

Die Simulation von Strömungslärm bei Verkehrsflugzeugen

Roland Ewert¹

¹ DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Technische Akustik, Email: Roland.Ewert@dlr.de

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten konnten die Schallemissionen von Transportflugzeugen durch die kontinuierliche Erhöhung des Nebenstromverhältnisses der Triebwerke deutlich reduziert werden. Die derzeitigen Reduktionen führen dazu, dass nunmehr speziell beim Landeanflug das Fahrwerk sowie das Hochauftriebssystem des Flügels (Vorflügel und Klappen) als wesentliche Schallquellen identifiziert werden können. Ursächlich für die Schallentstehung an Fahrwerken und Hochauftriebshilfen wie dem Vorflügel ist deren stark verwirbelte, das heißt turbulente Umströmung. In der Zukunft werden schnelle Simulations- und Prognosewerkzeuge notwendig werden, die eine lärmarme Auslegung dieser Baugruppen schon in der Entwicklungsphase ermöglichen. Das DLR verfolgt derzeit zwei schnelle Simulationsstrategien, die in diesem Beitrag beispielhaft anhand der Simulation der Schallgenerierung an der Flügelhinterkante sowie am Vorflügel vorgestellt werden.

Numerische Methoden

In den vergangenen Jahren wurden im Rahmen der Computational Aeroacoustics (CAA) spezielle numerische Verfahren zur zeitgenauen Simulation der Schallausbreitung im strömenden Medium entwickelt. Die Verfahren basieren auf Störungsgleichungen, die die zeitliche Entwicklung von Druck-, Dichte- und Geschwindigkeitsstörungen in einem zeitgemittelten Strömungsfeld beschreiben und damit akustische Refraktionseffekte in der Strömung erfassen. Die linearisierten Eulergleichungen (linearized Euler equations - LEE) berücksichtigen sowohl die Ausbreitung von akustischen Moden als auch von Wirbel- und Entropiemoden. Durch die Verwendung von akustischen Störungsgleichungen (acoustic perturbation equations - APE) werden ausschließlich akustische Moden aufgelöst, während z.B. die Wirbelkonvektion durch entsprechende Wirbelquellen vorgegeben werden muss. Alle genannten Störungsgleichungen sind im CAA Verfahren PIANO des DLR implementiert.

Als ursächlich für die Schallgenerierung von turbulent umströmten Oberflächen wird die Wechselwirkung der Wirbel behafteten instationären Strömung mit abrupten Geometrieänderungen, wie sie z.B. an einer Flügelhinterkante auftreten, angesehen. Die Generierung von Schall durch die Interaktion eines Wirbels mit einer Geometrie kann mittels der verschiedenen Störungsgleichungen direkt simuliert werden.

Das Schlüsselproblem ist die Berücksichtigung von turbulenzbedingten Strömungsschallquellen. Große Fortschritte bei der strömungsschallakustischen Simulation turbu-

lenter Strömungen konnten in den vergangenen Jahren durch die Kopplung der Grobstruktursimulation (engl. Large Eddy Simulation, LES) mit CAA Methoden erzielt werden. Ein Nachteil der LES ist jedoch die erhebliche Simulationszeit in der Größenordnung von 1000 CPUh, die den Einsatz eines hybriden LES/CAA Ansatzes als Auslegungsverfahren im Entwurfsprozess verbietet.

Das DLR verfolgt derzeit zwei schnelle Simulationsstrategien, die eine Vorhersage der turbulenzbedingten Schallgenerierung ermöglichen, dabei jedoch lediglich wenige Stunden Rechenzeit auf einem PC benötigen. Beim ersten Simulationskonzept, dem Wirbelimpfverfahren, kann die Effizienz beurteilt werden, mit der die Energie eines Testwirbels an verschiedenen Geometrien in Schall konvertiert wird, indem die unterschiedlichen akustischen Antworten miteinander verglichen werden. Beim zweiten Simulationskonzept werden mittels stochastischer Methoden synthetische fluktuierende Turbulenzquellen generiert, die es erlauben, zusätzlich den Einfluss der lokalen Turbulenzintensitäten auf die Schallgenerierung zu berücksichtigen. Ein neues Verfahren wird vorgestellt, welches die zusätzlichen Schwankungen sehr effizient und mit hoher physikalischer Qualität rekonstruiert.

