

## Über die Simulation der Umströmungslärmquellen

Thilo Michels<sup>1</sup>, Hannes Marckmann<sup>2</sup>, Marian Markiewicz<sup>3</sup>, Olgierd Zaleski<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail: michels@novicos.de

<sup>2</sup> Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail: marckmann@novicos.de

<sup>2</sup> Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail: markiewicz@novicos.de

<sup>2</sup> Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail: zaleski@novicos.de

### Einleitung

Die Simulation des strömungsbedingten Lärms basiert in den meisten Fällen auf numerisch ermittelten Quellen. Um präzise Simulationsergebnisse zu ermöglichen, sollten die zugrundeliegenden Strömungsfelder hinreichend fein aufgelöst werden. Dies gilt für alle Verfahren, mit denen die Schallausbreitung berechnet werden kann. Je nach geforderter Güte besteht die Möglichkeit, zeitlich gemittelte oder räumlich gefilterte Berechnungsansätze für die Berechnung der Strömung zu verwenden, wobei letztere die höhere Genauigkeit bieten. Weiter hat die Netzauflösung einen Einfluss auf die Genauigkeit der Quellmodellierung. Hier gilt es, einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand zu finden. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst am Beispiel eines Freistrahles dargestellt, welchen Einfluss die Größe des Quellbereiches und die Anzahl der verwendeten Quellen auf die Schallabstrahlung eines Freistrahles haben. Nachfolgend wird die Modellierung einer Grenzschichtanregung beschrieben. Hier wird dargestellt, welchen Einfluss die Modellierung der Strömung auf die Anregung einer Struktur und somit auf das Schallfeld hat.

### Aeroakustische Quellen

Aeroakustische Quellen entstehen an umströmten Hindernissen, die eine zeitliche Variation der Strömungsgrößen hervorrufen. Je nach Quellmechanismus entstehen akustische Felder, die durch Ersatzquellen beschrieben werden können. So entstehen durch Druckfluktuationen an harten Oberflächen dipolartige Schallfelder und durch Scherspannungen in turbulenten Strömungen Schallfelder, die durch Quadrupole beschrieben werden können. Zudem entstehen durch zeitlich fluktuierende Volumenströme monopolarartige Schallfelder. Die verschiedenen Quellarten sind in Abbildung 1 am Beispiel eines von links umströmten Außenspiegels dargestellt.

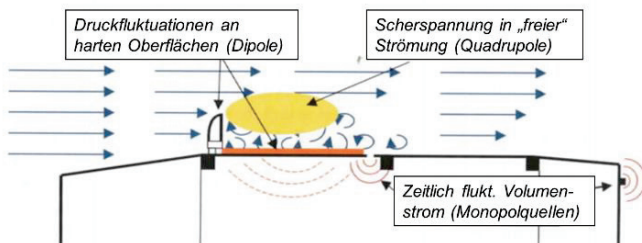


Abbildung 1: Strömungsschallquellen einer umströmten Struktur [4].

Bei der Untersuchung der Quadrupolquellen wird das Programm Virtual.Lab [5] verwendet. Die Modellierung der Quellen erfolgt in dieser Anwendung auf der Basis der Arbeiten von Lighthill [3], der die inhomogene Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

mit einem Spannungstensor  $T_{ij}$

$$T_{ij} = \rho V_i V_j + (p' - c_0^2 \rho') \delta_{ij} + \sigma_{ij} \quad (2)$$

formuliert hat.  $\rho$  und  $\rho'$  beschreibt die gesamte bzw. die fluktuierende Dichte,  $p'$  den fluktuierenden Druck,  $V$  den Geschwindigkeitsvektor,  $t$  die Zeit,  $c_0$  die Schallgeschwindigkeit,  $\sigma_{ij}$  den viskosen Spannungstensor und  $x$  die Raumkoordinate. Unter der Annahme einer hohen Reynoldszahl und einer isentropen Strömung bei einer niedrigen Machzahl vereinfacht sich die Formulierung des Lighthillschen Spannungstensors zu

$$T_{ij} = \rho_0 V_i V_j. \quad (3)$$

Für die Untersuchung der Grenzschichtanregung wurden die Drücke der Strömung analysiert, so dass keine Quellmodellierung hergeleitet werden muss.

### Untersuchung der Quellauflösung mit Virtual.Lab

Für die Untersuchung der Quadrupolquellen wurde der Freistrah einer Rechteckdüse modelliert. Die Berechnung wurde mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Der Modellaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Austritt der Düse ist mit dem Oval auf der linken Seite dargestellt. Hinter dieser Düse ist der Bereich der akustischen Quellen mit einem Zylinder skizziert. Der volumendiskretisierte Bereich wird mit einer nicht reflektierenden und einer schallharten Berandung abgeschlossen. Die zuletzt genannte Randbedingung erzeugt eine Symmetrieebene.

