

Strömungsakustische Simulation der Umströmung einer Zylinder-Flügelprofil-Anordnung unter Berücksichtigung dreidimensionaler Effekte

Joscha Piepiorka, Thorben Schröder und Otto von Estorff

TU Hamburg-Harburg, Institut für Modellierung und Berechnung, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: mub@tuhh.de

Einleitung

Strömungslärm ausgehend von Turbomaschinen spielt eine immer wichtigere Rolle bei der Auslegung von neuen Produkten. Um eine erste Vorhersage des entstehenden Schallfeldes schon in der Entwicklungsphase treffen zu können, sind oftmals sehr umfangreiche Simulationen notwendig. In diesem Beitrag wird daher ein vereinfachtes, für Turbomaschinen relevantes Benchmark-Modell einer experimentellen Zylinder-Flügelprofil-Umströmung aus [1] verwendet. Anhand von strömungsakustischen Simulationen werden die Möglichkeiten und Probleme bei der Berechnung des Schallfeldes aufgezeigt. Vor allem die Berücksichtigung der dreidimensionalen Effekte in der Strömung und Akustik stellen hierbei eine große Herausforderung dar. Als Grundlage werden dazu numerische Strömungsergebnisse herangezogen und hinsichtlich ihrer Eignung als hydrodynamisches Quellfeld bewertet. Die darauf aufbauende Akustik wird mittels eines hybriden Verfahrens in Form eines Störungsansatzes, dem „Expansion about Incompressible Flow“ (EIF) – Ansatz [2], berechnet. Im Mittelpunkt der Analysen werden die unumgängliche dreidimensionale Korrektur sowie der damit einhergehende Einfluss auf die akustischen Ergebnisse hinsichtlich der angestrebten Validierung diskutiert.

Zylinder-Flügelprofil-Umströmung

Das Experiment [1] in Form eines querangeströmten Kreiszyklinders mit einem nachgelagerten NACA-0012 Tragflügelprofil zielt auf die primären Entstehungsmechanismen von Strömungslärm in Turbomaschinen ab. In Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung der beiden starren Körper im Windkanal aufgezeigt.

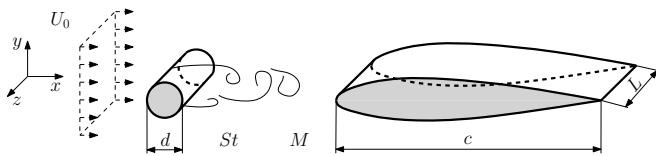


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Zylinder-Flügelprofil-Umströmung nach [1].

Der Zylinder mit dem Durchmesser von $d = 0,01$ m wird mit einem uniformen Geschwindigkeitsfeld mit $U_0 = 72$ m/s quer von einem Luftstrom angeströmt. Aufgrund der hohen Reynoldszahl von $Re = 48.000$ kommt es zu Instabilitäten der Randschicht am Zylinder, was zur Entstehung einer von Kármán'schen Wirbelstraße und turbulenten Interaktionen führt. Der Ablösevorgang im Nachlauf des Zylinders wird in seiner zeitlichen Periodi-

zität durch die Strouhal-Zahl von $St \approx 0,19$ charakterisiert und die Wirbel treffen auf die Vorderkante des Tragflügels mit der Profillänge von $c = 0,1$ m. Mit einer Mach-Zahl von $M = 0,21$ kann die Strömung vereinfacht als inkompressibel angenommen werden. Hinsichtlich der induzierten Akustik besteht ein nahezu proportionaler Zusammenhang zwischen dem effektiven Schwankungsanteil des Auftriebsbeiwertes $C_{L,rms}$ und dem Schalldruck im Fernfeld [3]. Neben spektralen Charakteristiken lassen sich hiermit ebenfalls erste Abschätzungen bezüglich der zu erwartenden Amplituden ableiten.

Die Hauptproblematik besteht in der Spannweitenlänge von $L = 0,3$ m, die deutlich von den anderen Dimensionen abweicht. Diese Strömungssituation in vollem Umfang mit den Mitteln der numerischen Strömungsmechanik (CFD) zu berechnen würde, aufgrund der notwendigen Wandauflösung, zu utopischen Netzdimensionen führen und steht somit außer Frage. Daher kann das entstehende Schallfeld nur anhand einer vereinfachten Simulation sowie anschließender Anpassung an das Experiment vorhergesagt werden.

