

# Berechnung des Umströmungsgeräusches vorwärtsgeneigter Stufen mit Hilfe eines synthetischen turbulenten Geschwindigkeitsfeldes

Marcus Bauer

*Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden*

*Gegenwärtiger Arbeitsort: DLR\*, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig*

*Email: marcus.bauer@dlr.de*

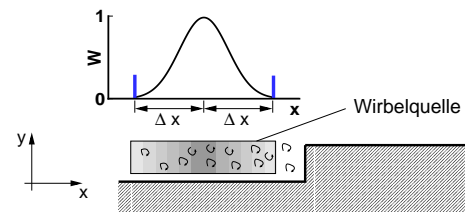
## Einleitung

Umströmungsgeräusche belasten beim Hochgeschwindigkeitsverkehr (Schiene, Straße, Luft) sowohl die Bevölkerung als auch die Reisenden erheblich. Für den Entwurf lärmarmen Verkehrsmittel benötigt man deswegen Werkzeuge, die bereits am Computer eine akustische Optimierung entsprechender Fahrzeugkomponenten ermöglichen. Die erforderliche Rechenzeit dieser Programme kann dabei erheblich reduziert werden, wenn man die Turbulenz als Schallquelle künstlich modelliert. Im Hinblick auf Umströmungsgeräusche wurde ein derartiges synthetisches, turbulentes Geschwindigkeitsfeld bisher zur Berechnung von breitbandigem Hinterkantenlärm verwendet [1, 2]. Die aktuellen Untersuchungen zielen darauf ab, damit auch die Schallerzeugung an einer vorwärtsgeneigten Stufe (siehe z.B. Fensterdichtungen) vorherzusagen.

## Rechenverfahren

Beim verwendeten Verfahren [1] werden die Feldgrößen in einen zeitgemittelten und einen Schwankungsanteil, der sowohl turbulente als auch akustische Fluktuationen enthält, aufgespalten. Im ersten Schritt berechnet der CFD<sup>1</sup> Code FLOWer des DLR die viskose zeitgemittelte Strömung als Lösung der RANS<sup>2</sup> Gleichungen. Die Schallerzeugung und -ausbreitung wird im zweiten Schritt als Lösung einer modifizierten Form der LEE<sup>3</sup>, die durch einen Quellterm angeregt werden, simuliert. Der Quellterm (Wirbelquelle) wird aus einem synthetischen turbulenten Geschwindigkeitsfeld  $\mathbf{v}_{st}$  [3] berechnet, welches durch eine Summe von Fouriermoden gegeben ist. Er soll keinen Schall direkt anregen, sondern vielmehr turbulente Schwankungen leise in die LEE einbringen. Zur eigentlichen Schallerzeugung kommt es erst, wenn die eingebrachte Turbulenz die Stufe überströmt.

Wie in den Abb. 1 und 2 zu sehen ist wird die Wirbelquelle, d.h.  $\mathbf{v}_{st}$ , zur Verminderung der Rechenzeit nur in einem begrenzten Gebiet berechnet, und nicht überall, wo in Wirklichkeit Turbulenz vorhanden ist. Durch das plötzliche Ein- und Ausschalten der Quelle an ihrem Ein-/Ausströmrand wird jedoch unerwünschter Schall (Störschall) generiert, da die Entstehung bzw. das Verschwinden von Wirbeln Lärm erzeugt.



**Abbildung 1:** Störschallvermeidung durch eine Gewichtsfunktion  $W$ .

Dieser Störschall kann beispielsweise mit einer Gewichtsfunktion  $W$ ,  $0 < W < 1$ , reduziert werden [1, 2], siehe Abb. 1. Diese Funktion blendet die Wirbelquelle in der Konvektionsrichtung von  $\mathbf{v}_{st}$  (hier:  $x$ -Richtung) sanft ein und wieder aus. Sie ist einfach anwendbar, führt allerdings zu einer langgezogenen Quelle und zudem ist die Verringerung des Störschalles in bestimmten Frequenzbereichen unzureichend, siehe unten.

