

Weiterentwicklung und Untersuchung eines Strömungsakustik-Lösers für rotierende Gitter in OpenFOAM[®]

Joscha Piepiorka, Thorben Schröder, Patrick Silkeit und Otto von Estorff

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

Motivation

Strömungslärm ausgehend von Turbomaschinen spielt eine immer wichtigere Rolle bei der Auslegung von neuen Produkten. Um eine Vorhersage des entstehenden Schallfeldes schon in der Entwicklungsphase treffen zu können, stehen in der numerischen Strömungsmechanik (CFD) sowie Strömungsakustik (CAA) eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Berücksichtigung von rotierenden Geometrien dar. In diesem Beitrag wird daher ein vorhandener Strömungsakustik-Löser für die Berechnung mit rotierenden Gittern erweitert. Anhand von CAA-Simulationen werden erste Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen der Gitterrotation und Interpolation zwischen stehendem und rotierendem Gitter auf die akustische Wellenausbreitung durchgeführt. Dazu werden CFD-Ergebnisse erzeugt, die anhand einer semianalytischen Lösung eine Bewertung der induzierten Akustik ermöglichen. Die Schallabstrahlung wird mittels der ‘‘Perturbued Convective Wave Equation‘‘ (PCWE) [1] in der Finite-Volumen-Umgebung OpenFOAM[®] berechnet. Im Mittelpunkt der Analysen werden zwei Szenarien beleuchtet, an denen eine abschließende Verifizierung des entwickelten Verfahrens durchgeführt wird.

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. Im Einzelnen werden dazu bei den Störungsverfahren der Druck p , die Geschwindigkeit \mathbf{u} und die Dichte ρ jeweils in einen inkompressiblen Strömungsanteil $(\cdot)^{\text{ic}}$ sowie einen kompressiblen akustischen Anteil $(\cdot)^{\text{a}}$ mit

$$p = p^{\text{ic}} + p^{\text{a}}, \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}^{\text{ic}} + \mathbf{u}^{\text{a}}, \quad \rho = \rho_0 + \rho^{\text{a}}, \quad (1)$$

aufgetrennt. Unter der Annahme von kleinen Mach-Zahlen M lassen sich beispielsweise die ‘‘Acoustic Perturbation Equations‘‘ in der zweiten Variante (APE-2) nach [2] herleiten. Da in diesem Beitrag ein möglichst kompaktes Gleichungssystem für erste Analysen vorteilhaft ist, wird die aus den APE-2 hergeleitete PCWE nach [1] verwendet.

PCWE

Die gestörte konvektive Wellengleichung für das akustische Potenzial ψ^{a} lautet [1]

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{D^2 \psi^{\text{a}}}{Dt^2} - \Delta \psi^{\text{a}} = -\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{Dp^{\text{ic}}}{Dt}, \quad (2)$$

wobei c_0 die Schallgeschwindigkeit repräsentiert. Das Potenzial ist unter der Annahme eines rotationsfreien akustischen Feldes über die Schnelle mit $\mathbf{u}^{\text{a}} = -\nabla \psi^{\text{a}}$ definiert. Als primäre Anregung der Akustik ist die substantielle Zeitableitung des Strömungsdruckes (Dp^{ic}/Dt) in Gleichung (2) zu identifizieren. Die Konvektion durch eine zeitlich gemittelte Hintergrundströmung ist anhand der substantiellen Zeitableitung

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^{\text{ic}} \cdot \nabla \quad (3)$$

berücksichtigt. Um eine direkte Lösung für den Schalldruck einzubinden kann die inhomogene Wellengleichung (2) in ein System erster Ordnung mit

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{Dp^{\text{a}}}{Dt} - \Delta \psi^{\text{a}} = -\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{Dp^{\text{ic}}}{Dt}, \quad (4)$$

$$\frac{D\psi^{\text{a}}}{Dt} = \frac{1}{\rho_0} p^{\text{a}}, \quad (5)$$

umgeformt werden.

