

Hydroakustische Untersuchung eines Schaufelprofils in einem nabenlosen Propellersystem basierend auf dem EIF-Verfahren und der MLS-Methode

Hoshang Sultani¹, Max Hieke², Otto von Estorff¹ und Frank-Hendrik Wurm²

¹ Technische Universität Hamburg, Institut für Modellierung und Berechnung, 21073 Hamburg, E-Mail: mub@tuhh.de

² Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmaschinen, 18059 Rostock, E-Mail: hendrik.wurm@uni-rostock.de

Einleitung

Das Thema Unterwasserlärm hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung zugenommen. Dies ist besonders auf die starke Zunahme der industriellen Nutzung der Weltmeere und die damit verbundene Zunahme des Schiffsaufkommens (Propellerlärm) zurückzuführen.

Es gibt eine Vielzahl von Meereslebewesen, die zur Kommunikation und Orientierung auf ihren akustischen Sinn angewiesen sind. Je nach Intensität und Dauer kann der anthropogene Unterwasserlärm zu verschiedenen negativen Effekten bis hin zu starken gesundheitlichen Schäden bei den Meerestieren führen [1]. Durch die Vorgaben von Richtlinien werden bereits Rahmenbedingungen geschaffen, um den negativen Einfluss zu reduzieren. Eine andere Möglichkeit ist es, alternative Technologien zu verwenden, die geringeren Lärm produzieren. Mit Blick auf den Propellerlärm stellen nabenlose Propeller [2] (siehe Abbildung 1) eine Alternative zu den konventionellen Propellern dar. Sowohl aus strömungsmechanischen als auch aus konstruktiven Gründen kann durch deren Einsatz eine wesentlich geringere Schallabstrahlung erwartet werden. Bisher existieren jedoch keine detaillierten Untersuchungen zur Strömung und Hydroakustik nabenloser Propellersysteme.



Abbildung 1: Bild des zu untersuchenden nabenlosen Propellers.

Im vorliegenden Beitrag wird die Hydroakustik eines sich in einem nabenlosen Propellersystem befindlichen Schaufelprofils mittels eines hybriden Verfahrens untersucht. Die zunächst durchgeführte Strömungssimulation des komplexen 3D-Systems erfolgte mittels einer „Detached Eddy Simulation“ (DES) [3]. Aus diesen wurden zweidimensionale Daten für eine 2D-Akustiksimulation eines Schaufelprofils extrahiert. Für die Akustikberechnung wurde der „Expansion about Incompressible Flow“ (EIF) – Ansatz [4] mit Modifikationen aus [5] herangezogen. Zur räumlichen Diskretisierung der EIF-Gleichungen wurde die „Finite Volume Moving Least Squares“ (FV-MLS) – Methode [6] eingesetzt, welche besonders bei der Anwendung von unstrukturierten Netzen vielversprechende Eigenschaften aufweist.

Akustikmodell

Das Akustikmodell wurde in der Umgebung von OpenFOAM [7] aufgebaut. OpenFOAM ist ein Open Source Softwarepaket zur Strömungssimulation. Es basiert auf der Methode der Finiten Volumen (FV), die besonders gut zur Anwendung von

unstrukturierten Netzen geeignet ist. Zudem ist die numerische Infrastruktur in OpenFOAM bereits sehr umfangreich entwickelt, wodurch viele Synergien genutzt werden konnten.

EIF-Ansatz

Der EIF-Ansatz ist ein hybrides Verfahren entwickelt auf Basis eines Störungsansatzes. Dabei werden die Zustandsgrößen Druck p , Geschwindigkeit \mathbf{u} und Dichte ρ für den Fall kleiner Mach-Zahlen in inkompressible Strömungsanteile (P , \mathbf{U} und ρ_0) sowie in kompressible (akustische) Störungen (p' , \mathbf{u}' und ρ') aufgeteilt. Eingesetzt in die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen, ergeben sich unter der Annahme eines isentropen akustischen Feldes die folgenden drei Gleichungen

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{f}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \text{div}(f_i \cdot (\mathbf{U}_j + \mathbf{u}'_j) + \rho_0 U_i u'_j) + \text{grad}(p') = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - c^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial t} \quad (3)$$

für die Akustik, wobei für die neu eingeführte Größe \mathbf{f} gilt $f_i = \rho_0 u'_i + \rho' U_i$ und c die Schallgeschwindigkeit darstellt.

