

Vergleich von LBM und DES zur Simulation der Tonerzeugung bei Flöten

Helmut Kühnelt¹, Christoph Reichl²

¹ Institut für Musikalische Akustik (IWK), Universität f. Musik Wien, 1010 Wien, Österreich, email: Kuehnelt@mdw.ac.at

² arsenal research - Austrian Research Centers, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich, email: Christoph.Reichl@arsenal.ac.at

Einleitung

Die Tonerzeugung bei Flöteninstrumenten und labialen Orgelpfeifen ist durch die strömungs-akustische Wechselwirkung von Luftstrahl und akustischem Feld der stehenden Welle im Instrument bestimmt. Dabei kann der Luftstrahl als inkompressibles Wirbelfeld charakterisiert werden und das akustische Schnellefeld als kompressibles Potentialfeld. Im Mund des Instruments besitzen diese beiden Felder Geschwindigkeiten von ähnlicher Größenordnung, wodurch es zu einem Energietransfer kommt, der netto Schall produziert. Zur Simulation der Tonerzeugung in Flöten mit Hilfe von CFD müssen die verwendeten Algorithmen in der Lage sein 1) das Strömungsfeld des Luftstrahls mit Geschwindigkeiten, die klein sind im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit, 2) die Schallausbreitung und 3) die Erzeugung von Schall durch Wirbel-Schall-Wechselwirkung zu beschreiben.

In diesem Beitrag sollen zwei grundsätzlich unterschiedliche Simulationsalgorithmen miteinander verglichen werden: Die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) und die Detached-Eddy-Simulation (DES).

Simulationsmethoden

Lattice-Boltzmann-Methode (LBM)

Im Gegensatz zu konventionellen CFD-Methoden, die die Strömungsgleichungen direkt diskretisieren, nützt der Lattice Boltzmann Ansatz die intrinsische Verbindung zwischen kinetischer Theorie und den Kontinuumsgleichungen. Dies erlaubt den Wechsel von den nichtlinearen Navier-Stokes Gleichungen zur semilinearen Boltzmann-Gleichung. Dies bringt allerdings mit sich, daß bei der LB-Gleichung ein wesentlich größerer Satz von Unbekannten, die mesoskopischen Verteilungsdichten, berechnet werden muß, aus denen die makroskopischen Feldgrößen Dichte, Druck und Geschwindigkeit durch Mittelung erhalten werden. Die LBM löst die Strömungsgleichungen eines isothermen, kompressiblen, viskosen idealen Fluids für niedere Machzahlen. Basiert die räumliche Diskretisierung auf einem isotropen kubischen Gitter, so kann man die numerische Dämpfung analytisch ausdrücken und so die LBM (zumindest bis zur quadratischen Ordnung in der Wellenzahl k) frei von numerischer Dämpfung machen. Daher ist die LBM geeignet zur Berechnung von schwachen strömungs-akustischen Wechselwirkungen, wie sie bei der Tonerzeugung von Flöten auftreten.

Detached-Eddy-Simulation (DES)

Die Detached Eddy Simulation kombiniert RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) in Wandnähe mit den Vorteilen der LES (Large Eddy Simulation) für die Simulation turbulenter Vorgänge. Sie wird vor allem für jene Anwendungen einge-

setzt, wo die klassische LES wegen zu hohen Reynoldszahlen zu einer unerschwinglichen Zellzahl führen würde. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde die Wandbehandlung mit dem Spallart Allmaras Modell durchgeführt.

Die räumliche Diskretisierung erfolgte mittels zentraler Differenzen, zeitlich wurden die Differentialgleichungen implizit in zweiter Ordnung gelöst. Ein Zeitschritt von $10 \mu\text{s}$ und eine innere Iterationszahl von 20 Iterationen / Zeitschritt wurden gewählt. Die Lösung des Differentialgleichungssystems erfolgte mit dem kommerziellen Code Fluent.

