Simulation des Abgasmündungsgeräuschs mit hybridem Ansatz

Florian Schwertfirm[1], Johannes Kreuzinger[1], Christof Hinterberger[2]

[1] *Kreuzinger und Manhart Turbulenz GmbH, 81675 München, Deutschland, Email: f.schwertfirm@km-turbulenz.de*

[2] *Faurecia Emissions Control Technologies, 86154 Augsburg, Deutschland*

Einleitung

Bei hohen Massenströmen kann bei KFZ-Abgasanlagen ein Mündungsgeräusch auftreten, dass durch die Interaktion der turbulenten Rohrströmung mit dem Rohrende entsteht. Wegen den relativ hohen Machzahlen (Größenordnung M=0.25) ist der Schall deutlich hörbar.

Zur Simulation des Schalls wird ein hybrider Ansatz mit inkompressibler Strömungslösung gewählt, da so die Kopplung einer periodischen Rohrströmungssimulation als Turbulenzgenerator mit dem eigentlichen Simulationsgebiet einfach möglich ist. Eine inkompressible Strömungssimulation wird allgemein bis M=0.3 als zulässig betrachtet, man bleibt knapp unter dieser Grenze. Eingesetzt wird der kombinierte Strömungs- und Akustikcode MGLET.

Da bei den auftretenden Machzahlen Konvektion des Schalls und Beugung an Grenzschichten relevant sein können, werden Simulationen ohne und mit Berücksichtigung der Konvektion durch die Strömung durchgeführt und die Ergebnisse verglichen.

Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse und damit auch die Eignung der verwendeten Ansätze wird durch den Vergleich mit Messwerten eines Benchmarks, zur Verfügung gestellt von Faurecia, beurteilt. Hier liegen Daten zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Krümmungsvarianten vor.

Testfall

Der Testfall besteht aus dem Mündungsgeräusch eines turbulent durchströmten Kreisrohres. Das Kreisrohr hatte einen Innendurchmesser von $D_i = 52mm$, wurde mit Massenströmen von $\dot{Q} = 400kg/h$, $\dot{Q} = 600kg/h$ und $\dot{Q} = 800kg/h$ beaufschlagt und in drei unterschiedlichen Rohrformen vermessen: ein gerades Rohr (*gerade*), ein Rohr mit 45^0 Krümmung ca. $3 \times D_i$ vor der Mündung (45^0-*kurz*), und ein Rohr mit 45^0 Krümmung ca. $10 \times D_i$ vor der Mündung (45^0-*lang*). Dabei befanden sich die Endrohre in einem schalltoten Raum, wurden über ein sich außerhalb befindliches Roots-Gebläse mit anschließendem Schalldämpfer und ca. 2m langer gerader Einlaufstrecke mit den entsprechenden Massenströmen versorgt (Abb. 1). Die Luft befand sich dabei auf Umgebungstemperatur ($T \approx 20^0C$) und Umgebungsluftdruck ($P \approx 1bar$). Dies resultiert in Ma-Zahlen zwischen $Ma_{Ubulk} = 0.13 - 0.25$ und Re-Zahlen zwischen $Re_{Ubulk} = 1.5 \times 10^5 - 3.0 \times 10^5$. Aufgrund der hohen Re-Zahlen und langen Einlaufstrecke wird die Strömung als voll entwickelt und turbulent betrachtet. Die Mikrofone befanden sich im 45^0 Winkel zur Austrittsebene im Abstand von $0.5m$ und $0.25m$.