FV-MLS-Methode

Beim FV-MLS-Verfahren erfolgt für jede Zelle eine stückweise Polynomentwicklung. Mit diesen werden die für die räumliche Diskretisierung der Divergenz- und Gradiententerme erforderlichen Oberflächenwerte der Zellen extrapoliert. Für eine skalare Größe Φ mit der Entwicklungsstelle x_j lässt sich beispielsweise das Polynom zweiter Ordnung mit $\Delta x = x - x_j$ durch

$$\Phi(x) = \Phi_j + \nabla \Phi_j \cdot \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T H_j \Delta x \quad (4)$$

darstellen. Dabei sind $\nabla \Phi_j$ der Gradient und H_j die Hesse-Matrix von Φ ausgewertet an der Stelle x_j . Die bei der Polynomentwicklung auftretenden Ableitungen werden mit Hilfe der MLS-Approximation bestimmt. Die Idee des MLS-Verfahrens ist es, für einen betrachteten Auswertepunkt $z = x_j$, eine lokale Funktion $\hat{\Phi}$ mit dem Ansatz

$$\hat{\Phi}(x, z) = \sum_{i=1}^m p_i(x) \alpha_i(z)|_{z=x} = p^T(x) \alpha(z)|_{z=x} \quad (5)$$

über die gewichtete Methode der kleinsten Fehlerquadrate aufzustellen. In Gleichung (5) ist $p(x)$ eine m -dimensionale Basis von Funktionen (in der Regel Polynome) und $\alpha(z)$ die unbekanntenen Koeffizienten, die so gewählt werden, dass die Fehlerfunktion

$$E(z) = \sum_{j=1}^{n_{\Omega_z}} W(z - x_j)|_{z=x} [u_j - \hat{\Phi}(x_j, z)]^2 \quad (6)$$

minimiert wird. Hierbei ist n_{Ω_z} die Anzahl der Punkte, die als Stützstellen zur Bestimmung der lokalen Funktion verwendet

werden. Die Größen u_j stellen die bekannten physikalischen Werte der j -ten Stützstelle dar und $W(z - x_j)$ ist die Gewichtungsfunktion mit dem Zentrum an der Stelle z . In der vorliegenden Studie wurde die exponentielle Gewichtungsfunktion [6] verwendet. Nach der Minimierung der Fehlerfunktion $E(z)$, ergeben sich die optimalen Koeffizienten. Werden die berechneten Koeffizienten in die Gleichung (5) eingesetzt, ergibt sich die lokale Funktion

$$\hat{\Phi}(x) = N^T(x)u_{\Omega_x} \quad (7)$$

mit der Formfunktion $N(x)$. Hierbei wurde die zunächst festgesetzte Auswertestelle z mit der Ortsvariablen x ersetzt, womit die Möglichkeit besteht, den Auswertepunkt „mitzubewegen“. Der Gradient der lokalen Funktion folgt aus der Ableitung der Formfunktion $N(x)$ zu

$$\nabla \hat{\Phi}(x) = \nabla(N^T(x))u_{\Omega_x}. \quad (8)$$

Die höheren Ableitungen der lokalen Funktion ergeben sich mit Hilfe der weiteren Ableitungen der Formfunktion. Die Bestimmung der Formfunktion und die ihrer Ableitungen muss bei nicht veränderlichen Netzen nur einmal zu Beginn der Simulation durchgeführt werden, sodass der Aufwand hierfür gering bleibt.

Weitere Modelleigenschaften

Die Zeitintegration der EIF-Gleichungen erfolgt mittels eines expliziten auf akustische Problemstellungen optimierten 5-stufigen Runge-Kutta-Verfahrens [8]. Zur Unterdrückung unphysikalischer Gitterschwingungen wird eine einfache lokale Filterung in jedem Zeitschritt ausgeführt. Zur Approximation einer nichtreflektierenden Randbedingung, wird eine explizite Absorptionsschicht eingesetzt, welche die physikalischen Werte in einem vorgegebenen Bereich auf null dämpft.