Geometrie, Randbedingungen und Simulationsparameter

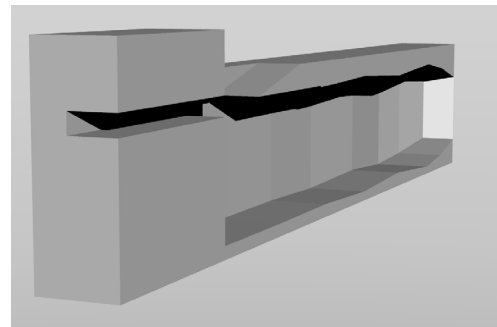


Abbildung 1: Schnitt durch die Simulationsgeometrie. Der Messurverlauf dient zur Verstärkung höherer Harmonischer.

Tabelle 1: Simulationsparameter

	LBM	DES
Ortsauflösung	0.175 mm, fix	0.175 mm, feiner im Bereich des Labiums, gröber an Fernfeld-RB
Zeitschritt	$2.9 \cdot 10^{-7}$ s	10^{-5} s
Einlaßzeit	1.48 ms	1.48 ms
Randbedingungen: Einlaß / Auslaß	Massenfluß / nicht reflektierend	Massenfluß / Fernfeld-RB
Windkanalhöhe	effektiv 1.4 mm (wegen Diskretisierung der Geometrie)	1.5 mm
Strahlgeschwindigkeit am Austritt	29.6 m/s	33 m/s

Vergleich

Zum Vergleich der beiden Methoden wurden Schnitte durch die Symmetrie (x - z Ebene) gelegt und der Druck an mehreren Monitorpunkte innerhalb und außerhalb des Resonators aufgezeichnet.

Einschwingvorgang

Abb. 2 zeigt das Einschwingverhalten. Die Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal haben zur Folge, dass der Strahl leicht zeitversetzt auf das Labium trifft. In der untersten Reihe ist die Aufspaltung des Strahls deutlich zu sehen. Außerdem ergeben sich dadurch unterschiedliche Grundfrequenzen: 1190 Hz bei 29.6 m/s (LBM) und 1252 Hz bei 33 m/s (DES). Abb.3 zeigt den Druck am Monitorpunkt 5 mm vor dem gedackten Resonatorende.

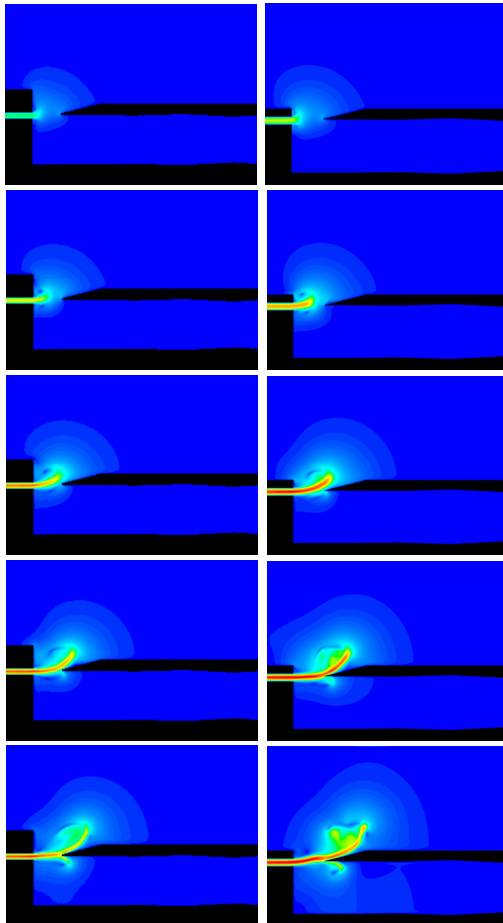


Abbildung 2: Betrag der Geschwindigkeit (0-30 m/s) bei LBM (links) und DES (rechts). Zwischen zwei Zeilen liegen jeweils 35 μ s.