Modellierung der Strömungsakustik

Für die Berechnung des Strömungsschalls wird ein hybrides Verfahren verwendet, so dass die Akustik in einer losgelösten Simulation auf bereits bestehenden numerischen Strömungsergebnissen aufbaut.

EIF-Ansatz

Grundlage des hier in der überarbeiteten Variante verwendeten EIF-Ansatzes nach [2] ist die Auftrennung der Zustandsgrößen in den Navier-Stokes-Gleichungen. Dazu wird der hydrodynamische Anteil mit der Geschwindigkeit U , der konstanten Dichte ρ_0 und dem Druck P als inkompressibles und viskoses Fluid angenommen. Die darauf aufbauende Akustik wird als kompressible Störung überlagert und durch die entsprechenden Anteile mit $(\cdot)^a$ deklariert, sodass für die drei Zustandsgrößen folgt:

$$p = P + p^a, \quad \rho = \rho_0 + \rho^a, \quad u_i = U_i + u_i^a. \quad (1)$$

Unter der Annahme von deutlich kleineren Schwankungen in der Akustik als in der zugrunde liegenden Strömung lässt sich mittels der Zusammenfassung

$$f_i = \rho_0 u_i^a + \rho^a U_i \quad (2)$$

schließlich das Gleichungssystem für die Berechnung der akustischen Variablen nach [2] zu

$$\frac{\partial \rho^a}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [f_i (U_j + u_j^a) + \rho_0 U_i u_j^a + p^a \delta_{ij}] = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial p^a}{\partial t} - c_0^2 \frac{\partial \rho^a}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial t}, \quad (5)$$

bestimmen, wobei c_0 die Schallgeschwindigkeit repräsentiert. Als primäre Anregung der Akustik ist die zeitliche Ableitung des Strömungsdruckes ($\partial P/\partial t$) in Gleichung (5) zu identifizieren.

Berücksichtigung der 3D-Effekte

Um bei der Berechnung von in Spannweitenrichtung langen Körpern trotz begrenzter numerischer Ressourcen eine Vorhersage des entstehenden Schallfeldes zu ermöglichen, müssen die dreidimensionalen Effekte in der Strömung und der Akustik berücksichtigt werden. Dazu wird lediglich ein Ausschnitt in Spannweitenrichtung simuliert und anschließend eine Anpassung der akustischen Ergebnisse an die realen Geometrien vorgenommen [4].

In Abbildung 2 ist die schematische Vorgehensweise anhand eines Zylinders zu erkennen. Das in rot dargestellte CFD-Gebiet beinhaltet ein Teilstück des realen (mit U_0) querangeströmten Zylinders und verwendet Symmetrierandbedingungen in die Spannweitenrichtung. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit zwischen der Simulation und dem Experiment gilt es dabei die Korrelation in z -Richtung sinnvoll abzubilden, sodass die Simulationstiefe L_S im besten Fall größer als die Korrelationslänge L_c ist. Die induzierte Akustik wird aufbauend ebenfalls anhand eines Ausschnittes der Tiefe L_S simuliert (siehe Abbildung 2, akustisches Berechnungsgebiet in blau). Hier wird eine nichtreflektierende Randbedingung in Form einer numerischen Dämpfungszone eingesetzt. Unter Verwendung des EIF-Ansatzes kann da-

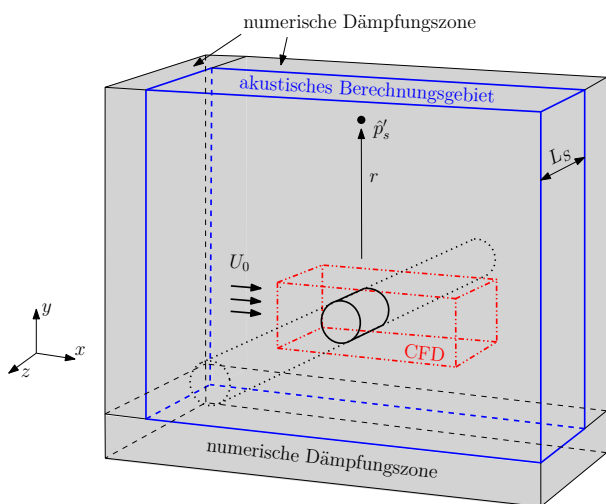


Abbildung 2: Schematische Darstellung des strömungsakustischen Berechnungsgebietes, unterteilt in CFD- (rot) und akustisches Berechnungsgebiet (blau).