Setup zur 2D-Akustiksimulation

Für die zweidimensionale Akustiksimulation eines Schaufelprofils wurden im ersten Schritt 2D-Umfangsdaten des Propellers aus den 3D-Strömungsergebnissen bei $r/R = 0,5$, mit R als Radius zu den Blattwurzeln, extrahiert. Diese Daten wurden dann um den Umfang aufgewickelt, womit sich ebene 2D-Daten mit insgesamt vier Schaufelprofilschnittflächen ergaben. Die CFD-Daten für ein Viertel des aufgewickelten Bereiches mit einem Schaufelprofil in der Mitte des Gebietes wurden für diese Studie herangezogen. Die Abbildung 2 zeigt für dieses Gebiet das Druckfeld aus der CFD-Simulation.

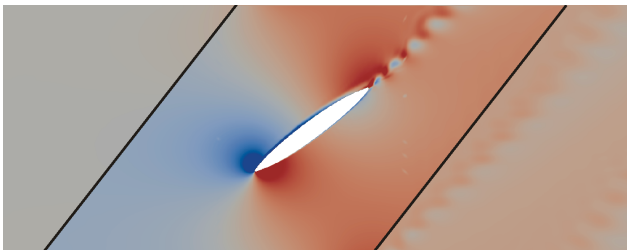


Abbildung 2: Druckfeld in der Nähe eines Schaufelprofils.

Die Strömungsablösung an der Hinterkante des Profils führt zu einer Wirbelstraße. Bei einem gewissen Abstand rechts vom Profil ist eine weitere Wirbelstraße zu sehen, welche der Hinterkantenablösung des vorlaufenden Profils zugeordnet werden kann. Um möglichst nur die Effekte, die sich bei der Umströmung des betrachteten Profils ergeben in der Akustik-

untersuchung zu erfassen, wird der CFD-Bereich zwischen den beiden schwarzen Linien verwendet. Dieser Bereich wird auch als „Mappingbereich“ bezeichnet, da nur die CFD-Daten dieses Gebietes auf das Akustiknetz übertragen werden.

Das Akustiknetz wurde basierend auf den minimal- und maximal-aufzulösenden Frequenzen aufgebaut. Für die minimale Frequenz wurde die Blattpassierfrequenz (BPF) mit 67,6 Hz herangezogen und die maximale Frequenz orientiert sich an die höchste Frequenz, die sich bei der CFD-Analyse [3] des zu betrachteten Gebietes mit 2620 Hz ergeben hat. In der Abbildung 3 ist rechts eine Skizze des kreisförmigen Akustiks simulationsgebietes mit $r_1 = 50$ m dargestellt. In der Mitte des Gebietes mit einem Radius von $r_2 = 25$ m befindet sich der Auswertebereich der Akustiksimulation. Er ist so gewählt, dass er mindestens eine Wellenlänge (≈ 22 m) der niedrigsten Frequenz enthält. Die weiteren 25 m außerhalb des Auswertebereiches bilden die Dämpfungsschicht.

Das linke Bild in der Abbildung 3 zeigt das Akustiknetz in der Nähe des Schaufelprofils. In der Akustik kann im Allgemeinen ein gröberes Netz verwendet werden als in der CFD.

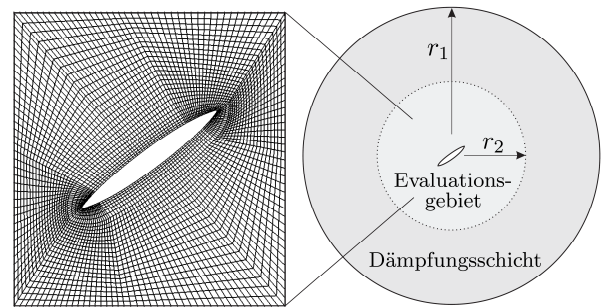


Abbildung 3: Akustiknetz und -simulationsgebiet.