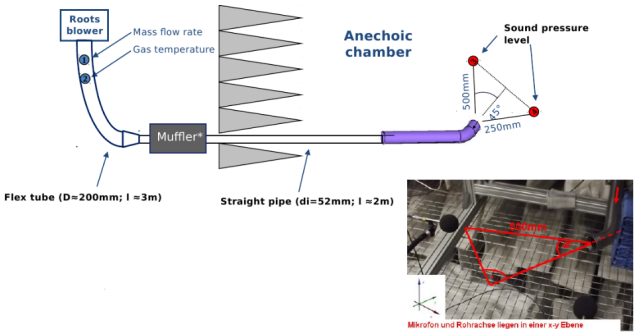

Abbildung 1: Skizze und Foto des Messaufbaus

Simulationsmodell

Die Simulationen wurden mit dem kombinierten LES-CAA Solver MGLET durchgeführt [1]. Die Rohrgeometrie wird mit einer Cut-Cell Immersed Boundary in einem blockstrukturiertem, kartesischen Gitter mit lokaler Gitterverfeinerung dargestellt. Für die LES wurde das Smagorinsky-Modell verwendet. Die Wandschubspannungen werden mit dem Werner-Wengle Modell abgeschätzt. Für die Zuströmung werden Momentangeschwindigkeiten aus einer Precurser Simulation einer turbulenten Rohrströmung mit treibendem Druckgradienten abgegriffen und an der Einströmebene gesetzt. Die Einströmebene ist für den Schall nicht-reflektierend. Gerade an dieser Eintrittsrandbedingung hat der hybride Ansatz Vorteile gegenüber einer kompressiblen Simulation. Der schalltote Raum wurde über eine freie Ausströmbedingung für die Strömung und eine nicht reflektierende Randbedinung für den Schall realisiert. Die akustischen Quellterme für die APE1 Gleichungen werden zu den Rändern hin mit einer Sponge-Layer gegen null gedrückt. Eine Gitterstudie für den Precurser zeigte eine ausreichende Genauigkeit mit 50 Punkten über den Innendurchmesser ($\Delta y^+ = 250$).

Diese Auflösung wurde für das restliche Rohr beibehalten und noch mit einer doppelt so feinen Auflösung von der Krümmung bis Rohrmündung ($\Delta y = 0.5mm$) für den Fall 45^0-kurz bei $\dot{Q} = 800kg/h$ untersucht. Die turbulente kinetische Energie (TKE, Abb 3) sowie die Schallabstrahlung ins Fernfeld (Abb. 4) zeigen ein noch nicht eingelaufenes Verhalten. Daher wurden für die weitergehenden Simulationen das feinste Gitter mit $\Delta y = 0.5mm$ von der Krümmung bis zum Rohrende und $\Delta y = 1mm$ für das restliche Rohr und insgesamt 22×10^6 effektiven Zellen verwendet.

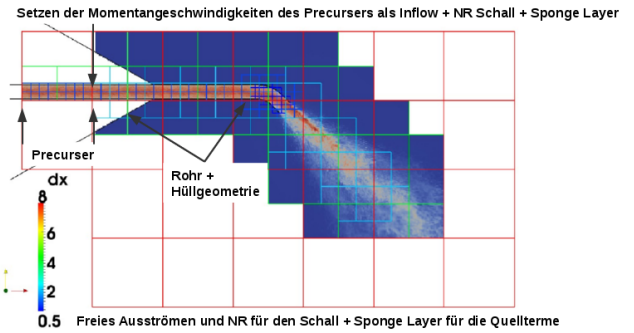

Abbildung 2: Übersicht über das Simulationsgebiet und der Gitterstruktur

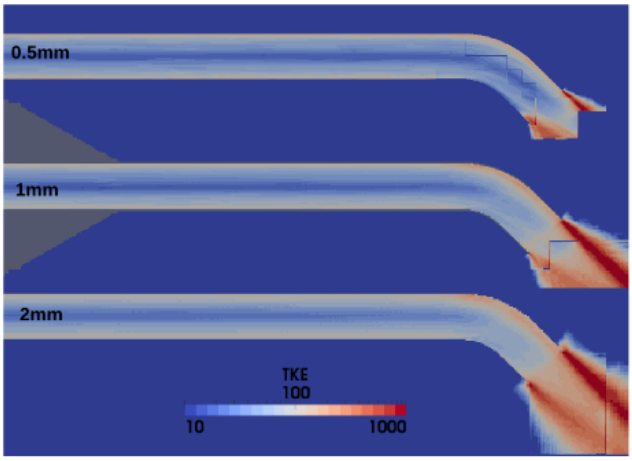

Abbildung 3: TKE bei unterschiedlichen Auflösungen

Variation des Volumenstroms

Abb. 5 zeigt das Momentanfeld von P_A, der Differenz zwischen Gesamtdruck (P_G, Lösung der APE1 Gleichungen) und hydromechanischen Druck (P_H, Lösung der Poisson-Gleichung). Im Fernfeld ist dabei P_A meist gleich dem akustischen Druck. Deutlich zu erkennen ist die intensive Schallabstrahlung vom Außenradius der Rohrmündung. Ein Vergleich mit den Messungen zeigt, dass der gewählte Ansatz den Summenpegel bei einer Variation des Volumenstroms mit einer maximalen Abweichung von 1.7dB(A) vorhersagen kann (Tabelle 1). Die Terzspektren zeigen eine grobe Übereinstimmung (Abb. 6).

