

Zur Simulation der Strömungsgeräusche einer Kreiselpumpe unter Verwendung der EIF-Methode

Thilo Michels¹, Otto von Estorff², Marian Markiewicz³

¹ Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail: michels@novicos.de

² Institut für Modellierung und Berechnung, TU HH, 21073 Hamburg, E-Mail: estorff@tu-harburg.de

³ Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail: markiewicz@novicos.de

Einleitung

Im Rahmen einer Strömungsberechnung ist die Analyse des strömungakustischen Schalls sehr kostenintensiv, da die Strömungsberechnung sehr fein aufgelöst sein muss, um die akustischen Effekte zu erfassen. Zur Reduktion dieses Aufwands werden die akustischen Quellen meist mittels akustischer Analogien aus vereinfachten Strömungsberechnungen (RANS) abgeleitet. Die sich anschließende Analyse des Schalls erfolgt dann anhand der linearisierten Wellengleichung im Frequenzbereich. Eine weitere Möglichkeit bietet das EIF Verfahren (Expansion about Incompressible Flow), in der Formulierung von Shen und Soerensen [1,2]. Basierend auf der Lösung einer inkompressiblen Strömung wird in diesem Ansatz die als kompressibel und spannungsfrei betrachtete Akustik mit einem nichtlinearen Gleichungssystem beschrieben. Da sowohl die Ableitung der akustischen Quellen als auch die Berechnung der Schallausbreitung im Zeitbereich erfolgt, eignet sich dieses Verfahren für höhere Machzahlen. Die EIF Methode wurde in der Finiten Volumen Formulierung für dreidimensionale Anwendungen umgesetzt. In dem vorliegenden Beitrag wird dieses Verfahren erläutert und an verschiedenen Beispielen veranschaulicht.

Die EIF Methode in der Finiten Volumen Formulierung

Bei der EIF-Formulierung wird die Akustik als Störung einer inkompressiblen, viskosen Strömung betrachtet. Dadurch ist es möglich, zwei Gleichungssysteme für den Fluidbereich aufzustellen. Ein Gleichungssystem beschreibt die Druck- und Geschwindigkeitsfelder (P und U) der inkompressiblen und viskosen Strömung. Das zweite Gleichungssystem beschreibt das Verhalten der kleinen akustischen Störungen ρ' , p' und u_i' . Die Gesamtströmung wird durch die Summe des Strömungsfeldes und des akustischen Feldes beschrieben. Nach der Trennung der Feldgrößen, ergibt sich ein nichtlineares Gleichungssystem, mit dem die Ausbreitung der Strömungsinduzierten akustischen Welle berechnet werden kann. Dieses Gleichungssystem wurde u.a. in [2] für die Finite Differenzen Methode entwickelt. Da diese Formulierung auf einfache Geometrien limitiert ist, wurde der EIF Ansatz in die Finite Volumen Formulierung übertragen. Dieses Gleichungssystem lautet:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho' d\Omega + \int_S \bar{f} \cdot \bar{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} f_i d\Omega + \int_S f_i (U_j + u_j') \cdot \bar{n} dS + \dots \\ \dots + \int_S (\rho_0 U_i) u_i' \cdot \bar{n} dS + \int_S p' \cdot \bar{e} \cdot \bar{n} dS = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} p' d\Omega + c^2 \int_S \bar{f} \cdot \bar{n} dS = - \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} P d\Omega \quad (3)$$

mit

$$f_i = (\rho_o + \rho') \cdot u_i' + \rho' \cdot U_i; \quad c^2 = \frac{\gamma P}{\rho} \quad \text{bzw} \quad c^2 = \frac{K}{\rho} \quad (4)$$

c ist die Schallgeschwindigkeit, γ der Adiabatenexponent und K der Kompressionsmodul. Je nach den Stoffeigenschaften des Fluids kann die Schallgeschwindigkeit mittels des Adiabatenexponenten oder des Kompressionsmoduls bestimmt werden. Bei dem Gleichungssystem ist hervorzuheben, dass die akustische Quelle durch die rechte Seite der Gleichung (3) beschrieben wird. Die Vorgehensweise bei der Berechnung ist u.a. in [4] beschrieben. Die Nichtlinearitäten sind über die Geschwindigkeiten und über die variablen Schallgeschwindigkeiten in dem Gleichungssystem enthalten. Letztere verursachen eine schnellere Schallausbreitung des Schalls bei hohen Amplituden. Dadurch entstehen höhere Frequenzinhalte im Feld. Dies ist in Abbildung 1 im Vergleich zu einer linearen Wellenausbreitung dargestellt.

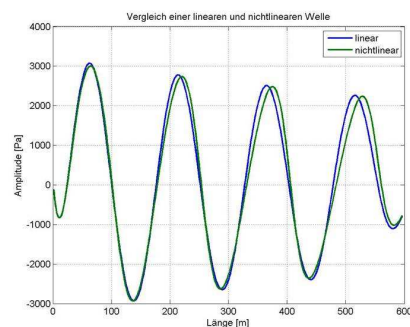


Abbildung 1: Einfluss der Nichtlinearität durch eine veränderliche Schallgeschwindigkeit.