Berücksichtigung der Gitterrotation

Zur Berücksichtigung eines rotierenden Gitters ist das Referenzsystem entscheidend. Wie bereits in [3] gezeigt und angewendet kann die PCWE über eine Anpassung der substantiellen Zeitableitung aus Gleichung (3) mit

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^{\text{ic}} \cdot \nabla \rightarrow \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}}^{\text{ic}} - \mathbf{u}_{\text{rot}}) \cdot \nabla \quad (6)$$

für rotierende Gitter erweitert werden. Darin beschreibt \mathbf{u}_{rot} die Rotationsgeschwindigkeit des Gitters. Unter Verwendung der Finite-Volumen-Methode (FVM) wird das Volumenintegral des entscheidenden Konvektionsterms nach [4] anhand der Summe der Flüsse ϕ_f über die Zellflächen \mathbf{S}_f mit

$$\int_V \nabla \cdot (\mathbf{u}\phi) dV = \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\mathbf{u}_f \phi_f) \rightarrow \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\mathbf{u}_f \phi_f)_{\text{kor}} \quad (7)$$

approximiert. Um eine von der Gitterrotation unbeeinflusste Berechnung der Wellenausbreitung zu erhalten, wird eine Korrektur der Oberflächengeschwindigkeiten und des Flusses nach Gleichung (7) durchgeführt.

Querangeströmter Kreiszyylinder

Als Anwendungsfall wird ein querangeströmter Kreiszyylinder herangezogen, der vereinfacht in einer zweidimensionalen Schnittebene modelliert wird. Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, wird der Zylinder mit dem

Durchmesser $d = 0,002$ m von einem uniformen Geschwindigkeitsfeld mit $U = 1,5$ m/s angeströmt. Die Luftströmung kann aufgrund der entstehenden Mach-Zahl von $M = 0,0044$ als inkompressibel mit der konstanten Dichte $\rho = 1,2$ kg/m³ angenommen werden. Weiterhin ist die Umströmung des Zylinders mit einer Reynoldszahl von $Re = 200$ laminar. Im Nachlauf

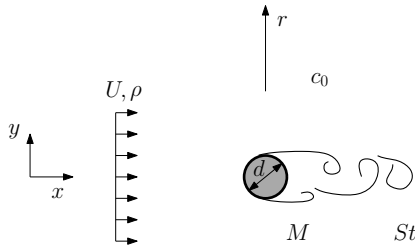


Abbildung 1: Schematische Darstellung des querangeströmten Kreiszylinders.

des Zylinders bildet sich eine von Kármán'sche Wirbelstraße aus, welche eine periodische Ablösung mit einer Strouhal-Zahl von $St = 0,189$ beschreibt und ausschlaggebend für die Schallentstehung ist. Die Umströmung des Zylinders wirkt dabei als strömungakustische Dipolquelle. Die Hauptausbreitungsrichtung des Schalls mit $c_0 = 340$ m/s ist in Abbildung 1 quer zur Anströmung mit r verdeutlicht. Als Besonderheit lässt sich eine semi-analytische Lösung der entstehenden Akustik auf Basis der verwendeten Strömungsparameter der Form $p_{rms}^a = f(C_{L,rms}, \rho, U, St, M, c_0, d, r)$ entwickeln [5]. Der zeitgemittelte Effektivwert des Schalldrucks ist proportional zu

$$p_{rms}^a \propto \frac{C_{L,rms} St}{\sqrt{r}}, \quad (8)$$

so dass eine Bewertung der berechneten induzierten Akustik mittels der numerischen Strömungsergebnisse vorgenommen werden kann.