Ergebnisse und Analyse

Zunächst wird der Quellterm des Verfahrens, der mit $\partial P/\partial t$ auf der rechten Seite der Gleichung (3) auftritt, für den Mappingbereich untersucht. Im Anschluss darauf werden die Ergebnisse zum akustischen Druckfeld p' vorgestellt und analysiert. Abschließend findet ein Vergleich der FV-MLS-Methode mit einem Standardschemata aus OpenFOAM statt.

Quellterm – $\partial P/\partial t$

Die Abbildung 4 zeigt das Quellfeld für zwei unterschiedliche Zeitpunkte. Am Rand des Gebietes wurde das Feld gefenstert, um starke Diskontinuitäten zu vermeiden. Durch die Strömungsablösung im Bereich der Hinterkante ergibt sich, wie im oberen Bild gut zu erkennen, ein großflächiges Druckfluktuationsgebiet, das ein dipolähnliches Verhalten aufweist. Im Nachlauf des Profils ist auch der Effekt der Wirbelstraße identifizierbar. Ein etwas kleineres Druckfluktuationsgebiet ist auch im Bereich der Vorderkante in beiden Bildern sichtbar. Das untere Bild in der Abbildung 4 zeigt das Quellfeld für eine kurze Zeit Δt nach t_1 . In diesem ist eine besonders auffällige Quellregion im unteren Mappingbereich um den Punkt Q_2 zu erkennen. Aus dem zeitlichen Verlauf des Feldes kann entnommen werden, dass die untere Quellregion immer kontinuierlich in das betrachtete Gebiet hineinwandert, sich im gesamten Gebiet ausbreitet und stark mit den anderen Quellmechanismen interagiert. Es scheint eine Quellregion zu sein, die nicht aus der Strömung um das betrachtete Schaufelprofil stammt, sondern einen anderen Ursprung besitzt.

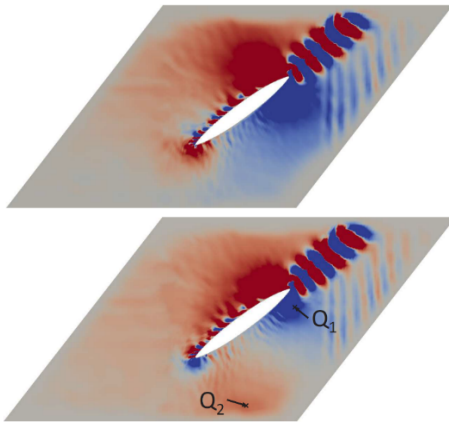


Abbildung 4: $\partial P/\partial t$ im Mappingbereich. Oben für $t = t_1$ und unten für $t = t_1 + \Delta t$.

Die Frequenzanalyse von $\partial P/\partial t$ in der Abbildung 5 zeigt, dass die dominanten Frequenzen für die beiden Punkte Q_1 und Q_2 miteinander übereinstimmen. Die erste dominante Frequenz mit $f/n \approx 30$ entspricht der Frequenz der Hinterkantenablösung. Die zweite Frequenz mit $f/n \approx 155$ wurde in der CFD-Analyse des Feldes als eine Frequenz der Grenzschichtablösung im Bereich der Vorderkante identifiziert. Großflächig wird der untere Quellbereich jedoch hauptsächlich von der ersten Frequenz $f/n \approx 30$ dominiert. Da zuvor festgestellt wurde, dass die untere Quellregion nicht aus den Strömungsmechanismen des betrachteten Schaufelprofils stammt und die Hauptfrequenz des Gebietes jedoch mit der Frequenz der Strömungsablösung an der Hinterkante übereinstimmt, kann der Hinterkantenablösung des vorlaufenden Profils der Ursprung dieses Effektes sein. Zur Bekräftigung dieser Vermutung sollen die nächsten Untersuchungen zeigen, dass Quellgebiete um die Punkte Q_1 und Q_2 nicht den gleichen Ursprung haben.