Eine andere Möglichkeit der Störschallreduktion folgt aus einem Ansatz, mit dessen Hilfe ein zusätzlicher Quellterm für die erweiterte Lighthill-Analogie nach Curle zur Auslöschung des Störschalles im Fernfeld abgeleitet wurde [4]. Dieser Ansatz wurde auf den Fall „LEE + Quellterm“ übertragen, wobei sich hier als Zusatzquelle im wesentlichen das Produkt aus  $\partial W/\partial x$  und dem Zeitintegral über die ursprüngliche Quelle ergibt. Die Abmessung  $\Delta x$  aus Abb. 1 muss nun lediglich noch so groß gewählt werden, dass  $\partial W/\partial x$  numerisch ausreichend genau wiedergegeben wird. Somit führt die Berechnung der Zusatzquelle mit dem verwendeten  $\mathbf{v}_{st}$  zu keiner Erhöhung der Rechenzeit. Nachteilig ist jedoch ein zusätzliches hydrodynamisches Nahfeld, welches durch die Korrekturquelle induziert wird.

## Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen stammen von zweidimensionalen Berechnungen an einer abgerundeten Stufe mit dem Krümmungsradius  $r_s = h/2$ , Stufenhöhe  $h = 12$  mm, die mit einer Geschwindigkeit von 50 m/s angeströmt wurde.

Abb. 2 zeigt eine Momentaufnahme des Schwankungsdruckes  $p'$  aus der CAA-Rechnung. Die Wirbelquelle befindet sich vor der Stufe, ihre große Ausdehnung in  $x$ -Richtung kommt dadurch zustande, dass hier der

\*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

<sup>1</sup>Computational Fluid Dynamics

<sup>2</sup>Reynolds Averaged Navier Stokes

<sup>3</sup>Linearized Euler Equations

Störschall nur durch eine Gewichtsfunktion  $W$  vermieden wurde. Man erkennt, dass im Bereich der Wirbelquelle

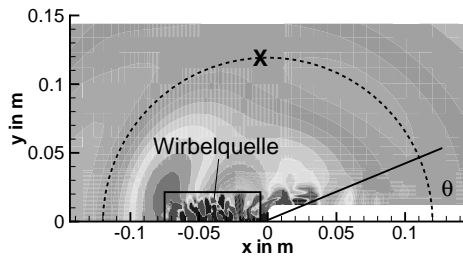


Abbildung 2: Momentaufnahme von  $p'$ .

kleinskalige hydrodynamische Schwankungen großer Amplitude angeregt und über die Stufe konvektiert werden und dabei langwelligen Schall erzeugen.

In Abb. 3 sind Schalldruck-Spektren zu sehen, die am Punkt  $\mathbf{X}$ , siehe Abb. 2, ausgewertet wurden. Störschall wurde einerseits nur durch eine Gewichtsfunktion  $W$ , andererseits durch zusätzliche Quellen vermieden, wobei die Ausdehnung des Quellgebietes in  $x$ -Richtung auf etwa ein Viertel reduziert wurde. Ein Vergleich von Spektren be-

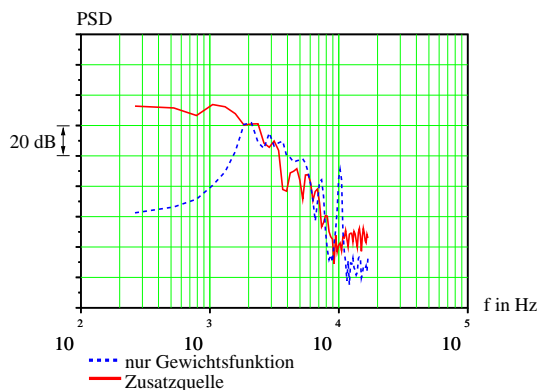


Abbildung 3: Spektren von  $p'$  am Punkt  $\mathbf{X}$  für beide vorgestellten Mechanismen zur Störschallreduktion.