Strömungakustische Simulation

Die strömungakustischen Simulationen werden mittels der FVM in OpenFOAM[®] durchgeführt, wobei für die Strömung auf die implementierten Standard-Routinen zurückgegriffen wird. Für die Berechnung der aufbauenden Akustik wird die Theorie der PCWE in der Formulierung gemäß den Gleichungen (4) - (7) verwendet. Zur Auswertung des monofrequenten Anwendungsfalls werden ca. 45 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. Dazu wird der querangeströmte Kreiszyylinder aus Abbildung 1 in einem zweidimensionalen Schnitt modelliert und eine laminare, inkompressible Strömungssimulation durchgeführt. In Anlehnung an die Geometrie des Zylinders wird ein hinreichend großes und fein aufgelöstes Rechengitter verwendet. Wie in Abbildung 2 (links) deutlich wird, bildet

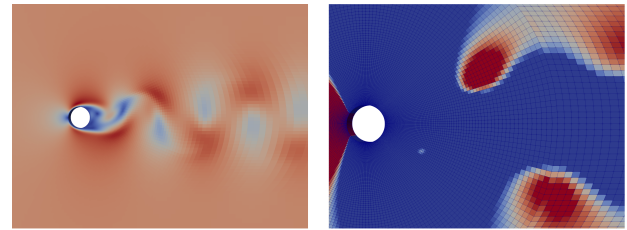


Abbildung 2: Momentaufnahme des betragsmäßigen Geschwindigkeitsfeldes (links) und des Drucks in Zylindernähe (rechts) unter Verwendung eines stehenden Rechengitters.

sich die erwartete Wirbelstraße im Nachlauf des Zylinders aus. Als entscheidender Parameter für die Bewertung des akustischen Quellfeldes ist der Auftriebsbeiwert C_L des Zylinders zu nennen. Dabei spielt zum einen die Frequenz und einhergehende Strouhal-Zahl der Wirbelablösung eine Rolle. Zum anderen ist der zeitliche Effektivwert entscheidend für die Quellstärke des akustischen Dipols. Anhand der Zusammenstellung in [6] können die Ergebnisse mit $C_{L,rms} = 0,465$ und einer Ablösefrequenz von $f_{St} \approx 146$ Hz als sinnvoll bewertet werden.

Zur Generierung eines möglichst realitätsnahen Anwendungsfalls der strömungakustischen Prozesskette, wird aus den Ergebnissen des stehenden Gitters ein zweites Quellfeld erzeugt. Dabei wird der den Zylinder umgebene kreisringförmige Gitterabschnitt, wie in Abbildung 2 rechts zu erkennen, mit einer Winkelgeschwindigkeit $\omega = 50$ rad/s gedreht. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der induzierten Akustik zu gewährleisten werden die Ergebnisse mittels eines Gauss-Quadratur-Verfahrens hoher Ordnung vom stehenden Gitter interpoliert und nicht neu numerisch berechnet. Weitere Untersuchungen belegen, dass die erzeugten Quellfelder für die akustischen Analysen ausreichend vergleichbar sind.

Simulation der Schallabstrahlung

Der Strömungsschall wird zunächst als Referenz mittels der PCWE auf einem stehenden Gitter simuliert. Dazu wird ein kreisförmiges Rechengitter verwendet, welches die erwartete Wellenlänge mit mindestens 10 Punkten diskretisiert. In Abbildung 3 (links) ist der schematische Aufbau verdeutlicht, indem das akustische Berechnungsgebiet in hellblau gekennzeichnet ist. Das rechteckige Quellgebiet aus der CFD wird örtlich und zeitlich auf das akustische Gitter interpoliert. Zudem wird eine kreisförmige Druckfeldfortsetzung nach [7] verwendet um unphysikalischen Quellen an den Rändern des CFD-Gebietes vorzubeugen. Um eine Freifeldabstrahlung zu modellieren umschließt eine numerische Dämpfungsschicht das akustische Berechnungsgebiet. Die Ergebnisse der dipolartigen Schallabstrahlung sind in Abbildung 3 (rechts) deutlich zu erkennen. Zur detaillierteren Bewertung wird die semi-analytische Lösung sowie die numerisch berechneten Parameter der zugrunde liegenden CFD-Simulation verwendet. In Abbildung 4 ist eine Momentaufnahme des Schalldrucks quer zur Anströmung aufgetragen, wobei die semi-analytische Lösung als Amplituden-Hüllkurve dient. Die Auswertung der

