

Erweiterung einer immersed-boundary-Methode auf die Simulation der Schallabstrahlung umströmter bewegter Körper

Johannes Kreuzinger¹, Fabian Kurz¹, Florian Schwertfirm¹

¹ KM-Turbulenz GmbH, München, Deutschland, Email: j.kreuzinger@km-turbulenz.de

Einleitung

Ausgangspunkt ist das im Code MGLET implementierte hybride Verfahren zur Strömungsschallsimulation. Hier werden Strömung und Akustik in einem Code mit identischen Gittern und numerischen Operatoren berechnet, was sehr störungsarme Lösungen erlaubt. Mit dem Verfahren besteht langjährige Erfahrung in der Berechnung der Schallabstrahlung in komplexen Geometrien [1],[2]. In dieser Arbeit wird eine Erweiterung der Methode auf bewegte Geometrien vorgestellt.

Dazu ist die cut-cell-Variante der immersed boundary geeignet [4]. Die Schallausbreitung wird mit der convective wave equation berechnet. Sie ist äquivalent zu APE1 [3]. Als Ergebnis erhält man die gesamte Druckfluktuation, die sich aus hydromechanischem und akustischem Anteil zusammensetzt: $p' = p^h + p^a$.

cut cell immersed boundary

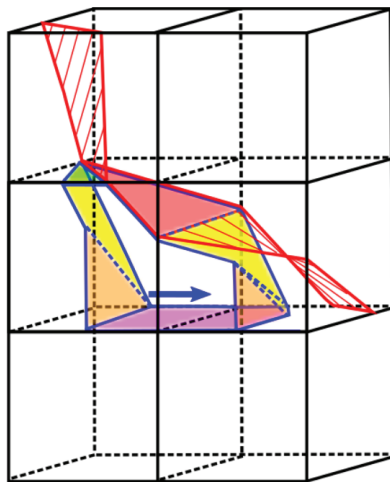


Abbildung 1: Beispiel für eine Impuls-Bilanzzelle; Körperoberfläche rot schraffiert

Bei dieser Methode werden die kartesischen Bilanzzellen mit der Geometrie verschnitten und die Erhaltungsgrößen direkt in den entstehenden, teilweise sehr komplexen (s. Abb.1) Zellen bilanziert.

Die entstehenden Zellen können beliebig klein werden, was zu numerischen Instabilitäten führen würde. Um dies zu verhindern werden kleine Zellen gemeinsam mit einer angrenzenden großen Zelle bilanziert (Verschmelzen, cell merging). Dies führt zwar zu nochmals komplizierteren Bilanzzellen, ermöglicht aber weiterhin eine energierhaltende Diskretisierung.

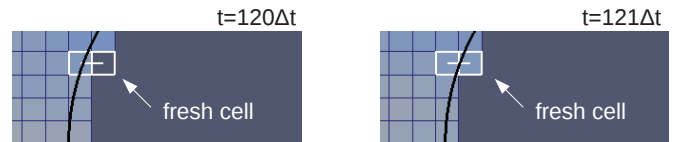


Abbildung 2: Druckzellen zu Beginn (links) und Ende (rechts) eines Zeitschritts; weiß: verschmolzene Zellen

Die Bewegung des Körpers durch das kartesische Gitter führt zu sich ändernden Formen und Volumen der Bilanzzellen, was durch eine (A)rbitrary-(L)agrangean-(E)ulerian-Formulierung für alle Erhaltungsgleichungen berücksichtigt wird. Zellen können sich während eines Zeitschritts nicht nur verändern, sondern treten neu in das Fluidgebiet ein oder verschwinden aus diesem (fresh and dead cells). Solche Zellen werden zu Beginn eines Zeitschrittes detektiert und mit demselben Algorithmus, der auch zur Stabilisierung kleiner Zellen verwendet wird, mit Nachbarzellen verschmolzen, s. Abb.2. Damit müssen auch in diesem Fall nur sich verändernde Bilanzzellen betrachtet werden. Nach dem Zeitschritt werden die Zellen aufgeteilt. Das Verschmelzen und Aufteilen der Zellen kann nicht gleichzeitig impuls- und massenerhaltend sein. Für die inkompressible Strömungslösung ist die Massenerhaltung unabdingbar, sie wird durch eine zusätzliche Druckkorrektur erreicht. Damit erhält man ein glattes Druck- und Geschwindigkeitsfeld auch nahe am Körper. Für die Wellengleichung werden dieselben Verfahren eingesetzt, nur die zusätzliche Druckkorrektur entfällt. Da damit die lokale Massenerhaltung nicht gewährleistet ist, treten kurzweilige Störungen nahe am Körper auf, die aber schnell abklingen.