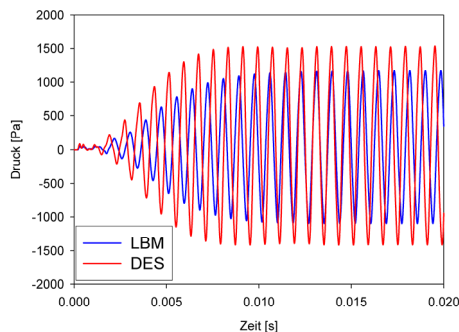


Abbildung 3: Drucksignal 5 mm vor dem gedackten Ende des Resonators

Stationärer Zustand

In Abb. 4 werden Geschwindigkeitsbetrag und Wirbelstärke für jene Phasenlage verglichen, bei der der Strahl maximal nach oben ausgelenkt ist. Während der Winkel der Strahlab-

lenkung in den beiden Methoden unterschiedlich ist, lassen sich einzelne Strukturelemente in beiden Simulationen finden. Dabei treten in der LB-Simulation kohärente Strukturen stärker auf als in der DES.

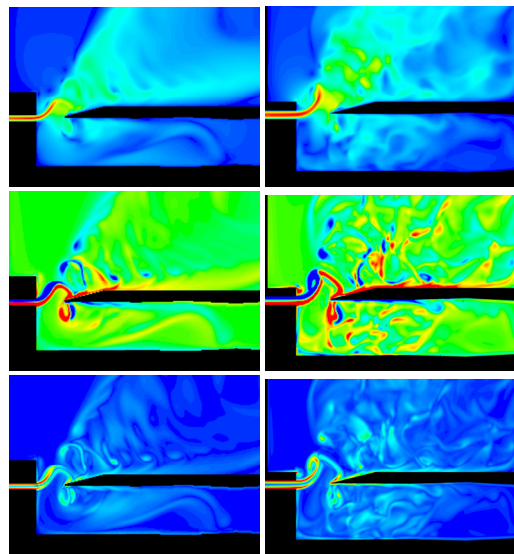


Abbildung 4: Oben: Geschwindigkeitsbetrag (0 – 30 m/s), Mitte: y-Komponente der Wirbelstärke (-10000 bis +10000 1/s), unten: Betrag der Wirbelstärke (0 – 30000 1/s). Die linke Spalte zeigt Ergebnisse der LBM, die rechte der DES.

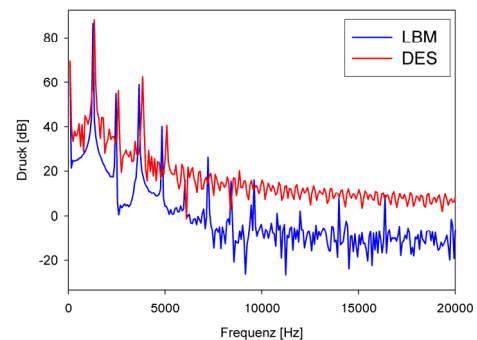


Abbildung 5: Spektrum des Schalldrucks am Monitorpunkt 5 mm vor dem gedackten Ende

Abb. 5 zeigt die Fourier-Transformierte von 16 Perioden des Drucks am Monitorpunkt im eingeschwungenen Zustand. Dabei beträgt der SPL bei der LBM 152.3 dB und bei der DES 154.2 dB (siehe auch Abb. 3). Die Amplituden der ersten 4 Harmonischen zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung zwischen LBM und DES. Die DES dämpft netz- und zeitschrittbedingt Frequenzen oberhalb von 5 kHz.

Zusammenfassung

Zwei konzeptuell völlig verschiedene Verfahren zeigen gute Übereinstimmung im Obertonspektrum einer blockflöten-ähnlichen gedackten Pfeife. Der Unterschied im SPL lässt sich auf die verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal zurückführen. In den Wirbelfeldern treten vergleichbare Strukturen auf, wie zum Beispiel die Wirbelablösung am Labium. Die Kohärenz der abgestrahlten Wirbelfelder wird von beiden Methoden unterschiedlich abgebildet, was Gegenstand weiterführender Analysen ist.