mit zunächst der Schalldruck p'_s im Fernfeld (Abstand r) simuliert werden, der allerdings lediglich die induzierte Akustik eines kurzen Teilstückes in z -Richtung abbildet. Für die Vergleichbarkeit mit dem Experiment ist eine anschließende Anpassung der Ergebnisse an die reale

Länge L notwendig. Dazu wird eine frequenzweise Korrektur nach [4] verwendet, die von einer Unterteilung eines in Spannweitenrichtung langen Körpers in N diskrete Teilstücke der Simulationslänge L_S hinsichtlich der akustischen Abstrahlung ausgeht. Unter der Annahme einer gleichen zeitlich gemittelten akustischen Abstrahlungsenergie aller Teilkörper sowie unter Verwendung einer Gauss-Verteilung für die Kohärenz in Spannweitenrichtung, lässt sich eine Levelkorrektur im Fernfeld schreiben zu [4]

$$\text{SPL}_c = \begin{cases} 10 \log(N), & \frac{L'_c}{L_S} \leq \frac{1}{\sqrt{\pi}} \\ 10 \log\left(\frac{L'_c}{L_S}\right) + 10 \log(\sqrt{\pi}N), & \frac{1}{\sqrt{\pi}} < \frac{L'_c}{L_S} < \frac{N}{\sqrt{\pi}} \\ 20 \log(N), & \frac{L'_c}{L_S} \geq \frac{N}{\sqrt{\pi}} \end{cases} \quad (6)$$

Auf Basis des simulierten Schallfeldes kann anhand von Gleichung (6) die notwendige additive Levelkorrektur SPL_c zur Anpassung an die reale Spannweitenlänge L vorgenommen werden und ein quantitativer Vergleich mit Messwerten erfolgen. Diese für die Ingenieursanwendung vereinfachte stückweise definierte Funktion besitzt als Eingangsparameter neben dem Verhältnis $N = L/L_S$ vor allem die frequenzabhängige akustische Korrelationslänge L'_c , die aus der numerischen Simulation entnommen wird. Aufgrund der Vergleichbarkeit zum Experiment und der sehr großen Ähnlichkeit wird folgend die Korrelationslänge aus der CFD-Simulation (L_c) verwendet (siehe z.B. [4]).

Strömungsakustische Simulation

In Annäherung an das Experiment [1] wird eine transiente inkompressible CFD-Simulation durchgeführt, welche als Anregung für die induzierte Akustik dient. Die strömungsakustischen Simulationen werden mittels der Finite-Volumen-Methode in OpenFOAM® durchgeführt, wobei für die Strömung auf die implementierten Standard-Routinen zurückgegriffen und die Akustik mittels einer modifizierten Version des Strömungsakustik-Lösers aus [5] berechnet wird. Für eine hinreichende Aussagekraft wird eine Auswertungszeit von ca. 70 Periodendauern der voll ausgebildeten Wirbelstraße verwendet.

Numerische Strömungsergebnisse

Die Anforderungen an die CFD für eine sinnvolle Berechnung des Strömungsschalls liegen vor allem in der Darstellung von großen Wirbelstrukturen. Die Vorgehensweise der instationären Reynolds gemittelten Navier-Stokes (uRANS) Methode bildet einen praxistauglichen Kompromiss zwischen Effizienz und Genauigkeit, ist allerdings für die Berechnung von breitbandigem Lärm ungeeignet (siehe z.B. [6]). Daher wird folgend eine dreidimensionale Large Eddy Simulation (LES) unter Verwendung eines dynamischen Eingleichungsmodells zur Modellierung der Wirbelviskosität eingesetzt. In Anlehnung an Abbildung 1 wird die x - und y -Richtung hinreichend diskretisiert und für die z -Richtung eine Länge von $L_S = 6d$ sowie Symmetrierandbedingungen gewählt. Daraus ergibt sich ein numerisches Gitter mit

ca. 19,3 Mio. Zellen. In Abbildung 3 ist eine Momentaufnahme der betragsmäßigen Wirbelstärke ersichtlich, die die turbulente Interaktion der Wirbelablösungen von Zylinder und Tragflügelprofil zeigt. Als entscheidende Para-