Turbulente Quellmodellierung Wirbelimpfen

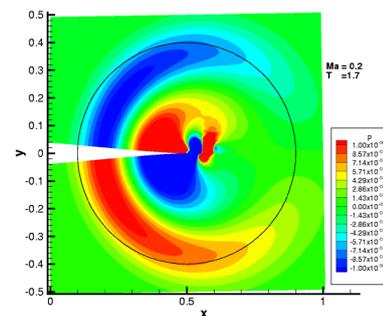


Abbildung 1: Schallabstrahlung von einer Profilhinterkante.

Das Wirbelimpfverfahren nutzt die Eigenschaft der linearisierten Eulergleichungen, sowohl die Ausbreitung von akustischen Moden als auch die Wirbelkonvektion zu beschreiben. Es werden keine instationären turbulenten Quellen genutzt, sondern vielmehr zu Beginn der Simulation eine Anfangswirbelstörung vorgegeben. Der Anfangswirbel repräsentiert dabei einen einzelnen charakteristischen Wirbel (Eddy) des turbulenten Quellgebietes. Entsprechend platziert, konvektiert der Wirbel entlang einer zu untersuchenden Geometrie und generiert eine transiente akustische Antwort. Abbildung 1 zeigt ein Momentanbild der instationären Druckstörungen an

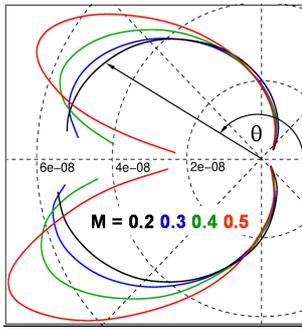


Abbildung 2: M^4 skalierte Richtcharakteristiken des Hinterkantenproblems.

einer Profilhinterkante, die durch einen zuvor stromauf eingimpften Testwirbel verursacht wurden. Mittels der Methode können beispielhaft Geschwindigkeitsskalierungsgesetze sowie Richtcharakteristiken ermittelt werden. Abbildung 2 zeigt die mit M^4 skalierten Richtcharakteristiken, die für Machzahlen im Bereich von $M = 0.2 \dots 0.5$ für die Hinterkante ermittelt worden sind [1]. Es werden die unter $\theta = 180^\circ$ stromauf laufenden akustischen Wellen in der Grenzschicht von der Wand weggebrochen, so dass sich für die höheren Machzahlen eine Abweichung von der theoretischen Kardioide ergibt, wobei die Abstrahlung unter einem Winkel von ca. 140° verstärkt wird. Die Simulationen unterstreichen deutlich den Einfluß einer Grundströmung auf die Schallausbreitung.

Stochastische Quellmodellierung

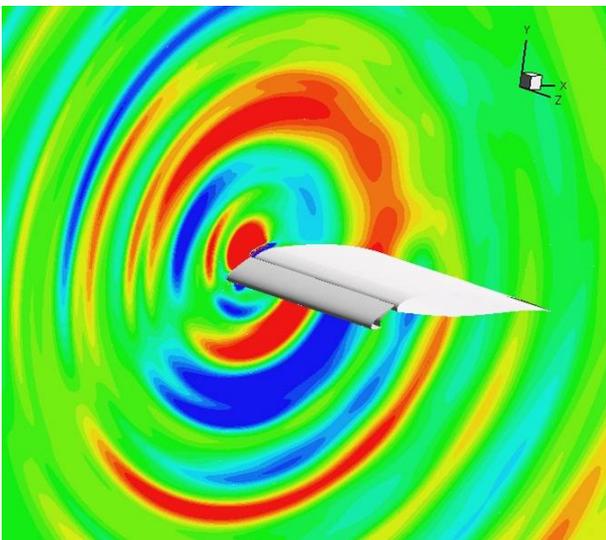


Abbildung 3: APE/SDF Simulation der Schallabstrahlung vom Vorflügel.

