

Zur Simulation der Strömungsgeräusche einer Kreiselpumpe

O. von Estorff¹, B. Flurl², A. Jantzen², M. Markiewicz³, T. Michels¹, R. Schilling²

¹Institut für Modellierung und Berechnung - TU Hamburg-Harburg

²Lehrstuhl für Fluidmechanik - TU München

³Novicos GmbH - Hamburg

Einleitung

Der typische Ausgangspunkt einer numerischen Simulation der Schallabstrahlung einer geschlossenen Kreiselpumpe ist die CFD-Berechnung der Strömung innerhalb der Pumpe. Über eine Fluid-Struktur-Kopplung werden zunächst die auf das Gehäuse wirkenden Kräfte als Randbedingungen für eine Strukturberechnung verwendet. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Schwingungen an der Oberfläche des Gehäuses, aus denen dann die Schallschnellen abgeleitet werden. Über eine FEM oder BEM Berechnung kann im letzten Schritt das Schallfeld an einem beliebigen Punkt ausgewertet werden. Im Bereich der Strömung werden zudem oftmals über entsprechende Analogien akustische Quellen aus der CFD-Berechnung abgeleitet. Aus diesen wird in einer Nachlaufrechnung das akustische Feld in einem ruhenden Fluid berechnet.

Die letztgenannte Möglichkeit, den Strömungslärm mit Hilfe von Ersatzschallquellen zu berechnen, hat den Nachteil, dass weder der direkte Einfluss der Strömung auf die Akustik, noch der Schalldurchgang durch die Struktur berücksichtigt werden kann. In dem vorliegenden Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit der diese Effekte berücksichtigt werden. Diese Methode basiert auf den Arbeiten von Hardin und Pope sowie Shen und Soerensen und wird als Expansion about Incompressible Flow (EIF) bezeichnet ([1] und [2]).

Die EIF Methode

Bei der EIF-Methode 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 setzt sich damit wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} p &= P + p' \\ u_i &= U_i + u_i' \\ \rho &= \rho_0 + \rho' \end{aligned} \quad (1)$$

Nach der Trennung der Feldgrößen ergibt sich ein nichtlineares Gleichungssystem, mit dem die Ausbreitung der Strömungsinduzierten akustischen Wellen berechnet werden kann. Man erhält:

$$\frac{\partial(\rho')}{\partial t} + \frac{\partial(f_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(f_i)}{\partial t} + \frac{\partial(f_i \cdot u_j + \rho_0 \cdot U_i \cdot u_j + p' \cdot \delta_{ij})}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(p')}{\partial t} + c^2 \cdot \frac{\partial(f_i)}{\partial x_i} = - \frac{\partial(P)}{\partial t} \quad (5)$$

mit

$$f_i = (\rho_0 + \rho') \cdot u_i' + \rho' \cdot U_i \quad ; \quad c^2 = \frac{\mathcal{N}}{\rho} \quad (6)$$

Hier ist c die Schallgeschwindigkeit und γ der Adiabatenexponent. Bei dem Gleichungssystem ist hervorzuheben, dass die akustische Quelle durch die rechte Seite der Gleichung (5) beschrieben wird. Die Gleichungen (3) bis (5) werden für die Finite-Volumen-Formulierung in eine Integralform überführt und in jedem Zeitschritt für jede Zelle gelöst. Die Vorgehensweise ist u.a. in [4] beschrieben.

Strömungs- und Strukturberechnung

Für die Strömungs- und Strukturberechnung wird das Integrated Design System (IDS) der TU München verwendet. Dieses umfasst neben der Grafischen Benutzeroberfläche für Pre- und Postprocessing einen Finite Volumen Struktur- und Strömungslöser (NS3D) und bietet somit alle Elemente, die für die Berechnung von Turbomaschinen erforderlich sind.

Das blockstrukturierte, mittels MPI parallelisierte Verfahren löst die mit einer Genauigkeit 2. Ordnung diskretisierten und linearisierten Erhaltungsgleichungen mit dem PISO bzw. SIMPLE Druckkorrekturverfahren.

Die Fluid-Struktur-Kopplung ist so formuliert, dass eine Anregung entweder nur durch die Strömung, nur durch den Schalldruck oder durch die Summe beider Feldgrößen erfolgen kann. Auf diese Weise ist es möglich, den Einfluss der Strömung und der Akustik auf das äußere Feld zu untersuchen. Für die Strukturberechnung sind linear elastische, als auch geometrisch nichtlineare Materialgesetze hinterlegt.

Akustische Übertragungsfunktionen

Die Schallabstrahlung eines Pumpengehäuses wird durch die Schwingung seiner Oberfläche bestimmt. Mit Hilfe von akustischen Übertragungsfunktionen (ATF) lässt sich der frequenzabhängige Einfluss der Oberflächenschnelle in

einzelnen Boundary Elementen auf den Schalldruck in einem Feldpunkt beschreiben. Dabei sind die ATFs nur von der Form der Struktur und der Lage des Feldpunktes abhängig, womit eine sehr effiziente Auswertung verschiedener Lastfälle möglich ist. Anstelle einer vollständigen BEM Analyse ist lediglich eine Multiplikation der Schallschnellen mit den Übertragungsfunktionen erforderlich, siehe [3]:

$$p_{fp}(f) = [ATF(f)]\{v_n(f)\} \quad (7)$$

Es sei bemerkt, dass die aus der Strukturberechnung ermittelten Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe in Normalengeschwindigkeiten umzuwandeln und mittels einer Fourier-Transformation in den Frequenzbereich zu überführen sind.