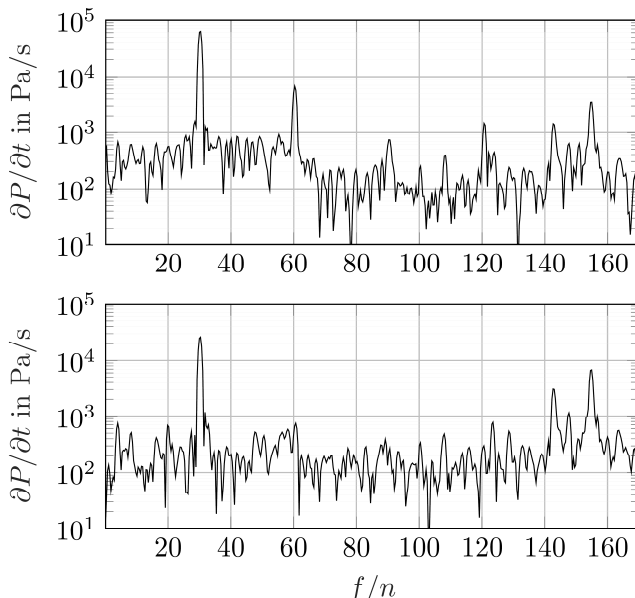


Abbildung 5: Frequenzanalyse von $\partial P/\partial t$ für die Punkte Q_1 (oben) und Q_2 (unten).

In der Abbildung 6 ist der zeitliche Verlauf von $\partial P/\partial t$ für die beiden Punkte Q_1 und Q_2 dargestellt. Es zeigt, dass die beiden Verläufe nicht in Phase sind, welches bei zwei Signalen gleichen Ursprungs nicht der Fall sein darf. Der ungefähre Phasenversatz ist im Diagramm mit $\Delta\varphi$ gekennzeichnet.

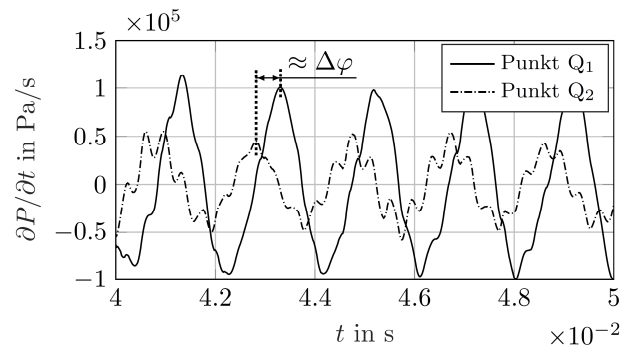


Abbildung 6: $\partial P/\partial t$ über der Zeit für die Punkte Q_1 und Q_2 .

Die Frequenzen der größten Amplituden sind jedoch identisch und entsprechen der Frequenz der Hinterkantenablösung.

Das Diagramm in der Abbildung 7 zeigt den RMS-Verlauf von $\partial P/\partial t$ über den normierten Abstand von Q_1 nach Q_2 . Der Verlauf fällt nicht kontinuierlich ab, wie es zu erwarten wäre, wenn nur die Quellmechanismen des betrachteten Profils auftreten würden. Ab einem gewissen Abstand steigt der Verlauf wieder an. Dies ist ein Indiz dafür, dass in Richtung von Q_2 eine zusätzliche Quelle existieren muss, die zu einer Erhöhung der Quellenstärke führt.

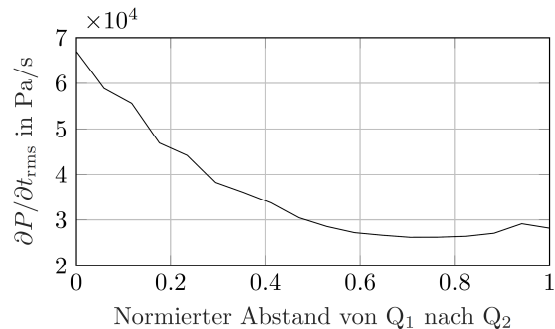


Abbildung 7: RMS von $\partial P/\partial t$ über den normierten Abstand von Punkt Q_1 nach Punkt Q_2 .