Mit dem Verfahren sind für die Körperbewegung CFL-Zahlen bis 0.5 möglich. Bedingung an die Geometrie ist, dass alle Radien größer einer ungeschnittenen Zellweite sein müssen.

Oszillierender Zylinder (2D)

Der oszillierende Zylinder mit $Re = 100$ und $KC = 5$ ist ein Standard-Testfall für bewegte Geometrien. Als Referenz existiert eine hochaufgelöste Simulation mit körperangepasstem Gitter in einem mitbewegten Bezugssystem [5]. Hier wurde eine Gitterstudie durchgeführt und zusätzlich die Schallabstrahlung mit einer Machzahl $Ma = 0.25$ simuliert. Das Feld der Druckfluktuation zeigt die erwartete Dipol-Charakteristik (Abb.3). Im abgestrahlten Schall sind keine kurzweiligen Störungen mehr zu sehen.

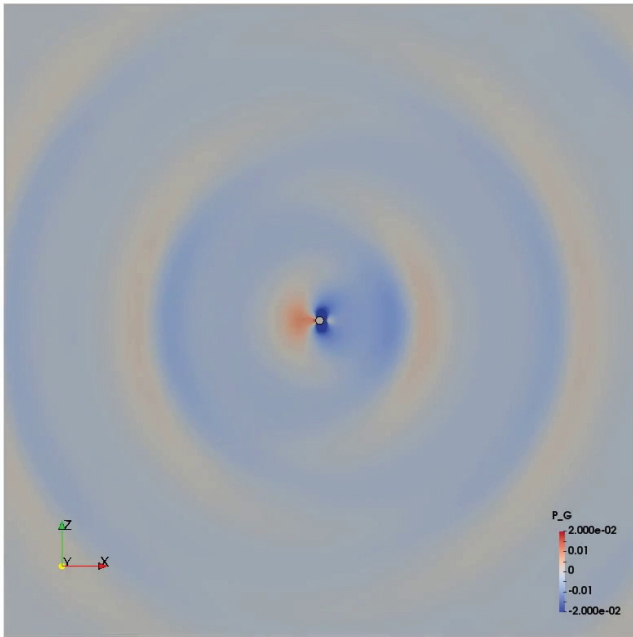


Abbildung 3: gesamtes Simulationsgebiet $40D \times 40D$, Druckfluktuation p'

Abb.4 zeigt den Verlauf des Kraftbeiwertes über eine Schwingungsperiode für verschiedene Gitterweiten. Mit feinerem Gitter wird der Verlauf glatter und liegt für das feinste Gitter mit $\Delta x = D/40$ auf der Referenz. Das Schallfeld wurde an einer Position auf der Bewegungsachse im Abstand von $10D$ zur Mittenlage des Zylinders ausgewertet. Für Gitterweiten $\Delta x \leq D/20$ sind die Spektren konvergiert, s. Abb.5.

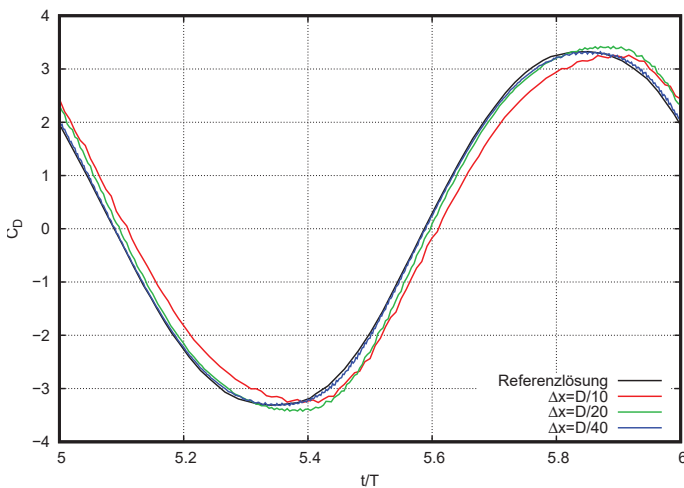


Abbildung 4: Kraftverlauf; Gitterweiten: $\Delta x = D/10, D/20, D/40$; $CFL = konst.$

Rotor (3D)

Als Zwischenschritt hin zu realistischen Anwendungen wurde ein vereinfachter Rotor betrachtet. Er besteht aus zwei Scheiben mit 200mm Durchmesser auf einer Achse, die mit hoher Drehzahl rotieren. Zwischen den Scheiben sind zwei Zylinder angebracht die Schall abstrahlen [6].