Pumpenberechnung

Mit den vorgestellten Berechnungsverfahren wird im Folgenden die Berechnung einer Kreiselpumpe diskutiert. Die Untersuchung des akustischen Feldes im Fluid wurde dabei zunächst auf den Bereich des Laufrades beschränkt. Die Diskretisierung in diesem Gebiet erfolgte nach **Bild 1**.

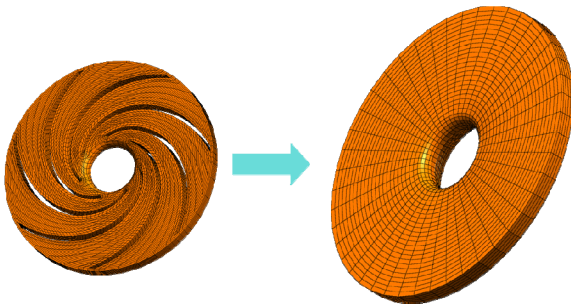


Bild 1: Vernetzung im Bereich des Laufrades. Links für die Strömungsberechnung, rechts für die Akustikberechnung

Die Berechnung der Akustik kann auf einem größeren Netz erfolgen, da die Akustikprozesse andere Längenskalen benötigen als beispielsweise Wirbel der Strömung. Die Strömung in dem Bereich des Laufrades muss jedoch von einem rotierenden Netz auf ein ortsfestes Akustiknetz übertragen werden. Das sich daraus ergebende akustische Feld ist in **Bild 2** dargestellt.

Über die Fluid-Struktur-Kopplung werden die in der Strömungs- und Akustikberechnung ermittelten Drücke als Randbedingung auf die Strukturberechnung aufgebracht, anschließend werden die Schallschnellen aus der Schwingung der Strukturoberfläche abgeleitet und auf ein akustisches Struktur-Hüllnetz übertragen. Mittels der beschriebenen BEM-Analyse mit Übertragungsfunktionen kann das Schallfeld auf einer beliebigen Auswertefläche dargestellt werden. In **Bild 3** ist beispielhaft eine Auswertung dargestellt.

Zusammenfassung

Es wurde ein Weg aufgezeigt, wie mit einer geschlossenen Formulierung, welche die Strömungs-, die Akustik- und die Strukturberechnung beinhaltet, und einer anschließenden BEM-Berechnung eine effiziente Analyse der Schallabstrah-

lung einer Kreiselpumpe möglich ist. Dabei wurde die EIF-Methode für die Strömungs- und Akustikberechnung verwendet, die Schallabstrahlung wurde mit akustischen Übertragungsfunktionen ermittelt.

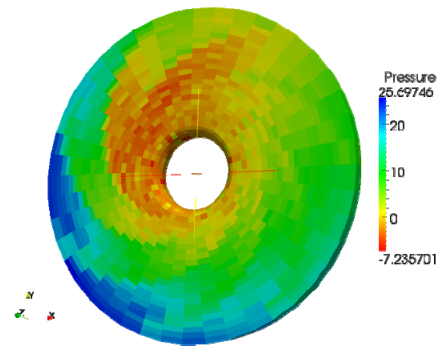


Bild 2: Akustisches Feld im Bereich der rotierenden Beschauflung einer Wilo PG304 nach 20 Zeitschritten

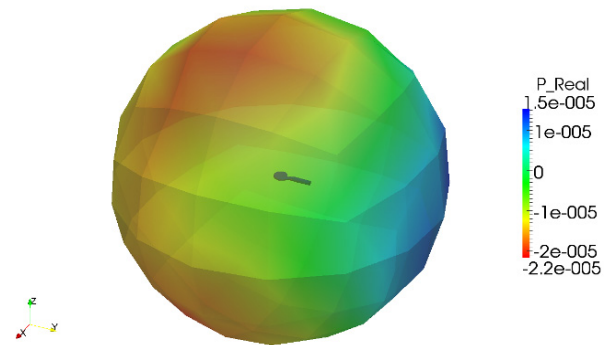


Bild 3: Realteil des akustischen Druckfeldes einer Kreiselpumpe bei 2100 Hz.

Danksagung

Das Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) unter der Projektnummer 15849 N gefördert.

Die Autoren danken an dieser Stelle für die Unterstützung ihrer Forschungsarbeiten.

Literatur

- [1] W. Z. Shen, J. N. Sørensen, Aeroacoustic Modelling of Low-Speed Flows, Fluid Mechanics Energy Engineering, Technical University of Denmark
- [2] W. Z. Shen, J. N. Sørensen, Comment on the Aeroacoustic Formulation of Hardin and Pope (1999), AIAA Journal Vol. 37, No. 1
- [3] von Estorff, O., Markiewicz, M., May, R.J., Zaleski, O.: Sound Radiation of a Gear Box Using Acoustic Transfer Functions, Tagungsband der DAGA 2004, Strassburg, 3-4.
- [4] von Estorff, O. Markiewicz, M., Michels, T.: Sound Generation and Propagation with the Nonlinear EIF-

Approach, Tagungsband der NAG/DAGA 2009, Rotterdam, 721-722