

# Synthetisierung von Schallquellen mittels OpenFOAM

Qin Wang<sup>1</sup>, Peter F. Pelz<sup>1</sup>, Berthold Matyschok<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Fluidsystemtechnik, 64287 Darmstadt, E-Mail: [qin.wang@fst.tu-darmstadt.de](mailto:qin.wang@fst.tu-darmstadt.de); [peter.pelz@fst.tu-darmstadt.de](mailto:peter.pelz@fst.tu-darmstadt.de); [berthold.matyschok@fst.tu-darmstadt.de](mailto:berthold.matyschok@fst.tu-darmstadt.de);

## Einleitung

Die Analyse von Schallentstehung und die effiziente Schallvorhersage gewinnen im industriellen Bereich immer mehr an Bedeutung. Deshalb ist es wünschenswert, während der Entwurfsphase nicht nur aerodynamische Eigenschaften sondern auch die Schallemission vorherzusagen und danach ein Kompromiss zwischen aerodynamischen und aeroakustischen Anforderungen zu finden. Derartige Aufgaben sind allein mit experimentellen Untersuchungen aus Kostengründen nicht mehr zu leisten. In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von robusten, effizienten numerischen Berechnungsmethoden für Strömungsakustik entwickelt. Die Herausforderung besteht darin, diese Methoden der numerischen Strömungsakustik für industrielle Anwendungen nutzbar zu machen. D.h. geringe Anforderungen hinsichtlich Rechenzeit und Arbeitszeit für Pre- und Postprocessing und eine effiziente Anwendung sind anzustreben. In der Strömungsakustik werden zwei grundlegende numerische Methoden zur Schallvorhersage angewendet. Dabei handelt es sich um die sog. Direkte Numerische Simulation (DNS) und hybride Verfahren, bei welchen das Strömungsfeld und das akustische Feld getrennt voneinander berechnet werden. Das Rechengbiet wird in ein kleines Gebiet mit nichtlinearen Quelltermen, welche mit Hilfe eines geeigneten Turbulenzmodells berechnet werden können, und in ein daran nach außen anschließendes Gebiet mit akustischer Abstrahlung unterteilt (siehe Abbildung 1).

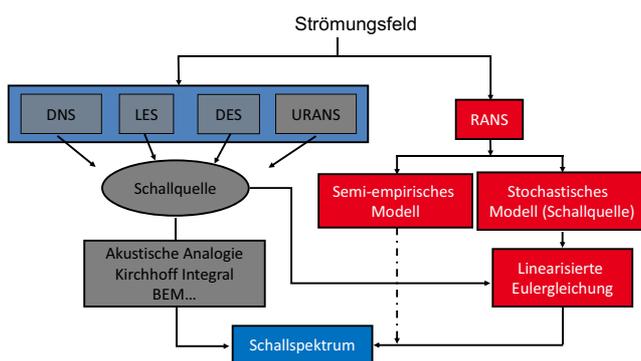


Abbildung 1: Hybride Methode

Der numerische Aufwand und die erforderlichen IT-Ressourcen für instationäre Simulationen wie Large Eddy Simulation (LES) sind sehr hoch. Es gibt Methoden und Ansätze, die auf stationären Strömungssimulationen, wie z.B. Reynolds gemittelte Navier-Stokes Gleichung (RANS), aufbauen. Zur Beschreibung der Schallquellen aus stationären Strömungsdaten ist dann ein zusätzliches Quellmodell erforderlich, wie beispielsweise das ursprünglich für Strahlärmprognosen entwickelte Stochastic Noise Generation and Ra-

diation (SNGR) Modell von Bechara et al. [1], [2]. Mit Hilfe dieser Methode kann in Verbindung mit numerischen akustischen Verfahren, der turbulenzbedingter Schall schnell vorhergesagt werden.