Die Untersuchungen zeigen, dass eine isolierte Betrachtung der Strömung um ein Profil eines Propellersystems nicht möglich ist, da die einzelnen Schaufeln immer in starker Interaktion miteinander sind. Dies ändert sowohl das hydrodynamische als auch das hydroakustische Verhalten im Vergleich zu der Umströmung eines einzelnen Hydrofoils. Daher ist es besonders interessant zu untersuchen, wie sich die Hydroakustik für so einen Fall verhält. Hierfür wird das akustische Druckfeld, die aus dem betrachteten CFD-Gebiet resultiert, im nächsten Unterabschnitt vorgestellt und erläutert.

Akustisches Druckfeld

Das Feld des akustischen Druckes p' in der Nähe des Schaufelprofils ist links in der Abbildung 8 für einen beliebigen Zeitpunkt dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt interagieren die Quellmechanismen derart miteinander, dass sich insgesamt ein dipolartiges Verhalten in der Profilnähe ergibt. Auch die starken Druckfluktuationen im Nachlauf können gut beobachtet werden. Im Allgemeinen ist jedoch kein regelmäßiges Muster im akustischen Druckfeld in der Profilnähe erkennbar. Klare Muster in Form eines Monopols ergeben sich erst wenn das akustische Feld für ein größeres Gebiet (siehe Abbildung 8 rechts) betrachtet wird. Es treten hauptsächlich zwei überlagerte Wellen, deren Frequenzen die der Dominanten aus der Quellfeldanalyse entsprechen.

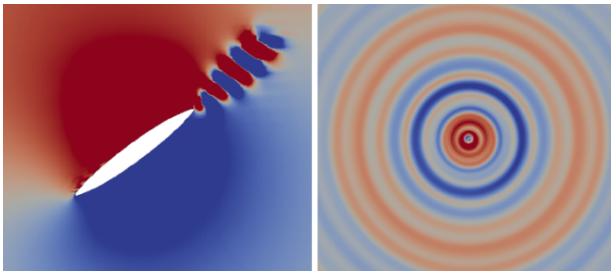


Abbildung 8: Akustisches Druckfeld in Profilnähe (links) und für ein größeres Gebiet (rechts).

Das Frequenzspektrum des Schalldruckpegels (SPL) bei einem Abstand von 5 m ist in der Abbildung 9 dargestellt. Neben den beiden vorher auftretenden Frequenzen ($f/n \approx 30$ und $f/n \approx 155$), die auch hier hauptsächlich dominieren, treten noch einige weitere charakteristische Frequenzen auf. Alle auftretenden charakteristischen Frequenzen sind sowohl in der CFD-Analyse, als auch in der Quellfeldanalyse des betrachteten Gebietes vorhanden und wurden zur Übersicht in der Tabelle 1 mit den dazugehörigen SPL-Werten aufgelistet.

Tabelle 1: Charakteristische Frequenzen mit SPL-Werten.

Norm. Freq.	30	100	108	143	155
SPL in dB	124	100	100	106	115

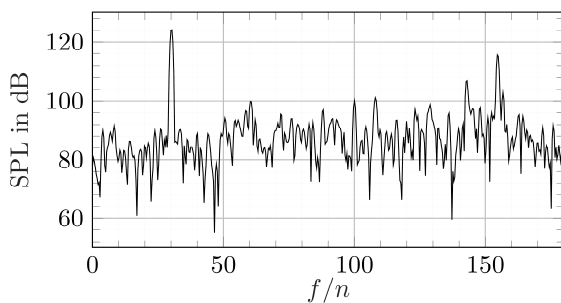


Abbildung 9: Frequenzanalyse des Schalldruckfeldes.

Evaluation der MLS-Methode

Im Folgenden wird ein erster Vergleich der FV-MLS-Methode mit dem Zentralschemata (CDS) aus OpenFOAM, angewendet auf den behandelten Fall, vorgestellt. Hierfür ist das akustische Druckfeld in der Nähe des Schaufelprofils für die lineare CDS (links) und der linearen FV-MLS-Methode (rechts) in der Abbildung 10 gezeigt. Ersteres zeigt ein sehr stark von der Netzstruktur abhängiges Verhalten, welche die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen kann. Für die FV-MLS-Methode ist die Feldauflösung relativ unabhängig von der Netzstruktur und bestätigt auch in diesem Fall die positiven Vorteile der MLS-Methode. Dies spiegelt sich auch in der Genauigkeitsuntersuchung der beiden Verfahren wieder.

