

## Computational Aeroacoustics in Time and Frequency Domain

Hermann Landes<sup>1</sup>, Martin Meiler<sup>1</sup>, Manfred Kaltenbacher<sup>2</sup>, Simon Triebenbacher<sup>2</sup>, Stefan Becker<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SIMetris GmbH, 91058 Erlangen-Tennenlohe, E-Mail: hermann.landes@simetris.de

<sup>2</sup> Alps-Adriatic University, Klagenfurt, Austria, <sup>3</sup> University Erlangen-Nuremberg, Erlangen

### Einleitung

Zur Berechnung strömungsinduzierter Geräusche wird von uns ein hybrider Ansatz verwendet, welcher auf der getrennten Simulation von Strömung und Akustik auf unterschiedlichen Gittern beruht (vgl. Abb. 1). Im Strömungsgebiet  $\Omega_F$  wird zuerst das instationäre Strömungsproblem betrachtet und anschließend erfolgt die Auswertung der akustischen Quellterme (Lighthill Tensor). Diese werden dann auf das gröbere Akustikgitter ( $\Omega_A$  und  $\Omega_2$ ) transferiert und auf diesem wird dann die inhomogene Wellengleichung gelöst. Dabei sind typischerweise noch Freifeld-Abstrahlbedingungen in der Akustik zu beachten. Im Folgenden werden zuerst die wesentlichen Aspekte des Gesamtverfahrens kurz vorgestellt. Als einfache Anwendung werden die Ergebnisse umströmter Zylinder mit unterschiedlichen Querschnitten vorgestellt, welche die Anwendbarkeit sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich belegen.

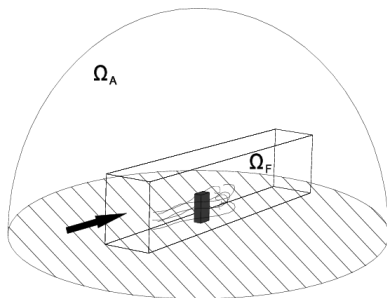


Abbildung 1: Prinzipmodell Strömungsakustik

### Hintergrund

#### Akustische Quellterme

Die akustischen Quellterme werden zuerst auf dem feinen Strömungsgitter berechnet, dort ggf. weiter bearbeitet und anschließend auf das gröbere Akustikgitter transferiert. Bei diesem Transfer ist insbesondere darauf zu achten, dass durch den Gitterübergang keine energetischen Verluste hervorgerufen werden. Dies wird in unserem Ansatz durch Verwendung einer konservativen Interpolation sichergestellt.

#### Akustische Abstrahlung – Perfectly Matched Layer

In der Akustik sind oft Freifeld Abstrahlbedingungen zu berücksichtigen, die durch geeignete Maßnahmen an den freien Rändern des akustischen Bereiches erzielt werden können. Hierfür wurden von uns spezielle Dämpfungsformulierungen entwickelt, welche in Kombination mit einer idealen Impedanzanpassung einen reflektionsfreien Abschluss des Akustikgebietes ermöglichen (perfectly matched layer, vgl. Abb. 2). Im Frequenzbereich führt dies im PML Bereich ( $\Omega_2$ ) zu einer modifizierten Helmholtzgleichung, die wie folgt geschrieben werden kann:

$$\eta_x \eta_y \eta_z \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\eta_x} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \eta_x \eta_z \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\eta_y} \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \eta_x \eta_y \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\eta_z} \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \eta_x \eta_y \eta_z k^2 \hat{p} = 0.$$

Hierin bezeichnen  $\eta_x$ ,  $\eta_y$ ,  $\eta_z$  die orts- und frequenzabhängigen Dämpfungscharakteristiken für die einzelnen Koordinatenrichtungen. Durch Einführung zusätzlicher Variablen im PML-Bereich kann diese Gleichung bei Vermeidung der Faltungsgleichung in den Zeitbereich transformiert werden.