Grundlage des SNGR ist eine Fourierreihe, deren Summanden die Anteile der einzelnen Wellenlängen des turbulenten Geschwindigkeitsfeldes repräsentieren. Das turbulente Feld wird durch Überlagern von diskreten stochastischen Fouriermoden unter Verwendung von statistischen Eigenschaften der Turbulenz, die mit Hilfe einer RANS Simulation berechnet wird, ermittelt.

$$\vec{u}_{st}(\vec{x}, t) = 2 \sum_{n=1}^N \hat{u}_n \cos(\vec{k}_n \cdot (\vec{x} - \vec{u}_c t) + \psi_n) \vec{\sigma}_n \quad (1)$$

Die relevanten Größen sind  $u_{st}$ , die Fluktuationsgeschwindigkeit,  $N$  die Anzahl der Moden,  $\hat{u}_n$  die Geschwindigkeitsamplitude, welche vom Spektrum der kinetischen Energie abhängig ist,  $u_c$  die künstliche konvektive Geschwindigkeit.  $k_n$  beschreibt die Wellenzahlvektoren, deren Richtung zufällig gewählt ist.  $\sigma_n$  sind Einheitsvektoren, welche die Richtung der Fouriermoden festlegen. Sie stehen senkrecht auf den Wellenzahlvektoren, um die Divergenzfreiheit des Geschwindigkeitsfeldes sicherzustellen. Der Phasenwinkel  $\psi_n$  wurde zwischen 0 und  $2\pi$  zufällig bestimmt.

Aus Gleichung (1) [3] folgt für die Divergenz

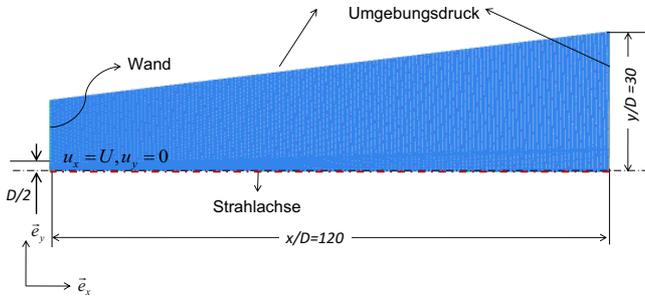
$$\text{div}(\vec{u}_{st}) = 0 \Rightarrow \vec{k}_n \cdot \vec{\sigma}_n = 0 \quad (2)$$

Von Interesse ist nicht nur der Schall im Fernfeld, sondern auch der Schall in dem von der Strömungssimulation abgedeckten Gebieten. In der Vergangenheit wurden Ansätze auf der Basis von Störgrößen für die Quellterme der Linearisierten Euler-Gleichungen (LEE) [2], [3] vorgestellt. Der wesentliche Vorteil dieser Ansätze liegt in der Möglichkeit, die Schallentstehung bzw. Ausbreitung in nicht-homogenen Strömungen und somit auch in Turbulenzgebieten berechnen zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein turbulenter Freistrahler mit einer Machzahl 0.56 als Testfall gewählt und die dabei auftretenden Schallemissionen mittels SNGR-Methode untersucht. Der Freistrahler wurde als symmetrischer 2D-Fall betrachtet. Die numerische Analyse erfolgte mit dem freien CFD-Code OpenFOAM, die Ergebnisse wurden mit Experimenten [4], [5] und [8] als auch numerischen Ergebnissen von Ahmadzadegan [6] verglichen.