Neben der Effizienz, mit der Wirbelstörungen an einer Geometrie in Schall umgesetzt werden, beeinflusst die geometrische Formgebung einer Oberfläche außerdem die lokale Stärke der verwirbelten Umströmung und damit die breitbandige turbulente Schallerzeugung. Um beide Effekte auf die Schallentstehung simulieren zu können, muß der Einfluß des turbulenten Nahfeldes

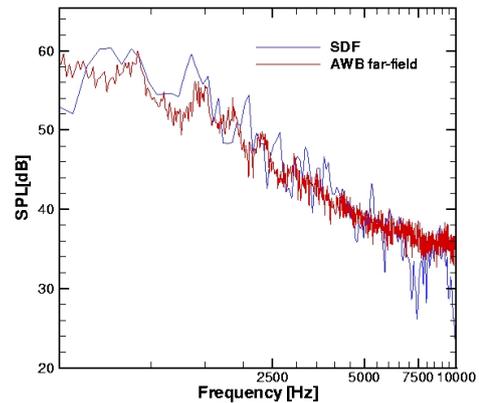


Abbildung 4: Vergleich des simulierten Nahbandspektrums mit experimentellen Messungen im akustischen Windkanal Braunschweig (AWB).

berücksichtigt werden. Dieses ist für eine schnelle Umströmungslärmsimulation auf der Basis einer stationären RANS Simulation als approximative Beschreibung des turbulenten Strömungsproblems möglich. Aufsetzend auf den stationären RANS Informationen werden dabei die turbulenten Schwankungen innerhalb der Strömung rekonstruiert. Durch die Entwicklung eines neuen Fluktuationsmodells (Solenoidal Digital Filtering = SDF) [2] konnte jetzt ein entscheidender Fortschritt erzielt werden. Das Modell ist in der Lage die turbulenten Schwankung sehr effizient und mit hoher physikalischer Qualität zu rekonstruieren. Das SDF Modell hat einige Vorteile im Vergleich zu klassischen Verfahren, die auf stochastischen Fouriermoden aufsetzen. Es kann für stark inhomogene Strömungsfelder eingesetzt werden und rekonstruiert die stationären Vorgaben für die lokale turbulente kinetische Energie und die turbulente Längenskala mit guter Genauigkeit. Dabei sind die modellierten wirbelbedingten Geschwindigkeitsfelder streng divergenzfrei (solenoidal). Breitbandspektren werden kontinuierlich aufgelöst und nicht durch eine Ansammlung diskreter Töne repräsentiert. Abbildung 3 zeigt die Schallabstrahlung vom Vorflügel eines Hochauftriebssystems. Abbildung 4 zeigt ein zugehöriges Nahbandspektrum im Vergleich zu einer Messung, die im Rahmen des Projektes FREQUENZ im akustischen Windkanal des DLR in Braunschweig durchgeführt worden ist. Sehr gute Übereinstimmung im Verlauf der Spektren kann festgestellt werden.

Literatur

- [1] Lummer, M., Delfs, J.W., Lauke, T., Simulation of the influence of trailing edge shape on airfoil sound generation. Proceedings of the 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Hiltonhead, USA. AIAA Paper 2003-3109
- [2] Ewert, R., Emunds, R., CAA Slat Noise Studies Applying Stochastic Sound Sources Based On Solenoidal Digital Filters. Proceedings of the 11h AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, USA. AIAA Paper 2005-2862