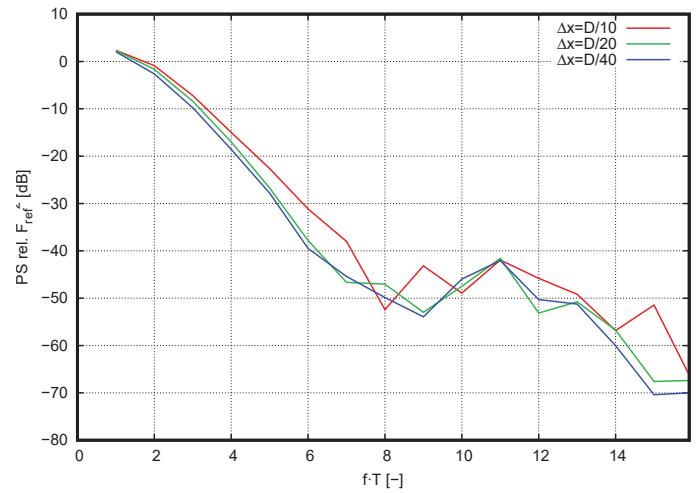


Abbildung 5: Spektren des Schallfelds p' bei unterschiedlichem Δx ; Gitterweiten: $\Delta x = D/10, D/20, D/40$; $CFL = konst.$

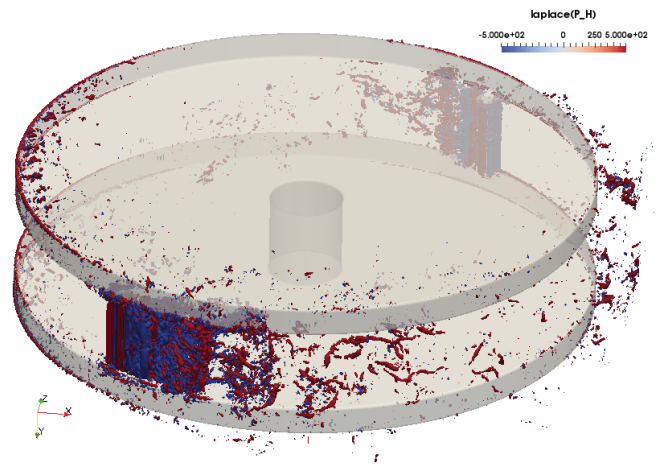


Abbildung 6: Isoflächen des Quellterms Δp^h

Das Schallspektrum ist geprägt durch den Drehklang bei der Blattfolgefrequenz und einen breiten Hiebton-Buckel, verursacht durch die regelmäßige Wirbelablösung am Zylinder. Da auch die Scheiben mitbetrachtet werden, handelt es sich um einen voll dreidimensionalen Testfall, s. Abb.6. Alle Kanten sind mit einem Radius von 1mm verrundet.

Aus den vermessenen Fällen wurde ein Fall mit Zylinderdurchmesser $D = 5\text{mm}$ und Drehzahl $n = 125\text{s}^{-1}$ gewählt, was $Re = 25000$ und $Ma = 0.22$ entspricht. Als Referenz stehen gemessene Schallspektren in 0.5m Abstand zur Achse zur Verfügung.

Problematisch an dem Testfall ist, dass die Strömungszustände um den Rotor nicht dokumentiert sind. So ist z.B. davon auszugehen, dass sich im Versuchsraum, der nicht perfekt rotationssymmetrisch ist, eine unsymmetrische Strömung ausbildet. Um für die Simulation eindeutige Zustände zu erzwingen, wurde ein Queranströmung von $1/3$ der Rotationsgeschwindigkeit gesetzt.

Eine weitere Schwierigkeit für die Simulation ist, dass die Wirbelablösung am Zylinder von der Grenzschicht abhängig ist. Eine adäquate Auflösung dieser Schicht war aufgrund beschränkter Ressourcen nicht möglich. Die fehlende Auflösung wurde teilweise durch eine Erhöhung der Wandschubspannung kompensiert, der Wert wurde in Voruntersuchungen an stehenden Zylindern bestimmt.

Simulationen wurden mit zwei unterschiedlichen Gittern durchgeführt mit einer feinsten Gitterweite im Bereich der Zylinder von $D/10 = 0.5\text{mm}$ bzw. $D/20 = 0.25\text{mm}$. Die Gesamtgitter bestanden aus 34.9 Mio. und 90.7 Mio. Zellen. Die Schallspektren wurden nach einer Umdrehung Einlaufzeit über 8 bzw. 4 Umdrehungen ausgewertet.