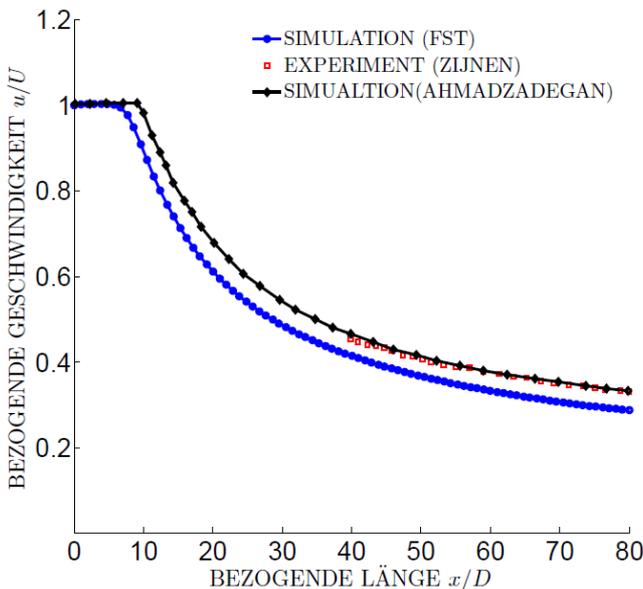
**Strömungsfeld**

Die Simulation des Strömungsfeldes eines ebenen Freistrahls mit der Machzahl 0.56 und der Düsenöffnung von  $D = 1$  mm, wurde mit Hilfe der RANS-Simulation durchgeführt. Bei dem verwendeten Turbulenzmodell handelt es sich um das Standard k-epsilon Modell. Das Rechengebiet ist eine Domäne mit der Größe  $120 D \times 30 D$  und wurde mit ca. 280000 Zellen diskretisiert (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2: Strömungsgebiet**

Inwieweit die numerische Methoden zum Verständnis der aerodynamischen Eigenschaften von Freistrahls beitragen können, wird durch Vergleiche von numerisch und experimentell ermittelten Geschwindigkeitsfeldern demonstriert. Dazu wurde zuerst die Geschwindigkeitsverteilung auf der Strahlachse betrachtet (siehe Abbildung 3).

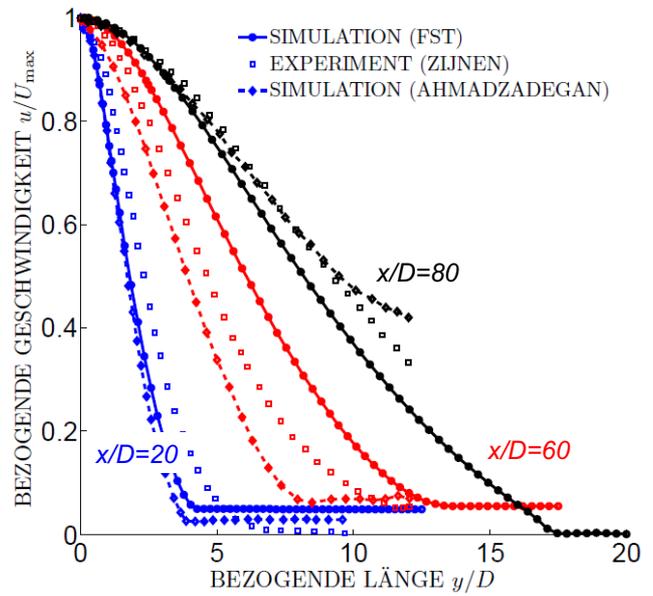


**Abbildung 3: Geschwindigkeitsprofil auf der Strahlachse**

Für einen Vergleich wurden drei Positionen ( $x/D=20, 60, 80$ ) festgelegt. Die Ergebnisse sind anschliessend mit den Resultaten des Experimentes und der Simulation von Ahmadzadegan verglichen worden (siehe Abbildung 4). Dabei ist  $U_{max}$  die jeweilige maximale Geschwindigkeit auf der Strahlachse an verschiedenen Positionen. Die numerischen Ergebnisse des Strömungsfeldes stimmen gut mit den Ergebnissen des Experimentes überein.

