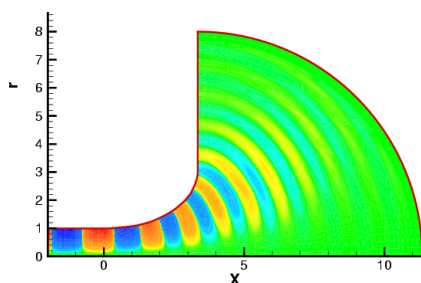


Abbildung 2: Momentane Druckschwankungen der 2D Lösung für die Mode $m=4$, $n=1$

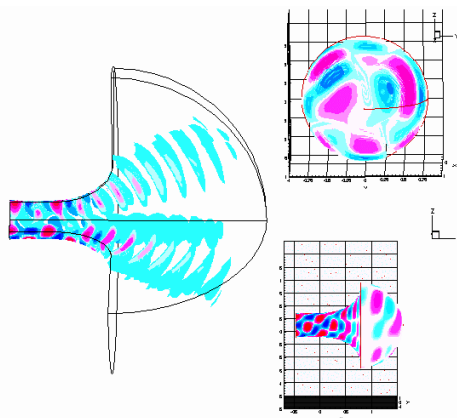


Abbildung 3: Druckisoflächen des rekonstruierten 3D Schallfeldes. Links: Schnitt des Einlaufs. Oben: Ansicht von vorn. Rechts: Seitenansicht.

Fernfeldvorhersage

Die Fernfeldvorhersage erfolgt mittels eines Integrationsverfahrens basierend auf den akustischen Analogie von Ffowcs Williams and Hawkins (FWH). Zunächst wurde das FWH-Verfahren anhand von Testfällen mit bekannter analytischer Lösung validiert. Dazu wurden Fälle mit Mono- und Dipolquellen verwendet, die die Durchströmung der Austauschfläche und die Relativbewegung von Beobachter und Quelle berücksichtigen.

Zur Anwendung des Verfahrens wurde eine Fernfeldcharakteristik für des glockenförmigen Triebwerkseinlauf berechnet und mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Die verwendeten Messungen wurden nicht für die Validierung von numerischen Verfahren durchgeführt. Die Quell- und Fernfeldmikrofone sind nicht miteinander kalibriert, so dass nur ein qualitativer Vergleich zwischen CAA-FWH-Verfahren und dem Experiment möglich ist. Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Fernfeldcharakteristiken. Es ist eine ähnliche Verteilung von Maxima und Minima für den Schalldruckpegel erkennbar. Aber ohne quantitativen Vergleich kann die Qualität der Lösung nicht abschließend bewertet werden.

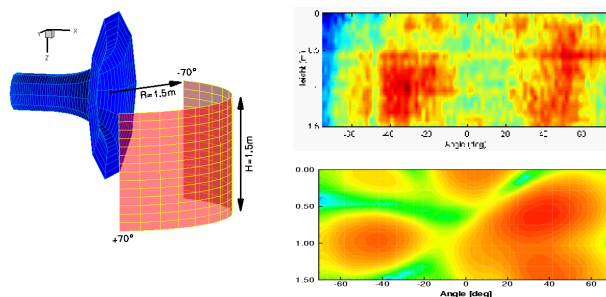


Abbildung 4: Vergleich der Fernfeldcharakteristiken für den glockenförmigen Triebwerkseinlauf zwischen CAA-FWH (unten) und Experiment (oben)

Schlussfolgerungen

Das dargestellte hybride Simulationsverfahren bestehend aus einem axialsymmetrischen 3D-CAA-Verfahren und einem FWH-Integralverfahren ermöglicht im Vergleich zu vollständig 3D arbeitenden Verfahren die zeitnahe Vorhersage des durch einen Triebwerkseinlauf ins Fernfeld abgestrahlten Schalls. Dies ermöglicht den Einsatz als Werkzeug im ingenieurmäßigen Umfeld.

Die einzelnen Verfahren wurden an analytischen Testfällen validiert. Als eine erste Anwendung wurde ein generischer glockenförmiger Triebwerkseinlauf simuliert. Der qualitative Vergleich mit experimentellen Ergebnissen ist vielversprechende Übereinstimmungen. Eine quantitative Bewertung mit geeigneten Experimenten steht noch aus.

- ¹ Tam, C.K.W.; Webb, J.C.: Dispersion-Relation-Preserving Finite Difference Schemes for Computational Acoustics. *J. Comp. Physics*, **107** (1993).
- ² Hu, F.Q.; Hussaini, M.Y.; Manthey, J.L.: Low-Dissipation and Low-Dispersion Runge-Kutta Schemes for Computational Acoustics. *J. Comp. Physics*, **124** (1996).
- ³ Stanescu, D.; Habashi, W.G.: 2N-Storage Low Dissipation and Dispersion Runge-Kutta Schemes for Computational Acoustics. *J. of Comp. Physics*, **143** (1998).
- ⁴ Farassat, F.: Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise. *AIAA Journal*, 1122-1130 (1981).
- ⁵ Li, X.D.; Schemel, C.; Michel, U.; Thiele, F.: On the azimuthal mode propagation in axisymmetric duct flows, *AIAA Paper* **2002-2521** (2002).