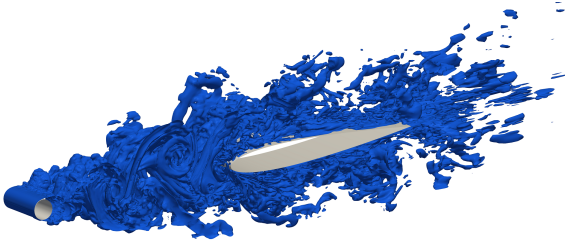


Abbildung 3: Momentaufnahme der betragsmäßigen Wirbelstärke der LE-Simulation.

meter für die Bewertung des akustischen Quellfeldes sind die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte des Zylinders in ihrem zeitlichen Mittel sowie Fluktuationsanteil in Tabelle 1 im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen aufgelistet. Dabei wird ersichtlich, dass die primäre Frequenz (f_{St}) sowie die Widerstandseffekte sehr gut approximiert werden. Der Schwankungsanteil des Auftriebsbeiwertes wird hingegen deutlich überschätzt, wodurch entsprechende Amplitudenüberhöhungen in der Akustik zu erwarten sind (siehe [3]).

Tabelle 1: Strömungsparameter aus der CFD-Simulation und der Literatur bezogen auf den Zylinderdurchmesser d .

| | Parameter | | |
|----------|--------------|-------------|------------------|
| | $C_{D,mean}$ | $C_{L,rms}$ | $St (f_{St}/Hz)$ |
| LES | 1,3 | 0,74 | 0,188 (1350) |
| Exp. [7] | 1,35 | 0,45 – 0,55 | 0,19 (1368) |

Simulation der Schallabstrahlung

Zur Berechnung des Strömungsschalls wird der EIF-Ansatz im akustischen Berechnungsgebiet verwendet und mittels expliziter Zeitintegration mit ca. 30 Mio. Zellen gelöst. Die örtliche Diskretisierung ist zur Abbildung von Frequenzen bis ca. 6500 Hz mit 10 Punkten pro Wellenlänge gewählt. Zur örtlichen Interpolation der CFD-Ergebnisse wird ein Gauss-Verfahren nach [8] verwendet und die zeitliche Interpolation erfolgt spektral optimiert [9]. Weiter umschließt eine numerische Dämpfungszone das Berechnungsgebiet mit einer Tiefe entsprechend zweier Wellenlängen der primären Frequenz. In Abbildung 4 ist der effektive Schalldruck der primären Frequenz quer zur Anströmung aufgetragen. Der qualitative Vergleich zum analytischen Abfall $1/r$ lässt erkennen, dass mit hinreichender Entfernung zum Quellgebiet die Schallausbreitung sinnvoll berechnet wird. Der Einfluss der Dämpfungszone ist ab einem Radius von $r = 2$ m ersichtlich. In Abbildung 5 ist eine Momentaufnahme des Schalldrucks dargestellt. Ausgehend von den beiden umströmten Profilen ist darin eine Schallausbreitung ins Fernfeld zu erkennen.

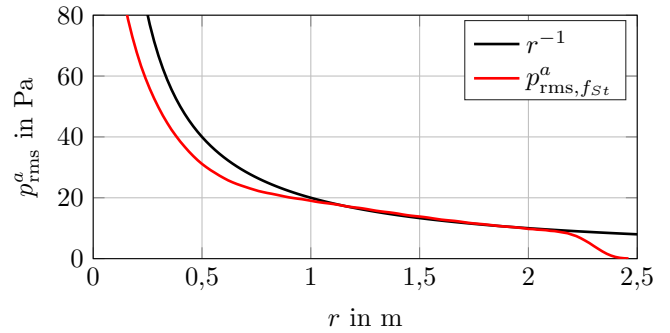


Abbildung 4: Vergleich des effekt. Schalldrucks der primären Frequenz $p_{rms,f_{St}}^a$ mit der analyt. Schallausbreitung in 3D.