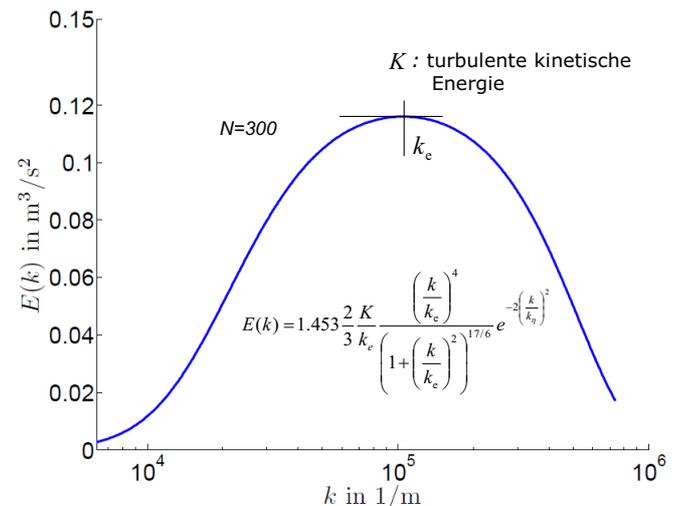
Die turbulenten Größen des Strömungsfeldes, turbulente kinetische Energie  $K$  und die Dissipationsrate  $\epsilon$ , wurden als

Eingangsgrößen für die SNGR-Methode verwendet. Das berechnete Spektrum  $E(k)$  in Abhängigkeit von Wellenzahl  $k$  und die synthetisierten turbulenten



**Abbildung 4: Geschwindigkeitsprofil an  $x/D=20, 60, 80$**

Geschwindigkeitsschwankungen sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 5: Das von Kármán Spektrum**

Hierbei ist  $k_e$  die Wellenzahl, bei der das Energiespektrum sein Maximum erreicht. Die maximale bezogene, turbulente Geschwindigkeit  $u_{st}/U$  beträgt 0.07, während Ahmadzadegan dies mit 0.045 angibt. Der Unterschied kann daraus resultieren, dass die eigene Methode die Gleichung von [3], die zwei-Punkte Korrelationen von turbulenter Geschwindigkeit beschreibt, verwendet, während Ahmadzadegan die Gleichung von [7] angewendet hat.

**Akustikfeld**

Die vorgestellte Verfahrensweise wurde auf ein weiteres Rechengebiet, das sich auf  $600 D \times 600 D$  erstreckt, erweitert und als Akustikanregung im Verlauf der Akustiksimulation mit Lösung von LEE angewendet. Darüber hinaus wurden die akustischen Signale an den Orten

$r = 120D$  und  $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$  ermittelt (siehe Abbildung 7).

### Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Geräuschquellen eines ebenen Freistrahls mit Hilfe der SNGR-Methode, die in OpenFOAM implementiert wurde, untersucht.