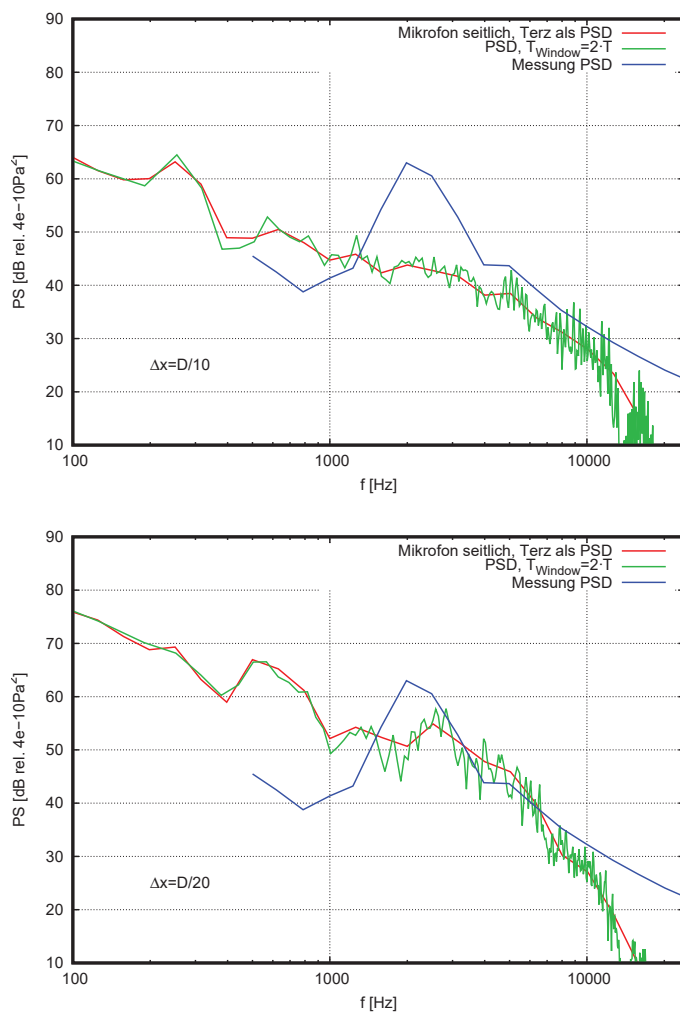


Abbildung 7: Schallspektren in 0.5m Abstand, Vergleich mit Messung; oben: Simulation $\Delta x = D/10$, unten: $\Delta x = D/20$

Die simulierten Spektren zeigen für beide Auflösungen den peak bei der Blattfolgefrequenz von 250Hz (Abb.7). Der Hiebton (in der Messung um 2000Hz) ist nur schwach ausgeprägt. Mit steigender Auflösung wird er stärker, liegt aber mit 2000Hz-4000Hz bei zu hohen Frequenzen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Queranströmung zu stark gewählt wurde. Eventuell ist das auch die Ursache für die zu hohen Pegel zwischen 250Hz und 1000Hz. Die ebenfalls gezeigten Schmalbandspektren zeigen keine auffälligen Störpeaks.

Einen Eindruck des Strömungs- und Schallfeldes vermitteln die Schnittbilder in Abb.8.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die immersed-boundary-Methode läuft stabil für Strömungsschall in dreidimensionalen Fällen mit bewegten Geometrien. Dabei erhält man eine sehr störungsarme Lösung der Strömungsmechanik und eine störungsarme Lösung der akustischen Gleichungen, wobei hier noch noch Potential für eine Reduzierung vorhanden ist.

In der Anwendung auf eine zwar geometrisch einfachen, aber strömungsmechanisch schwierigen 3D-Testfall konnte eine Konvergenz in der Schallabstrahlung hin zu den Messwerten nicht eindeutig gezeigt werden, daher sind weitere Tests mit Gebläsen geplant.

Prinzipiell können mit der moving cut cell beliebige Bewegungen und Verformungen dargestellt werden, damit ist eine Fülle von Einsatzmöglichkeiten denkbar.

Wir möchten uns bedanken für die Förderung im Rahmen des Projekts "Aeroakustische Simulation von rotierenden Gebläsen in HVAC Systemen", angesiedelt am virtual vehicle, Graz als Teil des COMET K2 Forschungsförderungs-Programms der Bundesrepublik Österreich.