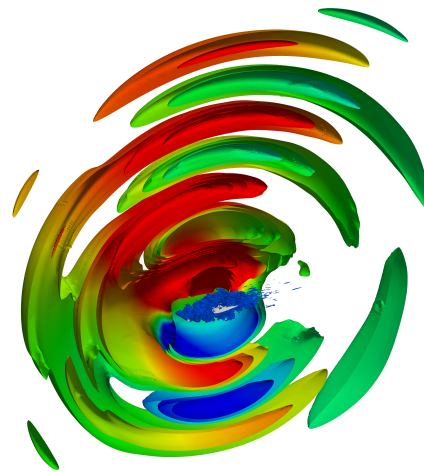


Abbildung 5: Momentaufnahme der simulierten Schallausbreitung anhand eines Ausschnittes in Spannweitenrichtung.

Ergebnisse

Die notwendige Korrektur der Simulationsergebnisse wird mittels Gleichung (6) vorgenommen, welche die frequenzabhängige Korrelationslänge aus den CFD-Ergebnissen verwendet. Dazu sind in Abbildung 6 drei unterschiedliche Auswertungsmöglichkeiten gegenübergestellt, wobei die erste einen (konstanten) zeitgemittelten Wert aus [7] verwendet und die anderen jeweils frequenzabhängige Auswertungen aus der CFD abbilden. Die Bestimmung von L_c über die Korrelation des Wanddrucks am Zylinder in z -Richtung erfolgt mit verschiedenen Ausgleichsfunktionen (Fit A und B). Dabei

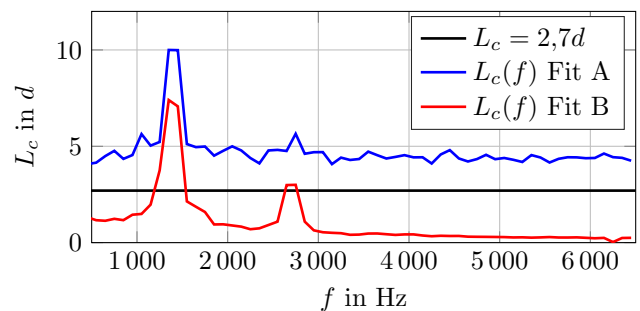


Abbildung 6: Unterschiede in der Auswertung der frequenzabhängigen Korrelationslänge $L_c(f)$ aus der CFD.

wird deutlich, dass die primäre Frequenz der Wirbelstraße einen globalen Einfluss in den Strömungsstrukturen erhält. Weiterhin sind klare qualitative und quantitative Unterschiede (speziell im Maximum) zwischen den Auswertungen zu erkennen. Die resultierende Levelkorrektur ist in Abbildung 7 verdeutlicht, wobei sofort der Grenzwert von 7 dB auffällt. Der abschließende Vergleich der

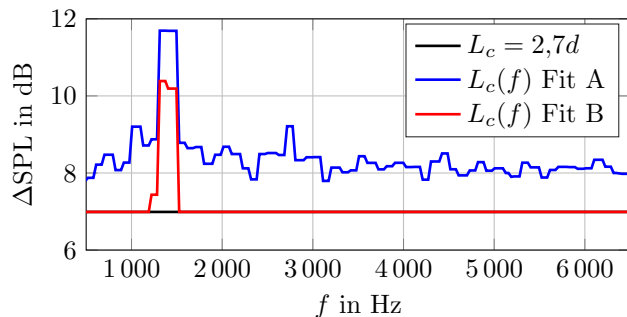


Abbildung 7: Unterschiede der frequenzabhängigen Levelkorrektur $\Delta\text{SPL}(f)$ anhand der Korrelationslängen aus der CFD.

spektralen Leistungsdichte im Fernfeld ($r = 1,85$ m) ist in Abbildung 8 zu erkennen. Dabei zeigen die Simulationsergebnisse eine gute qualitative Übereinstimmung mit dem Experiment, wohingegen der quantitative Vergleich wie erwartet eine Überschätzung beinhaltet. Praxisrelevant ist oftmals die Vorhersage der maximalen Amplituden, die sich an dieser Stelle aufgrund der Streuung zwischen den Korrekturvarianten als problematisch erweist. Zusätzlich können die Abweichungen zum Experiment nicht eindeutig den Simulationsergebnissen oder der Korrektur zugewiesen werden, da Messdaten lediglich für die realen Geometrien vorliegen. Zusammenfassend wird deutlich, dass im vorliegenden Fall allein aufgrund der notwendigen Korrektur ein Toleranzbereich von bis zu 4,7 dB/Hz einbezogen werden muss und damit eine quantitative Validierung problematisch erscheint.