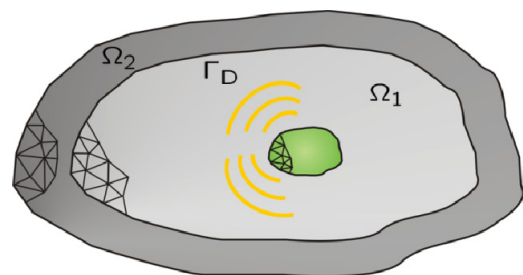


Abbildung 2: Perfectly Matched Layer

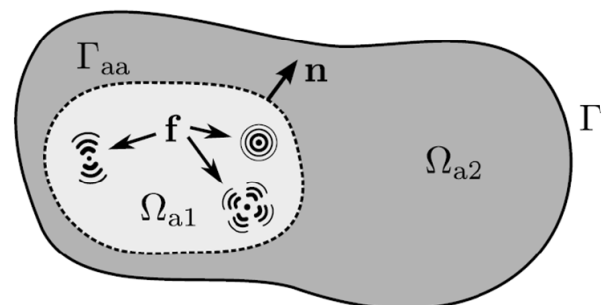


Abbildung 3: Situation für nicht konforme Gitter

#### Mortar Finite Elemente für Akustik

Für eine möglichst effiziente Simulation der Akustik ist als weiteres Feature die Verwendung nicht konformer Gitter angebracht (sog. Mortar Finite Elemente). Die prinzipielle Situation ist in Abbildung 3 dargestellt. In beiden Gebieten  $\Omega_{a1}$  und  $\Omega_{a2}$  wird die akustische Wellengleichung gelöst, wobei hier sämtliche akustischen Quellterme in  $\Omega_{a1}$  enthalten sind. Durch Verwendung eines Lagrange Parameters werden die beiden Wellengleichungen in  $\Omega_{a1}$  und  $\Omega_{a2}$  entlang des Kopplungsrandes  $\Gamma_{aa}$  gekoppelt und es ergibt sich das folgende, gekoppelte Differentialgleichungssystem.

$$\int_{\Omega_{ai}} \frac{1}{c^2} w_i \dot{p}_i d\Omega + \int_{\Omega_{ai}} \nabla w_i \cdot \nabla p_i d\Omega + \int_{\Gamma_{aa}} (w_1 - w_2) \lambda d\Gamma = \int_{\Omega_{a1}} (\nabla \cdot L_{ij}) \cdot \nabla w_i d\Omega$$

$$\int_{\Gamma_{aa}} (p_1 - p_2) \mu d\Gamma = 0$$

Dieses System führt bei geeigneter Wahl der Ansatzfunktionen auf ein symmetrisches algebraisches Gleichungssystem.

Der gesamte Simulationsablauf kann in der folgenden Übersichtsgrafik zusammengefasst werden.

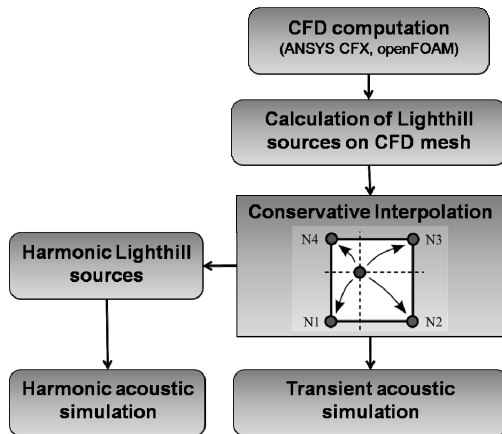


Abbildung 4: Übersicht über Simulationsablauf

### Anwendung

Als Anwendung des Simulationsansatzes wurde die Umströmung von, auf einer Platte montierten, starren Zylindern mit unterschiedlichen Querschnittsformen betrachtet. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

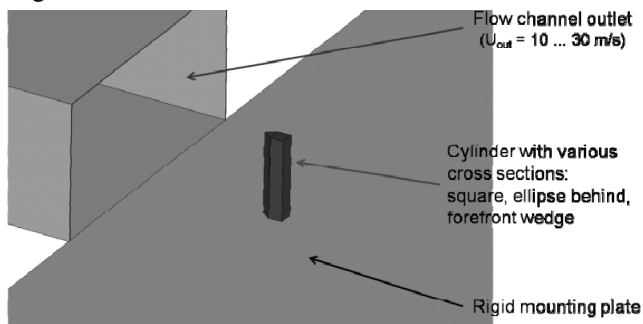


Abbildung 5: Untersuchung Zylinder in Strömung

Der Vergleich eines Zylinders mit quadratischem Querschnitt mit einem mit zusätzlicher Ellipse im Nachlauf ergab dabei, dass sich die akustischen Eigenschaften durch die aus strömungsmechanischen Gesichtspunkten günstige Ellipse deutlich verschlechtern können. Diese Ergebnisse wurden durch entsprechende Messungen bestätigt; ein Vergleich von Messungen und Simulationsergebnissen findet sich in den Tabellen 1 und 2.

