

Möglichkeiten und Grenzen numerischer Strömungsakustik mit OpenFOAM

Andreas Stein¹, Peter F. Pelz¹

¹ *Institut für Fluidsystemtechnik, 64289 Darmstadt, Deutschland, Email: andreas.stein@fst.tu-darmstadt.de*

Einleitung

Das Open Source Toolkit OpenFOAM hat sich in den letzten Jahren zu einer interessanten Alternative zu kommerziellen Strömungslösern entwickelt. Technische Strömungen aus verschiedensten Anwendungsbereichen (Aerodynamik, Turbomaschinen, Mehrphasenströmungen, ...) lassen sich mit der Software berechnen und auswerten. Bei der numerischen Berechnung von Strömungsschall stößt das Programmpaket jedoch an Grenzen, insbesondere bei den vorhandenen Diskretisierungsverfahren für die numerische Berechnung der Schallausbreitung. Dieser Beitrag zeigt Möglichkeiten und Grenzen auf, Strömungsschall mit OpenFOAM zu berechnen.

Numerische Berechnung von Strömungsschall

Während die Simulation von technischen Strömungen im industriellen Einsatz schon sehr etabliert und vergleichsweise ausgereift ist, ist die Simulation von strömungsinduziertem Schall eine relativ junge Disziplin und noch nicht weit verbreitet. Der Bedarf an numerischen Verfahren, mit denen bereits im Entwurfsprozess ein akustisches Profil einer Strömung berechnet werden kann ist hingegen unstrittig.

Die meisten Methoden zur Berechnung von Strömungsschall basieren auf einem zweistufigen (hybriden) Simulationsansatz. In einem ersten Schritt wird eine instationäre Strömungssimulation durchgeführt, der zweite Schritt ist die Berechnung der Schallausbreitung innerhalb der Strömung bzw. ins Fernfeld. Seitens der Strömungssimulation wird zwischen turbulenzsimulierenden und turbulenzmodellierenden numerischen Verfahren unterschieden. Bei turbulenzsimulierenden Verfahren wird die Turbulenz der Strömung im Wesentlichen durch die Diskretisierung aufgelöst (LES, DES), bei turbulenzmodellierenden Verfahren (RANS) werden die Turbulenzskalen modelliert. Turbulenzsimulierende Verfahren sind wesentlich näher an der physikalischen Realität und damit grundsätzlich erstrebenswert. Die Anwendung auf technische Probleme ist jedoch nur für relativ geringe Reynoldszahlen möglich. Diese Problematik wurde von Delfs in [1] erläutert.

Instationäre Simulationen als Schallquelle

In OpenFOAM ist bereits eine Vielzahl numerischer Berechnungsverfahren zur instationären Simulation von Strömungen implementiert (DNS, LES, DES). Prinzipiell ist es somit einfach möglich, mit OpenFOAM

AM erstellte Simulationsergebnisse zur Berechnung von strömungsinduziertem Schall zu verwenden. Wie oben dargestellt ist es der numerische Aufwand, der dieser Anwendung enge Grenzen setzt. Bei niedrigen Reynoldszahlen hingegen ist OpenFOAM hervorragend dazu geeignet die Quellterme für eine akustische Berechnung durch instationäre Simulationen zu generieren. Die gute Parallelisierbarkeit bei Freiheit von Lizenzkosten ermöglicht kostengünstige Simulationen, entsprechende Hardware vorausgesetzt. Diese Möglichkeit zur Generierung der akustischen Quellen wurde bereits in verschiedenen Forschungsprojekten eingesetzt, z.B. von Kapa [2].

Stochastische Schallquellen

Der in [1] dargestellte Weg zur Generierung von instationärer Turbulenz auf Basis von RANS-Simulationen ist ebenfalls mit OpenFOAM möglich, wenn auch aktuell keine Implementierungen frei verfügbar sind. Wang [3] hat eine Variante des SNGR-Verfahrens (Statistical Noise Generation and Radiation) in OpenFOAM implementiert und an einem Freistrahler validiert. Eine Abwandlung der in [1] dargestellten RPM-Methode, die sog. ESDF (Eulerian Solenoidal Digital Filter) Methode wurde von Cozza [4] in OpenFOAM umgesetzt. Cozza hat seine Implementation verwendet, um das akustische Nah- und Fernfeld verschiedener NACA Profile zu berechnen.