Literatur

- [1] Kreuzinger, J.: Approach for efficient aeroacoustic computations in complex geometries. Euromech Colloquium 504, München 2009
- [2] Schwertfirm, F. et al.: Validation of a Hybrid Simulation Method for Flow Noise Prediction. AIAA 2012-2192
- [3] Ewert, R.: A Hybrid Computational Aeroacoustics Method to Simulate Airframe Noise. Shaker Verlag, Aachen, 2003
- [4] Fabian Kurz et al.: A hybrid CFD-CAA approach for aeroacoustic simulations of moving arbitrary bodies with a cut-cell immersed boundary method, DMV-GAMM 2016
- [5] Dütsch, H. et al.: Low-Reynolds-number flow around an oscillation circular cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers. J. Fluid Mech. (1998), vol. 360, S. 249-271
- [6] Stüber, B.: Untersuchung aerodynamisch erzeugter Schallfelder mit Hilfe der Modellmethode. Dissertation, TH München 1968

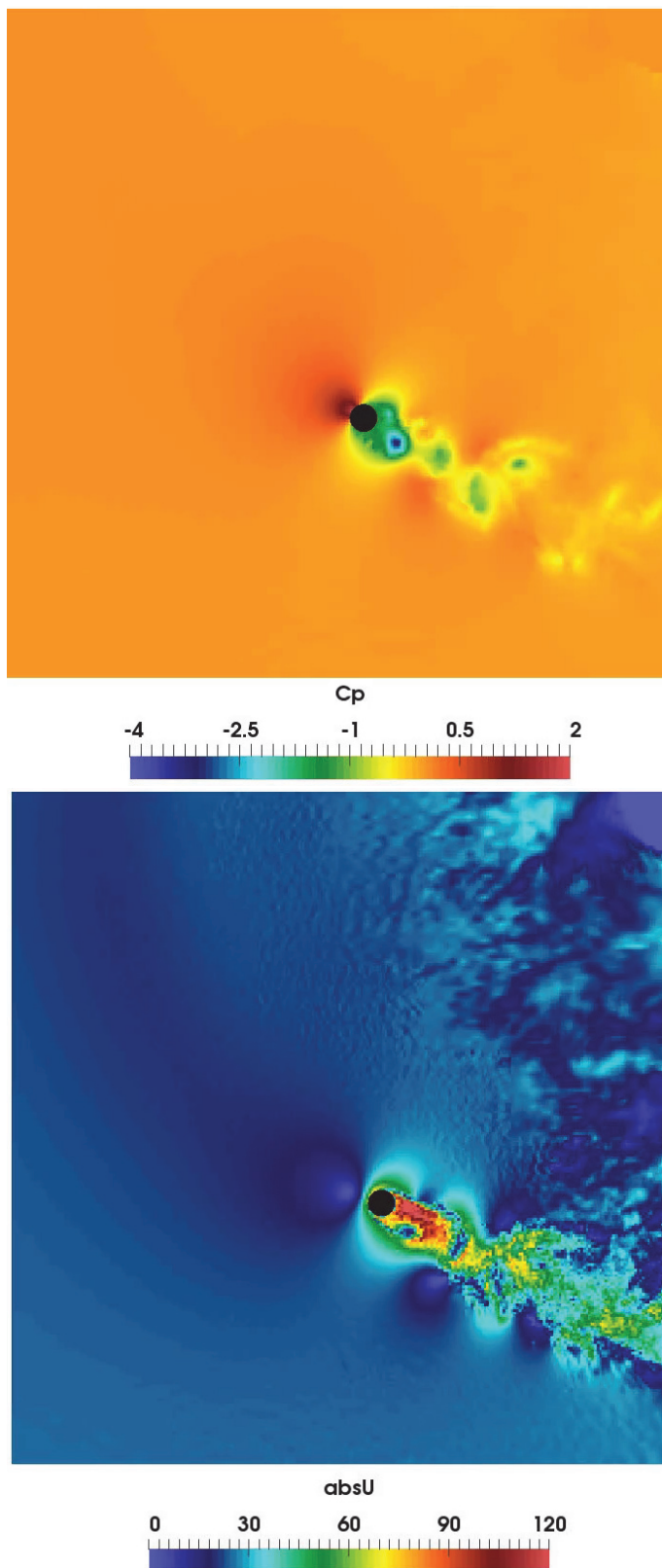


Abbildung 8: Schnitte durch Schall- und Strömungsfeld; oben Druckfeld $p' / (\rho U^2 / 2)$; unten Geschwindigkeit