Frequenz	Quadratisch	Mit Ellipse
Simulation	55 Hz	39 Hz
Messung	53 Hz	36 Hz

Tabelle 1: Haupt-Frequenzen für Zylinder mit unterschiedlichen Querschnitten

SPL in 1 m	Quadratisch	Mit Ellipse
Simulation	47 dB	61 dB
Messung	44 dB	60 dB

Tabelle 2: SPL für Zylinder mit unterschiedlichen Querschnitten

Abschließend wurde ein Zylinder mit quadratischem Querschnitt und einem Keil im Vorlauf des Zylinders betrachtet (vgl. Abb. 5). In Abbildung 6 ist ein

Schnappschuss des Schallfeldes nach ca. 300 Zeitschritten dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich, hat das Schallfeld bereits die Grenze zum PML Bereich erreicht (gerade Front des Schallfeldes). Offensichtlich kommt es beim Übergang des Schallfeldes vom akustischen Ausbreitungsbereich in die PML Schicht zu keinen erkennbaren Reflexionen.

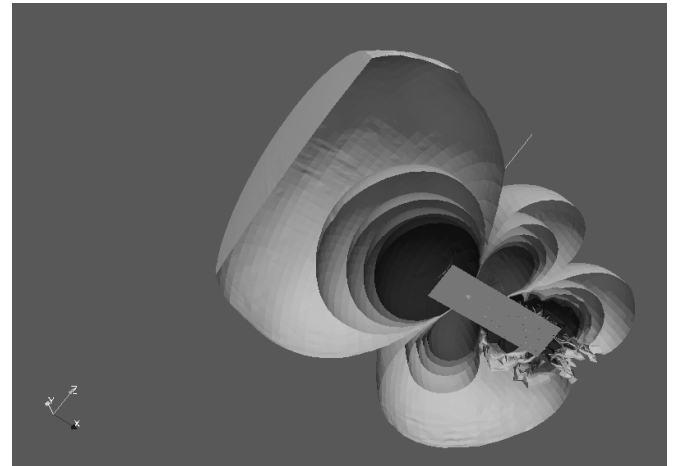


Abbildung 6: Schnappschuss des Schallfeldes bei Zylinder mit Keil im Vorlauf (Blick von unten)

In Abbildung 7 ist das Spektrum des Drucksignals in einer Entfernung von 20 bzw. 40 cm links vom Zylinder dargestellt. Klar ersichtlich ist die Hauptfrequenz des akustischen Drucks; die deutlichen Rippel im Spektrum sind auf Abbruchfehler in der Fourier-Transformation zurückzuführen.

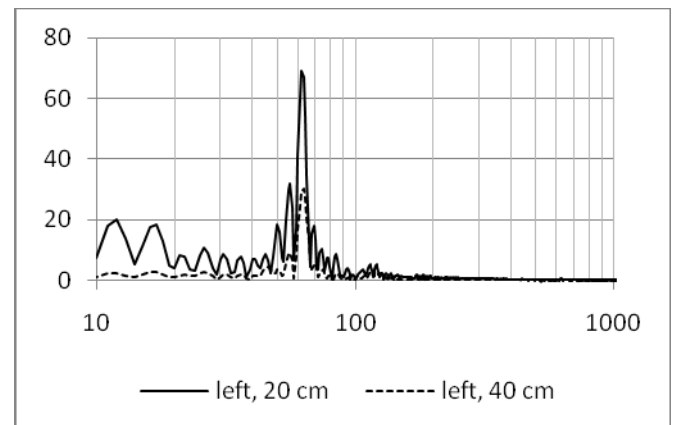


Abbildung 7: Spektrum des Schalldrucks in ausgewählten Punkten

### Zusammenfassung

Der vorgestellte hybride Simulationsansatz zur Berechnung strömungsinduzierter Geräusche konnte anhand umströmter Zylinder mittels Messungen verifiziert werden. Der Ansatz bietet die Möglichkeit zur Berechnung sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich; Schnittstellen stehen derzeit zu ANSYS CFX und openFoam zur Verfügung. Sämtliche Akustikberechnungen wurden in der Software NACS durchgeführt.