vor die turbulenten Fluktuationen von der Quelle die Stufe erreicht hatten (Störschall) und nachdem die Schallproduktion an der Stufe eingesetzt hatte (Störschall und Nutzschaall) ergab, dass die Simulation bei Verwendung der Zusatzquelle etwa im Bereich von 0 - 8 kHz auswertbar ist, während der auswertbare Frequenzbereich ohne die Kompensationsquelle trotz des größeren  $\Delta x$  nur von 2 - 5 kHz reicht. In diesen Bereichen übertrifft das Spektrum mit Nutzschaall von der Stufe das Störspektrum um mehr als 6 dB. Im Bereich von 2 - 5 kHz sind sich die beiden Spektren aus Abb. 3 ähnlich. Der starke Abfall mit steigender Frequenz (etwa 50 dB zwischen 1 kHz und 5 kHz im Spektrum mit Zusatzquelle) kommt vermutlich dadurch zustande, dass die CAA-Rechnung zweidimensional, reibungsfrei und linear (LEE) durchgeführt wurde. Dadurch werden die Wirbelstrukturen auf ihrem Weg von der Quelle zur Stufe durch das Grenzschichtprofil immer mehr gestreckt, ohne allerdings in kleinere Wirbel, welche hochfrequenten Lärm an der Stufe generieren

würden, zu zerfallen.

Abb. 4 zeigt Richtcharakteristiken  $\Gamma(\theta) = \tilde{p}(\theta)/\tilde{p}(\theta)_{\max}$  des Schwankungsdruck-Effektivwertes  $\tilde{p}$ . Die Druck-Zeit-Signale wurden auf einem Kreis mit Radius  $R = 10h$  um den Koordinatenursprung aufgezeichnet, siehe Abb. 2. Man erkennt deutlich, dass die Form der über alle Fre-

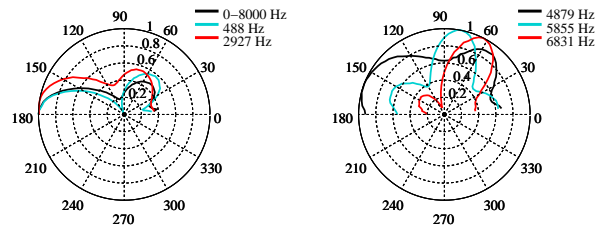


Abbildung 4: Richtcharakteristiken  $\Gamma(\theta)$  für unterschiedliche Frequenzen.

quenzen berechneten Richtcharakteristik durch die tiefen Frequenzen bestimmt wird, und dass  $\Gamma(\theta)$  bei hohen Frequenzen deutlich andere Formen aufweist.

## Schlussfolgerungen

Das Störschallproblem konnte durch Korrekturquellterme ohne eine Erhöhung der Rechenzeit erheblich entschärft werden; ein Fehler des Verfahrens ist jedoch noch in der übermäßigen Wirbelstreckung zu vermuten. Trotz der Erfolge sollte man nach einer Alternative zu der verwendeten Korrekturquelle suchen, um das damit einhergehende, unerwünschte, hydrodynamische Nahfeld zu umgehen.

## Förderung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen FKZ 19 U 1074 A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Literatur

- [1] Bauer, M., „Berechnung der Schallabstrahlung überströmter Hinterkanten“, Diplomarbeit, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Technische Universität Dresden, 2002
- [2] Ewert, R., Bauer, M., „Towards the Prediction of Trailing Edge Noise via Stochastic Surface Sources“, AIAA-Paper 2004-2861, 2004
- [3] Kraichnan, R. H., „Diffusion by Random Velocity Fields“, The Physics of Fluids, Vol. 13, No. 1, pp. 22-31, 1970
- [4] Wang, M., Lele, S. K., Moin, P., „Computation of Quadrupole Noise Using Acoustic Analogy“ AIAA Journal, Vol. 34, No. 11, pp. 2247-2254, 1996