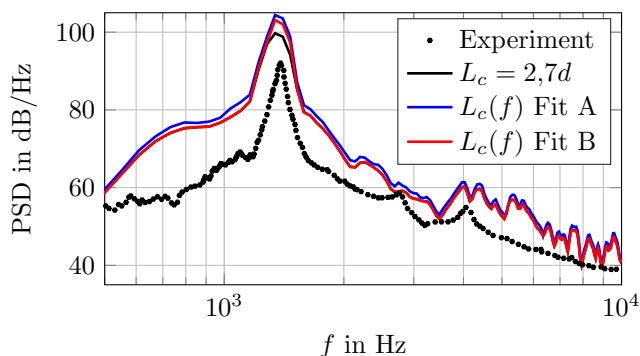


Abbildung 8: Vergleich zwischen korrigierten Simulationsergebnissen und experimentellen Messdaten [1] der spektralen Leistungsdichte (PSD) des Schalldrucks im Fernfeld.

Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel eines Benchmark-Modells [1] wurde Strömungsschall mit einem Störungsverfahren über ein vereinfachtes Schallfeld und anschließende Korrektur

berechnet. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass bei praxisrelevanten Problemstellungen eine Reihe von Faktoren die valide Berechnung erschwert. Neben dem notwendigen Detailgrad der CFD-Ergebnisse sind vor allem die dreidimensionalen Effekte und deren Berücksichtigung ausschlaggebend. Aufgrund der Notwendigkeit der nachträglichen Korrektur ist die quantitative Aussagekraft der finalen Ergebnisse mit einer nicht zu vernachlässigenden Toleranz zu interpretieren, was eine allgemeingültige Anwendung bzw. Validierung deutlich erschwert. Da bisher keine Veröffentlichungen zur umfassenden Lösung der strömungsakustischen Berechnung von in Spannweitenrichtung langen Geometrien bekannt sind, sollten zukünftige Untersuchungen in diesem Bereich vorgenommen werden.

Literatur

- [1] Jacob, M. C., Boudet, J., Casalino, D. und Michard, M.: A rod-airfoil experiment as a benchmark for broadband noise modeling. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* 19 (2005), 171–196
- [2] Shen, W. Z. und Sørensen, J. N.: Comment on the Aeroacoustic Formulation of Hardin and Pope. *AIAA Journal Readers' Forum* 37 (1999), 141–145
- [3] Fujita, H.: The characteristics of the Aeolian tone radiated from two-dimensional cylinders. *Fluid Dynamics Research* 42 (2010), 15002
- [4] Seo, J. H., Chang, K. W. und Moon, Y.: Aerodynamic Noise Prediction for Long-Span Bodies. 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference) (2006), 8–10
- [5] Schröder, T., Michels, T. und von Estorff, O.: Untersuchungen zum Einsatz eines OpenFOAM®-EIF-basierten Strömungsakustik-Lösers. *Proceedings of the DAGA, Nürnberg, Deutschland, 2015*
- [6] Piepiorka, J.: Strömungsakustische Simulation der Umströmung einer Zylinder-Flügelprofil-Anordnung unter Berücksichtigung dreidimensionaler Effekte. *Masterarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg 2016*
- [7] Szepessy, S. und Bearman, P. W.: Aspect Ratio and End Plate Effect on Vortex Shedding from a Circular Cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 234 (1992), 191–217
- [8] Schröder, T., Silkeit, P., und von Estorff, O.: Einfluss der Quellinterpolation auf hybride strömungsakustische Berechnungen in Finiten Volumen. *Proceedings of the DAGA, Aachen, Deutschland, 2016*
- [9] Lohmann, H.: Untersuchung und Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren zur zeitlichen Rekonstruktion strömungsakustischer Quellfelder. *Masterarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg 2016*