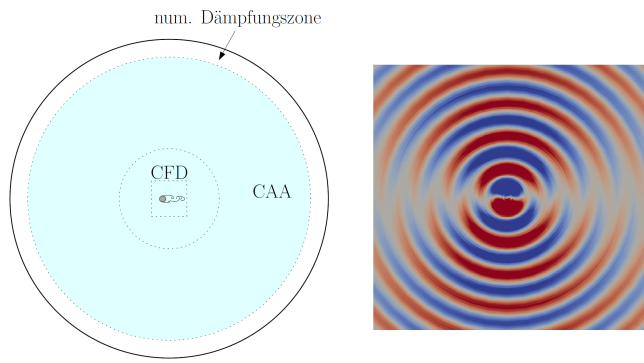


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des akustischen Rechengitters (links) und Momentaufnahme des berechneten Schalldrucks p^a (rechts).

Wellenlänge steht in sehr guter Übereinstimmung mit der Strouhalfrequenz f_{St} und auch das Ausbreitungs- und Abklingverhalten der induzierten Akustik ist hierdurch verifiziert.

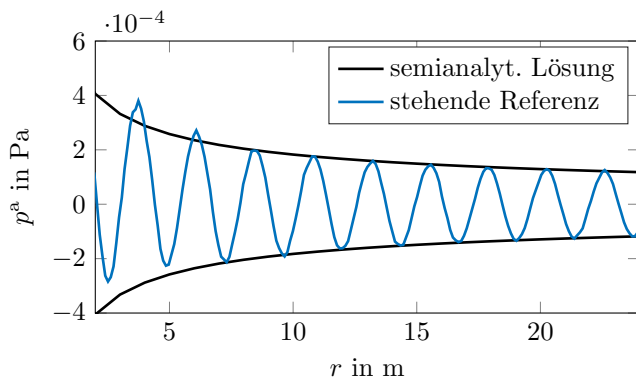


Abbildung 4: Momentaufnahme des Schalldrucks p^a quer zur Anströmung.

Ergebnisse

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Gitterrotation auf die akustische Wellenausbreitung werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet. Die Interpolation an den entstehenden Koppelflächen zwischen stehendem und rotierendem Gitter wird mittels "Arbitrary-Mesh-Interfaces" (AMI) nach [8] in OpenFOAM[®] realisiert. In zwei Schritten wird zunächst die reine Beeinflussung der Wellenausbreitung und anschließend ein realitätsnaher Anwendungsfall inklusive rotierenden CFD-Ergebnissen beleuchtet.

Ergebnisse mit rotierendem CAA-Gitter

Im ersten Schritt wird das akustische Rechengitter mit einem rotierenden Abschnitt im Außenbereich versehen. Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, bleibt das Quellgebiet dabei unverändert und wird mittels eines stehenden Gitters abgebildet. An der Grenze des fortgesetzten Quellfeldes wird eine AMI eingebracht und der äußere Teil des Gitters mit $\omega = 50$ rad/s rotiert. Um den Einfluss der Rotation und der Interpolation über die entstehende Koppelfläche zu analysieren, ist in Abbildung

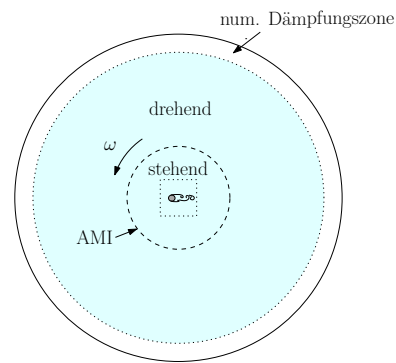


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des im Außenbereich rotierenden akustischen Rechengitters.