Tabelle 1: A-Bewerteter Summenpegel ($800Hz - 8000Hz$)

	$800kg/h$	$600kg/h$	$400kg/h$
Messung	83.3 dB(A)	74.6 dB(A)	64.7 dB(A)
Simulation	83.9 dB(A)	76.9 dB(A)	66.6 dB(A)

Geometrievarianten

Auch die bereits beschriebene Variation der Geometrie kann mit einer maximalen Abweichung von 1.3dB(A) und einer korrekten Reihung vorhergesagt werden (Tabelle 2). Die Terzspektren zeigen ebenfalls eine grobe Übereinstimmung (Abb. 7).

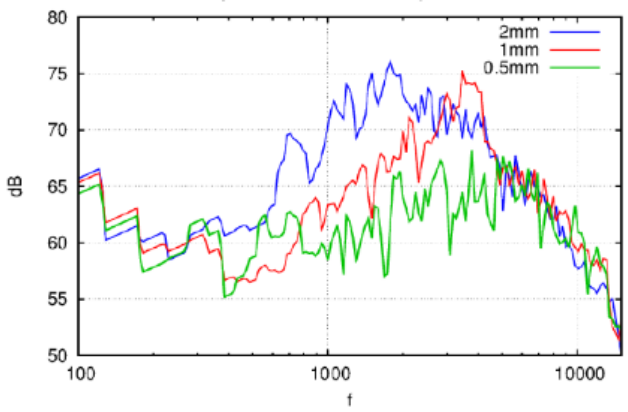

Abbildung 4: Schallabstrahlung bei unterschiedlichen Auflösungen, $0.5m$ Abstand, 1/12-Oktavbänder

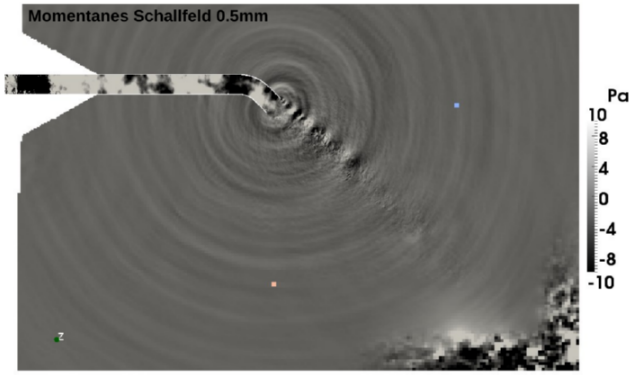

Abbildung 5: Momentanes P_A-Feld bei $\dot{Q} = 800kg/h$ für 45^0-kurz.

Eine Analyse der unerwarteten Reihung der Lautstärke zeigt, dass der Unterschied des Strömungsrauschens zwischen *gerade* und 45^0-*kurz* mit den volumenintegriertem Quadrat der Quellterme direkt an der Mündung (Abb. 8, rosa Volumen) korreliert, der Unterschied zwischen 45^0-*kurz* und 45^0-*lang* mit dem volumenintegrierten Quadrat der Quellen zwischen Krümmer und Mündung (Abb. 8, blaues Volumen).

Im Fall 45^0-lang wird eine Sekundärströmung erzwungen, die hohe Geschwindigkeiten an die Aussenwand transportiert und am Staupunkt der Sekundärströmung einen starken Anstieg der TKE erzeugt (Abb. 9). Beides erhöht die Quelltermstärke.

Hybrider Ansatz mit Konvektion

Der hier untersuchte Bereich an Ma-Zahlen liegt am Ende des Gültigkeitsbereiches der Inkompressibilitätsbedingung und das Vernachlässigen der Konvektion in den APE1 Gleichungen [1] muss überprüft werden. Aus

Tabelle 2: A-Bewerteter Summenpegel ($800Hz - 8000Hz$)

	gerade	45 kurz	45 lang
Messung	79.9 dB(A)	83.3 dB(A)	86.3 dB(A)
Simulation	79.0 dB(A)	83.9 dB(A)	85.6 dB(A)

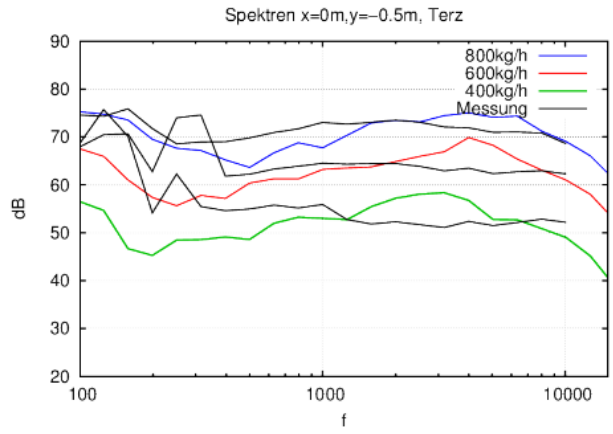

Abbildung 6: Vergleich der Terzspektren am Mikrofon in $0.5m$ Abstand. Variation von $\dot{Q}$.