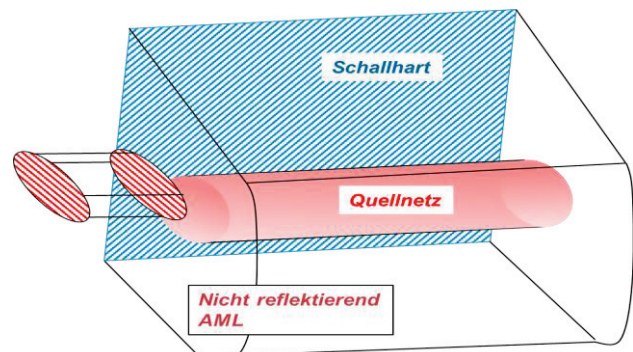


Abbildung 2: Volumendiskretisierter Freistrah mit einer nicht-reflektierenden und einer schallharten Randbedingung.

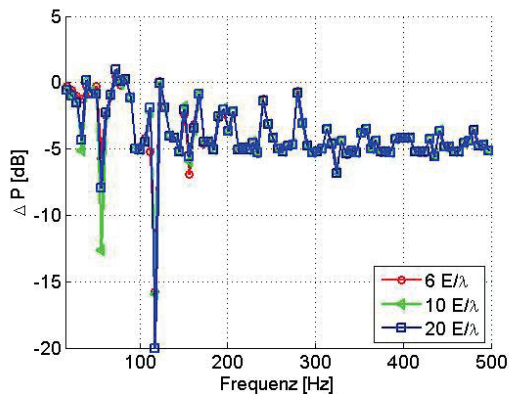
Das Programm Virtual.Lab sieht ein Mapping der transienten Strömungsgrößen auf ein Quellnetz vor, auf dem die Quadrupol-

polquellen berechnet werden. Hier werden die zeitlichen Geschwindigkeiten einerseits in den Frequenzbereich überführt, andererseits werden die räumlichen Gradienten entsprechend Gleichung (1) berechnet. Nachfolgend wird der Einfluss des Quellnetzes untersucht.

Zunächst wurden die Lighthill-Tensoren im gesamten Quellbereich ermittelt. Die Größe der Volumina, in denen die Gradienten der Quellen ermittelt wurden, wurde zunächst mit 6 Elementen je Wellenlänge ( $6E/\lambda$ ) beschrieben. Im Vergleich dazu wurden lediglich die Quellen des letzten Drittels des untersuchten Freistrahls modelliert. Für diesen kleineren Quellbereich wurde das Quellnetz in drei Schritten auf bis zu  $20E/\lambda$  verfeinert. Für einen Vergleich wurde die Schallleistung über der äußeren Berandung des FEM-Gebietes auf integriert. Die Unterschiede der Schallleistungen sind in Abbildung 3 über der Frequenz aufgetragen, wobei die Schallleistung mit

$$\Delta P = P_{aus}(dB) - P_{ges}(dB) \quad (4)$$

berechnet wurde.  $P_{aus}$  bezeichnet die Schallleistung des Ausschnittes,  $P_{ges}$  die Schallleistung des gesamten Modells.

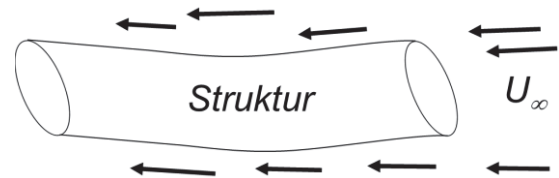


**Abbildung 3:** Differenz der Schallleistung des vollen Quellbereiches und eines Ausschnittes bei gleichzeitiger Verfeinerung des Quellnetzes.

Die Untersuchung zeigt, dass die Vernachlässigung der vorderen zwei Drittel der turbulenten Quellen einen Verlust von nahezu 5 dB verursachen. Dies ist unabhängig der verwendeten Feinheit des Quellnetzes. Zudem bestehen große Unterschiede bei einzelnen Frequenzen im unteren Frequenzbereich. Dies deutet darauf hin, dass die entsprechenden Quellen hier vorwiegend im vorderen Bereich liegen. Es lässt sich jedoch zusammenfassen, dass es hinsichtlich einer effizienten Berechnung wichtiger ist, alle Quellen zu erfassen als einzelne Quellbereiche möglichst fein aufzulösen.