6 eine Momentaufnahme des Schalldrucks quer zur Anströmung aufgetragen. Als Referenz werden die Ergebnisse der Simulation mit stehendem Gitter sowie die semianalytische Lösung verwendet. Der Vergleich der Er-

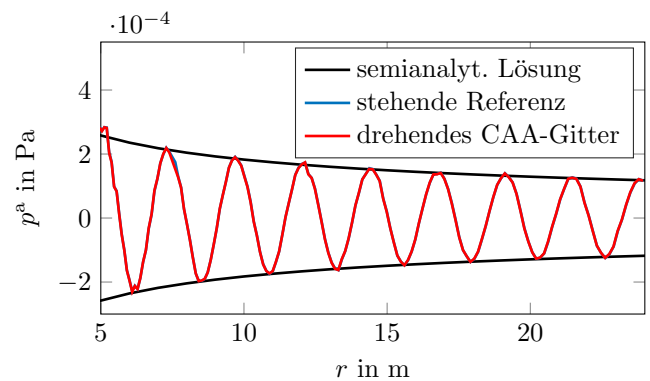


Abbildung 6: Momentaufnahme des Schalldrucks p^a quer zur Anströmung.

gebnisse zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, sodass die Wellenausbreitung unverändert und korrekt abgebildet wird. Für eine umfassende Bewertung ist in Abbildung 7 die Richtungswirkung des RMS-Schalldrucks im Vergleich zur Referenzberechnung aufgezeigt. Auch hier

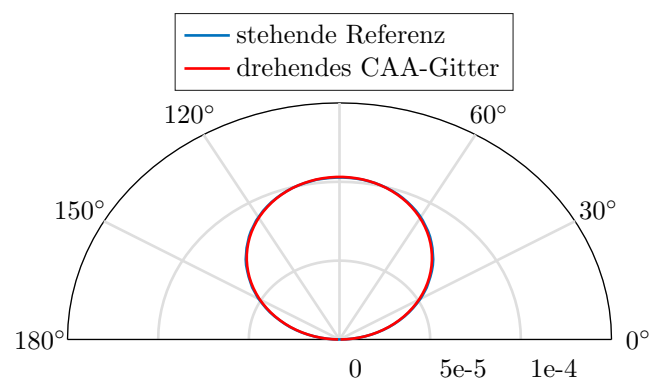


Abbildung 7: Richtungswirkung des RMS-Schalldrucks p^a_{rms} in Pa ausgewertet bei $r = 15$ m.

wird deutlich, dass die Berücksichtigung des rotierenden Gitters keine identifizierbaren Fehler hervorruft und die Wellenausbreitung korrekt modelliert wird.

Ergebnisse mit rotierendem CFD/CAA-Gitter

Im zweiten Schritt wird eine strömungsakustische Simulation eines rotierenden Systems nachgebildet und die Strömungsergebnisse mit rotierenden Gitterabschnitten als Quellfeld verwendet. Das in Abbildung 8 schematisch dargestellte Rechengitter verdeutlicht die Vorgehensweise. Genauer setzt sich das akustische Rechengitter aus ei-

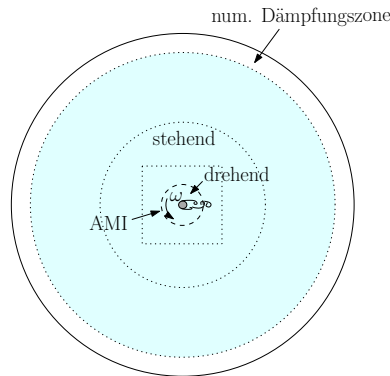


Abbildung 8: Schematischer Aufbau des im Quellgebiet rotierenden akustischen Rechengitters.

nem sehr kleinen, den Zylinder umgebenden rotierenden und einem stehenden Gitter für die Wellenausbreitung zusammen. Die rotierenden Gitterabschnitte der CFD und CAA sind deckungsgleich und drehen synchron mit $\omega = 50 \text{ rad/s}$. In Abbildung 9 ist der Vergleich der Schallausbreitung über den Radius beispielhaft aufgetragen. Da in der Momentaufnahme nahezu keine Unterschiede