Implementierung

Das beschriebene Verfahren wurde in der Finiten Volumen Formulierung implementiert, wobei eine lineare Interpolation zwischen den Zellen umgesetzt wurde. Zudem wurde ein implizites Eulerverfahren für die Zeitintegration umgesetzt. Die schallharte Randbedingung wurde über

$$\vec{u}' \cdot \vec{n} = 0, \quad (5)$$

die reflektionsfreien Randbedingung mittels

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho' c' \frac{\partial u'}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

vorgeschrieben.

Berechnungen

Mit dem implementierten Verfahren wurden verschiedene Testrechnungen durchgeführt. Diese sind bereits in [4] veröffentlicht und werden hier kurz zusammengefasst. Das Verfahren wurde zunächst an Hand eines sich ausbreitenden zweidimensionalen Druckimpulses getestet. Der Impuls wird zum Zeitpunkt $t=0$ wie folgt beschrieben:

$$u' = v' = 0, \quad p' = \rho' \varepsilon e^{-\alpha^2} \quad (7)$$

Die Analytische Lösung dieser Verteilung kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden.

$$p(x, y, t) = \frac{\varepsilon}{2\alpha} \int_0^\infty e^{-\xi^2/4\alpha} \cdot \cos(\xi t) J_0(\xi \eta) \xi d\xi \quad (8)$$

Für die Untersuchung der Stabilität des Verfahrens wurde die Ausbreitung eines Impulses in einem rechteckigen Feld berechnet. In Abbildung 2 ist der relative Fehler in diesem System nach einer Berechnungszeit von 0,01 s über der Anzahl der Elemente innerhalb des Anfangsimpulses aufgetragen. Die Zeitschrittweite der Akustikberechnung wurde entsprechend der Courant Zahl. von 0,8 angepasst.

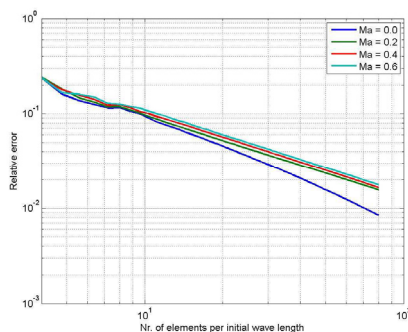


Abbildung 2: Relativer Fehler bei der Ausbreitung eines Druckimpulses.

Als weitere Berechnung wurde eine Heizungsumwälzpumpe der Firma Wilo berechnet. Das Strömungsfeld wurde mit dem Solver3d der TU-München berechnet, siehe [3]. Das Druckfeld aus der Pumpe ist in Abbildung 3 dargestellt.

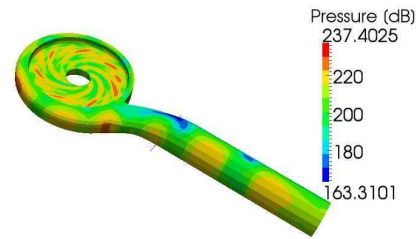


Abbildung 3: Schalldruck in der Pumpe

Das akustische Feld wurde im Ausströmrohr mit einer Messung verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

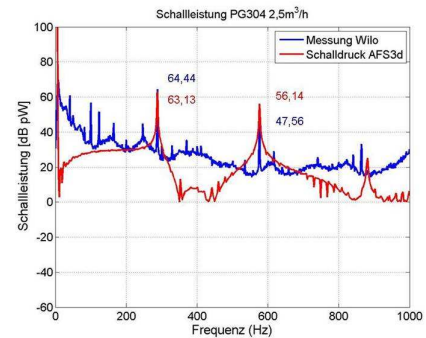


Abbildung 4: Schalldruck in der Pumpe

Diese Kurven zeigen eine gute Übereinstimmung, besonders im Bereich der ersten Blattharmonischen bei 280 Hz, wo ein Unterschied von 1.31 dB zwischen beiden Kurven herrscht. Bei der zweiten Blattharmonischen ist dieser Unterschied mit nahezu 10 dB deutlich größer, was noch nicht zufrieden stellend ist.

Zusammenfassung

Die für die Finite Volumen Formulierung weiterentwickelte EIF - Methode bietet die Möglichkeit, das akustische Feld von industriellen Anwendungen im Zeitbereich aufzulösen. Dabei kann die Genauigkeit des Verfahrens über eine ausreichend feine Diskretisierung realisiert werden.

Literatur

- [1] W. Z. Shen, J. N. Sørensen, Comment on the Acoustic Formulation of Hardin and Pope, AIAA Journal, Vol 37, No 1, January 1999
- [2] W. Z. Shen, J. N. Sørensen, Aeroacoustic Modelling of Low-Speed Flows, Fluid Mechanics Energy Engineering, Technical University of Denmark
- [3] B. Flur, A. Jantzen, T. Michels, R. Schilling, O. von Estorff: Abschluss zum Teilprojekt II „Numerische Simulation der Schallentstehung und Schallausbreitung in Kreiselpumpen“, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15849N
- [4] T. Michels, M. Markiewicz, O. von Estorff, Sound Generation and Propagation in a Centrifugal Pump with the Finite Volume EIF-Approach, ASME Turbo Expo, Conference Proceedings, 2012