### Grenzschichtanregung einer Struktur

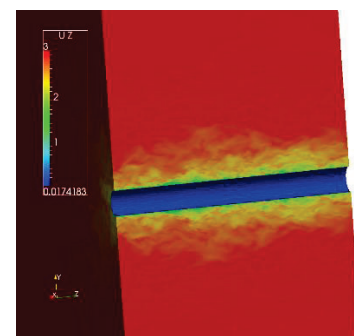
Neben der untersuchten Quellmodellierung wurde die Grenzschichtanregung einer Struktur untersucht. Als Testmodell dient ein längs angeströmter Zylinder, siehe Abbildung 4, mit dem ein Tiefseehydrophon modelliert werden kann, dessen Anwendung durch den Störschall limitiert wird, der durch die Grenzschichtanregung verursacht wird [7].



**Abbildung 4:** Längsumströmter Zylinder.

Die verwendete räumlich gefilterte Strömung wurde mit OpenFOAM, das um ein Wall-Adaptive Local Eddy-Viscosity- (WALE-) Modell erweitert wurde, berechnet. Dieses Turbulenzmodell verbessert die Skalierung der turbulenten Strömung in Wandnähe [6]. Zudem wurde eine parallelisierte Kopplung mit einem Strukturlöser umgesetzt, so dass die Rückkopplung der Strukturbewegung auf das Fluid berücksichtigt werden kann.

Für die hier dargestellte Untersuchung wurde zunächst eine ausgebildete Grenzschicht berechnet. Dies erfolgte zunächst in einem Viertelschnitt mit einem Modell der dimensionslosen Länge von Eins. Bei diesem Modell ist eine Phase am umströmten Zylinder vorhanden, die einen laminar/turbulenten Umschlag der Strömung erzeugt. Sobald die turbulente Strömung den Auslass der Strömung erreichte, wurde das Strömungsfeld auf ein weiteres Modell der Länge  $\frac{1}{4}$  übertragen. Dieses neue Modell, das wiederum einen Viertelschnitt darstellte, wies eine zyklische Randbedingung zwischen Einlass und Auslass auf. Mit diesem Modell wurde die Strömung so lange berechnet, bis sich eine ausgeprägte Grenzschicht einer benötigten Stärke ausgebildet hatte. In dem nachfolgenden Schritt wurden die berechneten Strömungsgrößen auf ein drittes Strömungsnetz übertragen. Dieses dritte Netz bildete ein volles Modell dar, wobei der Ein- und der Auslass wiederum mit einer zyklischen Randbedingung verbunden wurde. Um in allen Quadranten dieses vollen Netzes eine ausgeprägte Grenzschicht vorzuschreiben, wurde das Ursprungsnetz jeweils um  $45^\circ$  gedreht. Ein Bild der axialen Geschwindigkeit bei einer entwickelten Grenzschicht ist nachfolgend in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5:** Axiale Geschwindigkeit bei einer ausgeprägten Grenzschicht.

Das Strömungsnetz wurde mit zwei verschiedenen Strömungsnetzen berechnet. Diese variieren in axialen Richtung zwischen  $14.5 \leq z^+ \leq 42$  und in Umfangsrichtung zwischen  $6 \leq u^+ \leq 24$ . Das Strömungsnetz mit der gröberen Diskretisierung weist ca. 10 Mio Zellen auf, das Berechnungsnetz mit der feineren Vernetzung weist ca. 133 Mio Zellen auf.

Für die Auswertung der Grenzschichtanregung wurden die Drücke an verschiedenen Positionen des umströmten Zylinders ausgewertet. In Abbildung 6 ist das unter Verwendung der quadrierten Drücke ermittelte Schallleistungsspektrum über der Frequenz aufgetragen. Die rote Kurve wurde auf der Basis des groben Netzes erstellt, die grüne und die blaue Kurve auf der Basis des feinen Netzes. Wie dargestellt, steigt durch die feinere Diskretisierung sowohl die Schallleistung als auch der Frequenzinhalt der Struktur anregung.

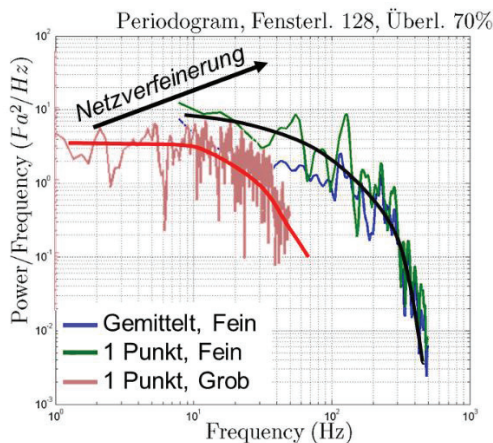


Abbildung 6: Einfluss der Netzverfeinerung auf die Anregungsspektren der umströmten Struktur.