Eignung als Löser der linearisierten Eulergleichungen

Während die Generierung von Schallquellen mittels OpenFOAM eher eine Frage der Implementierung ist, gilt dies nicht für die Berechnung der Schallausbreitung. Allgemeine Diskretisierungsverfahren für CFD, wie sie in OpenFOAM implementiert sind, sind für die Berechnung der Schallausbreitung nicht optimal geeignet. Um dies zu untersuchen, wurde ein Löser für die linearisierten Eulergleichungen für OpenFOAM implementiert, welcher die üblichen Diskretisierungsschemata für CFD-Berechnungen verwendet. Als Testfall wurde die bereits von Tam [5] in ähnlicher Form betrachtete Ausbreitung eines Gauss'schen Pulses berechnet, jedoch ohne einen konvektiven Term. Tam hat für die Lösung der linearisierten Eulergleichungen (LEEs) ein Finite Differenzen Verfahren 4. Ordnung vorgeschlagen. Dieses Verfahren ist heute in der Strömungsakustik vielfach eingesetzt und erprobt. Zunächst wurde für die Berechnungen in OpenFOAM die zu dem Testfall von Tam identische Auflösung von 200x200 Elementen verwendet. Verschiedene Diskretisierungsschemata von OpenFOAM wurden verwendet, darunter TVD-Schemes mit Flux Limitern. Alle Größen

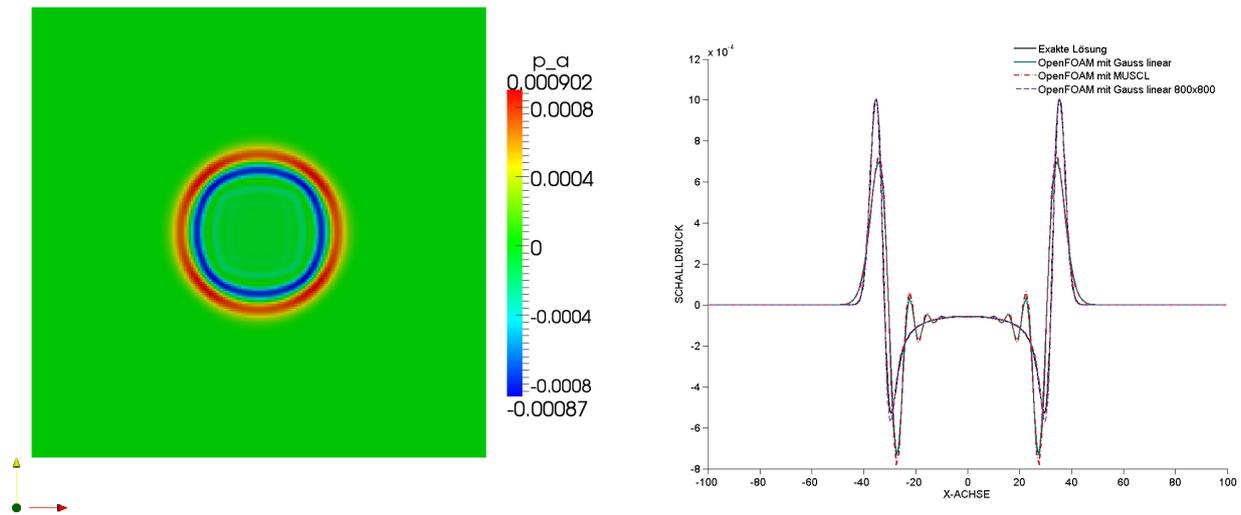


Abbildung 1: Schalldruck eines Gauss Pulses bei $t=0.1$. Contourplot (links), Werte über X-Achse (rechts)

sind analog zu [5] entdimensioniert.