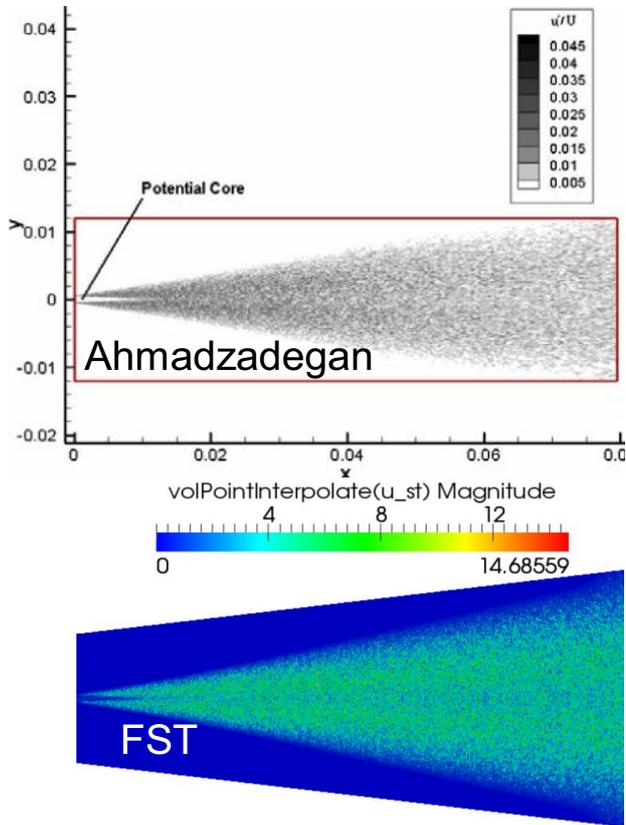


Abbildung 6: Die synthetisierte, Geschwindigkeit

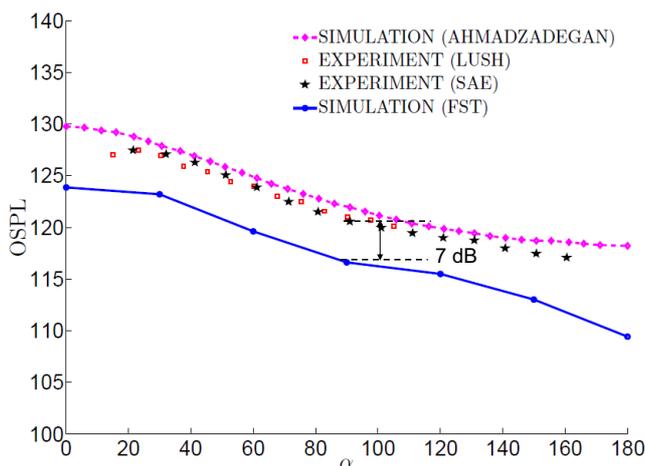


Abbildung 7: Gesamt-Schalldruckpegel am Ort  $r=120 D$

Die Berechnungen wurden 2-D symmetrisch durchgeführt, wobei zuerst eine RANS Simulation durchgeführt wurde. Basierend auf den Ergebnissen des mittleren Strömungsfeldes, wurde ein stochastisch-turbulentes Feld erzeugt und anschließend die Schallquelle generiert. Die Schallausbreitung wurde durch Lösen der LEE mit OpenFOAM berechnet. Die simulierten Ergebnisse geben die Tendenz der experimentell gewonnenen Daten wieder. Da in dieser

Arbeit nur nicht-lineare Schallquellen berücksichtigt wurden, sollen künftig auch die linearen Quellterme in der Simulation berücksichtigt werden. Weiterhin sollen auch das Energiespektrum und die Modenanzahl variiert werden. Da die Diskretisierungsverfahren in OpenFOAM bisher auf die 2. Ordnung beschränkt sind, soll künftig die Implementierung von Diskretisierungsverfahren höherer Ordnung umgesetzt werden.

### Literatur

- [1] Bechara, W., Bailly, C., Lafon, P. and Candel, S.: Stochastic Approach to Noise Modeling for Free Turbulent Flows. AIAA Journal, Vol. 32, No. 3, March 1994, pp. 455-463
- [2] Bailly, C. and Juve, D.: A Stochastic Approach to Compute Subsonic Noise Using Linearized Euler's Equations. AIAA-paper 99-1872, American Institute for Aeronautics and Astronautics, 1999
- [3] Bauer, M., Zeibig, A., Költzsch, P.: Application of the SNGR-Model to Compute Trail-ing Edge Noise. Research Report, Dresden University, 2006
- [4] Zijnen, B.G., Van Der Hagge. (1958) Measurements of the Velocity Distribution In a Plane Turbulent Jet of Air. App.Sci. Res., Sect A, Vol 7.
- [5] Lush, P. A. (1971) Measurements of Subsonic Jet Noise and Comparison with Theory, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 46, No. 3: 477-500.
- [6] Ahmadzadegan, A. and Tadjfar, M.: Combination of Lighthill Acoustic Analogy and Stochastic Turbulence Modelling for Far-Field Acoustic Prediction. 16th Australasian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza, Gold Coast, Australia 2-7 December 2007
- [7] Chunhong H., Ahmadi G., (1999) Particle deposition in a nearly developed turbulent duct flow with electrophoreses, J. Aerosol Sci. Vol. 30, No. 6: 739-758.
- [8] Society of Automotive Engineers, Gas Turbine Exhaust Noise Prediction, ARP 876C, Warrendale, PA, 1985.