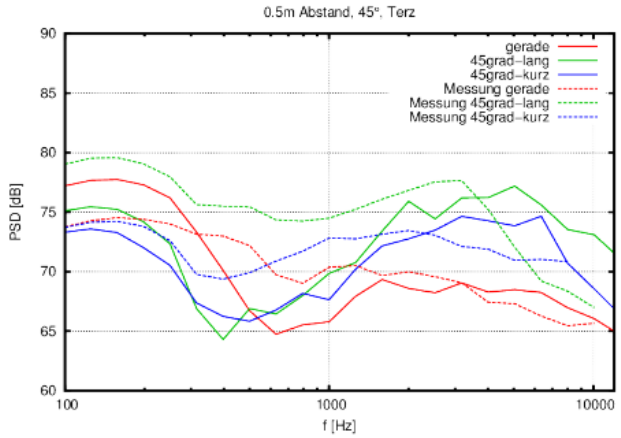

Abbildung 7: Vergleich der Terzspektren am Mikrofon in $0.5m$ Abstand. Variation von Geometrie.

diesem Grund wurde der Konvektionsterm nach Ewert [2] implementiert und berücksichtigt (jeweils zweiter Term auf der linken Seite von Gl. 1 und Gl. 2).

$$\frac{\partial p^G}{\partial t} + \nabla \circ (u^H p^G) = -\rho_0 c^2 \nabla \circ u^A \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u^A}{\partial t} + \nabla (u^H \circ u^A) = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p^G + \frac{1}{\rho_0} \nabla p^H \qquad (2)$$

Im Testfall eines angeströmten Zylinders bei $Ma = 0.25$ (Abb. 10) zeigt sich die korrekte Beugung des Schalls durch die Anströmung. Die Implementierung der konvektiven Terme an den Gittersprüngen der lokalen Gitterverfeinerung zeigte bei den hier untersuchten Testfällen allerdings noch wachsende Störungen, so dass Vorläufig nur ein sehr kurzes Zeitsignal ausgewertet werden konnte. Abb. 12 zeigt die Richtcharakteristik des SPLs im Oktavband bei $8000Hz$ ($\Phi = 0^0$ entlang der Rohrachse, $\Phi = \pi/2$ senkrecht zur Rohrachse) für die Fälle ohne Konvektion (rot), mit Konvektion (grün) und ohne Konvektion skaliert (blau) im Fall *gerade*. Es zeigt sich, dass im Einklang mit der Theorie die Pegel für kleine Winkel stark abnehmen, da der hochfrequente Schall von der

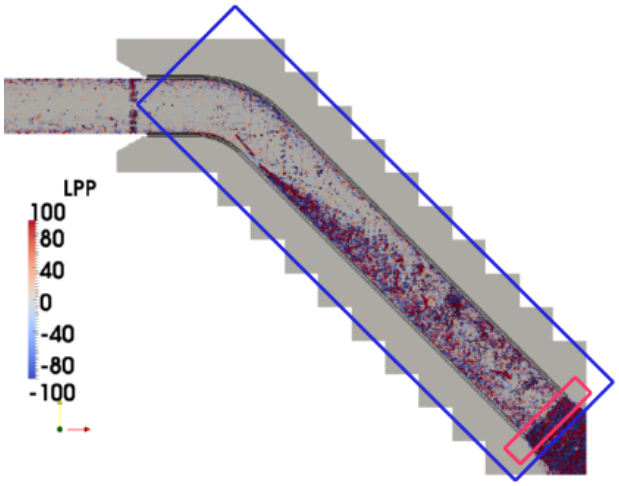

Abbildung 8: Quellterme Δp^H im Fall 45^0-*lang*. Integrationsvolumina für die Korrelation mit dem Strömungsgeräusch.

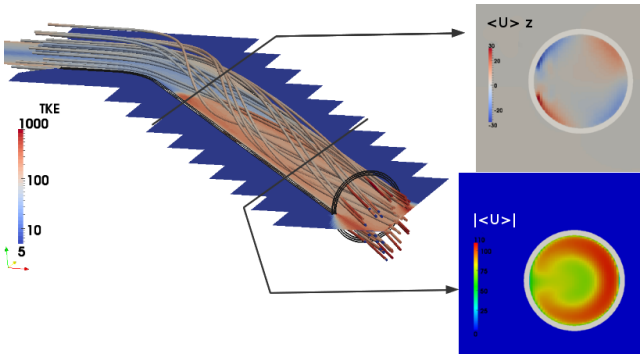

Abbildung 9: Strömungstopologie. Sromlinien ans mittlere Strömungsfeld, TKE und mittlere Strömung.