Abbildung 1 (rechts) zeigt den Schalldruck über die X-Achse des 2D-Problems zum Zeitpunkt $t=0.1$. Es ist erkennbar, dass die numerisch bedingten Schwingungen je nach verwendetem Diskretisierungsschema kleiner ausfallen, die Abweichungen gegenüber der exakten Lösung sind aber für alle Schemata sehr groß. Erst eine Verfeinerung der räumlichen Diskretisierung auf 800×800 Elemente erzeugt eine Lösung, die mit der Lösungsqualität des von Tam vorgeschlagenen Verfahrens vergleichbar ist. Dies zeigt, dass es zwar möglich ist, die LEEs mit OpenFOAM zu lösen, der numerische Aufwand jedoch ungleich höher ist. Die Berechnung der Schallausbreitung führt (für spätere Zeitschritte) zu weiteren Fehlern, die nicht durch eine feinere Diskretisierung behoben werden können. Oshima [6] zeigt ähnliche, durch Dissipation und Dispersion der numerischen Verfahren begründete Probleme bei der Berechnung der Ausbreitung von Schallwellen auf.

Akustische Randbedingungen

Die Mehrzahl der Forschungsprojekte, welche sich mit strömungsinduziertem Schall beschäftigen, untersuchen Außenströmungen mit einer Schallabstrahlung ins Fernfeld. Um solche Probleme numerisch zu untersuchen, werden geeignete Randbedingungen benötigt, welche nur einen sehr kleinen Teil der Wellenenergie wieder in das Innere des Rechengebiets reflektieren [5]. Solche Randbedingungen sind in OpenFOAM ebenfalls aktuell nicht verfügbar, es finden jedoch Arbeiten in diese Richtung an anderen Forschungseinrichtungen statt.

Bewertung

Die Berechnung der Schallausbreitung ist mit OpenFOAM nur begrenzt möglich, da die verfügbaren numerischen Verfahren auf Strömungssimulation ausgelegt sind. Dennoch ist OpenFOAM hervorragend dazu geeignet, einen Teil der Prozesskette zur Berechnung von

Strömungsschall abzudecken. Dies ist neben der Berechnung akustischer Analogien zum einen die Durchführung instationärer Simulationen (DES, LES), zum anderen die Berechnung stochastisch generierter Quellen. Am Institut für Fluidsystemtechnik werden weitere Arbeiten stattfinden, bei denen OpenFOAM zur Berechnung stochastischer Quellterme verwendet wird. Weitere Implementierungen zur Berechnung stochastischer Quellterme werden folgen. Die Simulationen werden mit eigenen Messungen am Akustikprüfstand des Instituts validiert. Für die Berechnung der Schallausbreitung wird zunächst auf den vielfach validierten Solver PIANO (DLR, Braunschweig) zurückgegriffen. Diese Ergebnisse sollen mit dem OpenFOAM LEE-Löser verglichen werden.

Literatur

- [1] DELFS, Jan: Strömungsgeräusche - Beschreibung und Minderung mittels numerischer und experimenteller Simulation. In: *DAGA 2011*, S. 21–31
- [2] KAPA, Lilla: *Numerical prediction of noise production and propagation*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Dissertation, 2011
- [3] WANG, Qin ; PELZ, Peter F. ; MATYSCHOK, Berthold: Synthetisierung von Schallquellen mittels OpenFOAM. In: *DAGA 2011*, S. 893–895
- [4] COZZA, Ivan F.: *Development of Numerical Methods for Broadband Airfoil Noise Problems*, Politecnico di Torino, Dissertation, 2011
- [5] TAM, C.K.W. ; WEBB, J.C.: Dispersion-relation-preserving finite difference schemes for computational acoustics. In: *Journal of computational physics* 107 (1993), Nr. 2, S. 262–281
- [6] OSHIMA, Takuya ; IMANO, Masashi: A full finite-volume time-domain approach towards general-purpose code development for sound propagation prediction with unstructured mesh. In: *Inter-Noise 2008* Bd. 2008