Ein Phänomen der Grenzschicht ist, dass sich die turbulenten Strukturen in Wandnähe mit einer Konvektionsgeschwindigkeit  $U_0$  ausbreiten, die zwischen 60% und 80% der Geschwindigkeit im Fernfeld beträgt [2]. Die Konvektionsgeschwindigkeit kann mittels einer zeitlichen und räumlichen Fouriertransformation der Drücke an der Zylinderwand ausgewertet werden. Ein Wellenzahl-Frequenz-Spektrum der feinen Berechnung ist in Abbildung 7 abgebildet. In dieser Grafik ist die Konvektionsgeschwindigkeit von 70% aufgetragen, was sehr gut mit der Theorie übereinstimmt.

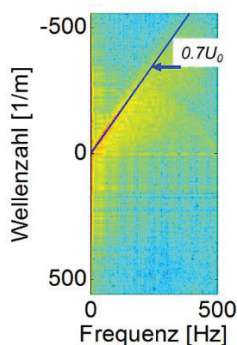


Abbildung 7: Wellenzahl-Frequenz-Spektrum der berechneten Strömung unter Verwendung des feinen Berechnungsnetzes.

Es kann somit zusammengefasst werden, dass mit dem getroffenen Simulationsansatz eine sehr gute Übereinstimmung mit anderen veröffentlichten Simulationen und Messungen getroffen wurde. Zudem ist eine feine Vernetzung der Strömung erforderlich, da andernfalls eine zu geringere Anregung ermittelt wird.

Die beschriebene Strömung wurde im nächsten Schritt mit einer Struktur gekoppelt, wofür ein weiterentwickelter

OpenFOAM-Solver verwendet wurde. Dieser Solver ist parallelisiert und beidseitig mit einem Finite-Elemente-(FEM-) Strukturlöser gekoppelt. Die zeitliche Diskretisierung der FEM erfolgt mit dem Newmark-Zeitintegrationsverfahren [1], da dieses eine stabile Lösung verspricht. Von der Strömung werden die Kräfte in jedem Iterationsschritt auf die Struktur übertragen, von der Struktur werden die Verschiebung und die Geschwindigkeit der Oberfläche auf das Strömungsgitter übertragen. Mit der beschriebenen Anwendung wurde eine erste Berechnung der umströmten Struktur berechnet. Das Spektrum des Schalldruckes ist in Abbildung 8 dargestellt. Die unterschiedlichen Z-Koordinaten bezeichnen verschiedene Auswertepunkte in axialer Richtung. Basierend auf einer Anregung, die sehr breitbandig ist, stellt sich eine Schwingung der Struktur ein, die deutliche harmonische Komponenten aufweist. Der Unterschied des Schalldruckes in den dominanten Komponenten zum breitbandigen Rauschen beträgt ca. 0,6 Pa.

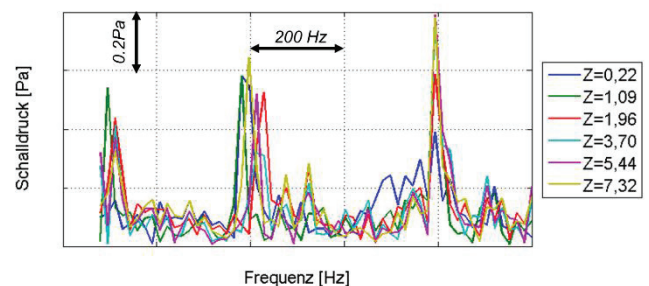


Abbildung 8: Spektrum des ermittelten Schalldruckes in der Struktur an verschiedenen Messpunkten.

### Zusammenfassung

In der numerischen Strömungsakustik werden die akustischen Felder durch Quellen erzeugt, die von der berechneten Strömung abgeleitet werden. Die Ergebnisse der akustischen Simulation sind dabei abhängig von der Qualität der Strömungsberechnung und vom vollständigen Erfassen der relevanten akustischen Quellen. Dies wurde an der Simulation des akustischen Feldes eines Freistrahles qualitativ untersucht. Zudem wurde am Beispiel einer Grenzschichtanregung gezeigt, welchen Einfluss die Strömungsberechnung auf den Frequenzbereich und die Stärke einer Struktur anregung hat.

### Literatur

- [1] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methode, Springer Verlag, 2001
- [2] Cipolla, M. K. und Keith, W. L.: Ocean Engineering 35 (2008)
- [3] Colonius, T.: Application of Lighthill's Equation to a Mach 1.92 Turbulent Jet, AIAA Journal 38, V. 2 (2000)
- [4] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich, Springer Verlag, 2010
- [5] LMS, Virtual.Lab Online Help, 2012
- [6] Nicoud, F. und Ducros, F.: Subgrid-scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor, Flow Turbulence, Combustion, 1999
- [7] Tutty, O. R.: Flow along a long thin cylinder, J. Fluid Mech., vol 602 (2008)