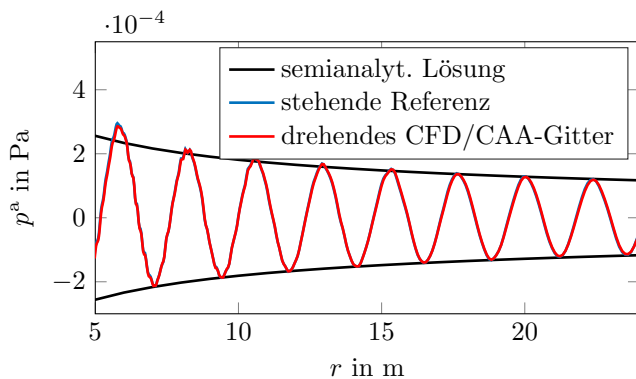


Abbildung 9: Momentaufnahme des Schalldrucks p^a quer zur Anströmung.

der Ergebnisse zwischen der Referenzberechnung und der Berechnung mit rotierendem CFD/CAA-Gitter zu identifizieren ist, kann die Vorgehensweise als sinnvoll bewertet werden. Die Auswertung der Richtungswirkung in Abbildung 10 bestätigt diesen Sachverhalt. Abschließend kann das entwickelte Vorgehen zur Berücksichtigung von rotierenden Gittern damit verifiziert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Strömungsakustik-Löser für die Berechnung mit rotierenden Gittern erweitert und anhand eines Anwendungsfalls untersucht. Das entwickelte Verfahren zeigte keine negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit

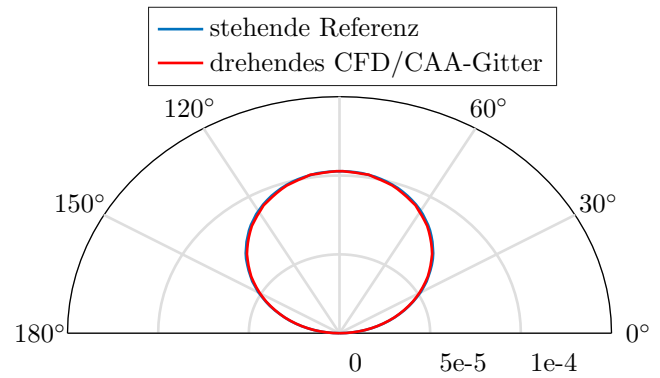


Abbildung 10: Richtungswirkung des RMS-Schalldrucks p_{rms}^a in Pa ausgewertet bei $r = 15 \text{ m}$.

der numerischen Ergebnisse. Anhand zweier Untersuchungsszenarien und dem Vergleich zu Ergebnissen einer statischen Referenzberechnung konnte eine abschließende Verifizierung erzielt werden. Zukünftig soll die Aussagekraft vor allem durch weiterführende Untersuchungen von komplexeren dreidimensionalen Anwendungsfällen und einhergehender Validierung erweitert werden.

Literatur

- [1] Hüppe, A., Grabinger, J., Kaltenbacher, M., Reppenhagen, A., Dutzler, G., Kühnel, W.: A non-conforming finite element method for computational aeroacoustics in rotating systems. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2014), 2739
- [2] Ewert, R., Schröder, W.: Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering. Journal of Computational Physics 188(2) (2003), 365-398
- [3] Kaltenbacher, M., Hüppe, A., Reppenhagen, A., Brandstätter, B., Becker, S.: Simulation Environment for the Computation of Aeroacoustic Noise Generated by Rotating Systems. Proceedings of the DAGA, Aachen, Deutschland, 2016
- [4] Greenshields, C. J.: Programmer's Guide. OpenFOAM Foundation Ltd. (2015), Version 2.4.0
- [5] Fujita, H.: The characteristics of the Aeolian tone radiated from two-dimensional cylinders. Fluid Dynamics Research 42 (2010), 15002
- [6] Norberg, C.: Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. Journal of Fluids and Structures 17(1) (2003), 57-96
- [7] Schröder, T., von Estorff, O.: Handling of spatially truncated source fields based on pressure time derivatives in hybrid computational aeroacoustics. International Journal of Aeroacoustics 16(7-8) (2017), 563-581
- [8] Farrell, P. E., Maddison, J. R.: Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 200(1-4) (2010), 89-100