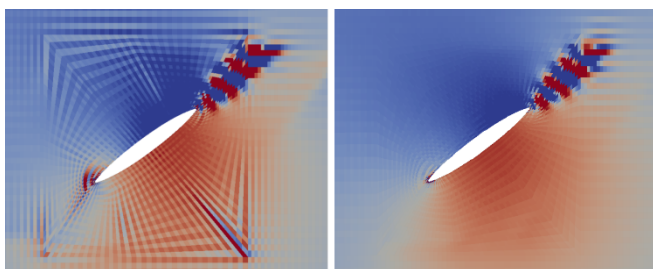


Abbildung 10: Akustisches Druckfeld. Links: Lineare FV-CDS (OpenFOAM). Rechts: Lineare FV-MLS-Methode.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zur Hydroakustik eines Schaufelprofils, das sich in einem nabenlosen Propellersystem befindet, wurden vorgestellt. Für die Berechnung des Strömungsschalls wurde das EIF-Verfahren verwendet. Die räumliche Diskretisierung der EIF-Gleichungen erfolgte mittels der FV-MLS-Methode. Mit Hilfe von 3D-CFD-Daten wurde eine 2D-Akustiksimulation eines Schaufelprofils durchgeführt.

Die Quellfeldanalyse zeigt, dass es einen starken Einfluss der Strömungsablösung des vorlaufenden Profils auf das betrachtete Schaufelprofil gibt. Dies ändert sowohl das hydrodynamische als auch das hydroakustische Verhalten im Vergleich zu der Umströmung eines einzelnen Hydrofoils. Für den Strömungsschall ergeben sich insgesamt sehr plausible Ergebnisse, da die in der Akustik auftretenden Frequenzen sehr gut mit den Ergebnissen aus der Quellfeldanalyse und der CFD-Analyse des betrachteten Gebietes übereinstimmen. Der Vergleich der FV-MLS-Methode mit einem Standardschemata aus OpenFOAM bestätigte auch in diesem Zusammenhang die positiven Vorteile der MLS-Approximation, unabhängig von der Netzstruktur das Feld aufzulösen.

Weitere Arbeiten zum hydroakustischen Verhalten eines Schaufelprofils sollen zum Einfluss der Größe des Mappinggebietes durchgeführt werden. Zudem soll die Hydroakustik des 3D-Gesamtsystems mit dem vorgestellten Akustikmodell untersucht und anhand von bereits vorhandenen Messdaten validiert werden.

Literatur

- [1] Richardson, W.J.; Greene Jr., C. R.; Malme, C. I.; Thomson, D. H.: Marine Mammals and Noise. Academic Press (1995).
- [2] Voith, URL: <http://voith.com/corp-en/drives-transmissions/voith-inline-thruster-propulsor.html> (März 2019).
- [3] Hieke, M.; Sultani, H.; Wurm, F.-H.; v. Estorff, O.: Identifizierung kohärenter Strömungsstrukturen und die hydroakustische Schallabstrahlung eines nabenlosen Propellers. Conference Paper – DAGA (2019).
- [4] Hardin, J. C.; Pope, D. S.: An Acoustic/Viscous Splitting Technique for Computational Aeroacoustics. Theoretical and Computational Fluid Dynamics 6 (1994), 323-340.
- [5] Shen, W. Z.; Sørensen, J. N.: Comment on the Aeroacoustic Formulation of Hardin and Pope. AIAA Journal Readers' Forum 37 (1999), 141-145.
- [6] Cueto-Felgueroso, L.; Colominas, I.; Nogueira, X.; Navarrina, F.; Casteleiro, M.: Finite volume solvers and Moving Least-Squares approximations for the compressible Navier–Stokes equations on unstructured grids. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 196, 2007.
- [7] OpenFOAM, URL: <http://www.openfoam.org> (März 2019).
- [8] Calvo, M.; Franco, J. M.; Rández, L.: Minimum storage Runge-Kutta schemes for computational acoustics. Computers & Mathematics with Applications, 45, 2003.