Strahlachse weggebeugt wird. So zeigt eine Skalierung des Ergebnisses ohne Konvektion mit der Beugungsbedingung an einer Scherschicht (Abb. 11) in Abbildung 12 eine gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis der Simulation mit Konvektion.

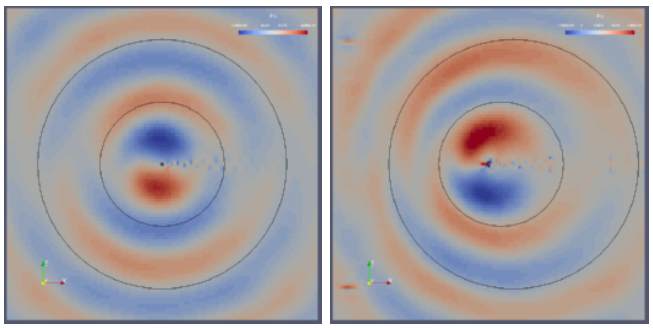

Abbildung 10: Schallabstrahlung eines angeströmten Zylinders, mit und ohne Konvektion

Zusammenfassung und Ausblick

Der untersuchte Fall stellt aufgrund der maßgeblichen Rolle der Turbulenz einer glatten Rohrströmung eine Herausforderung für eine grob aufgelöste LES dar. Die Variation des Summenpegels des Abgasmündungsgeräusches aufgrund von Massen-

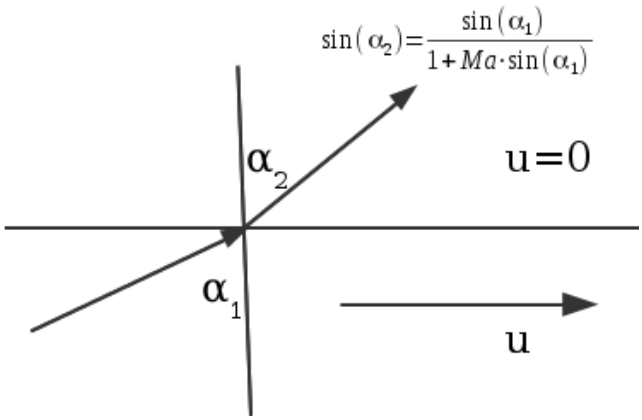

Abbildung 11: Beugungsbedingung an einer Scherschicht.

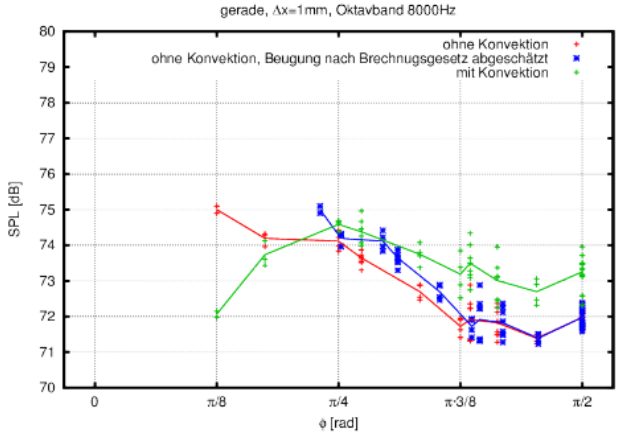

Abbildung 12: Sumenpegel über Winkel zur Strahlachse, Oktavband bei $8000Hz$.

stromänderung und Geometrieänderung kann mit einem hybriden Ansatz basierend auf einer inkompressiblen Strömungssimulation, trotz der hohen Ma-Zahlen, sehr gut vorhergesagt werden, die Spektren grob abgebildet werden. Eine weitere Verbesserung wird mit einer weiteren Verfeinerung des Gitters und der Berücksichtigung der Konvektionsterme in den APE1 Gleichungen erwartet.

Literatur

[1] Schwertfirm, F., Kreuzinger, J., Peller, N. und Hartmann, M.: Validation of a Hybrid Simulation Method for Flow Noise Prediction, AIAA/CEAS-Conference, Colorado Springs, 2012

[2] Ewert, R.: A Hybrid Computational Aeroacoustics Method to Simulate Airframe Noise, Doktorarbeit, RWTH Aachen, 2002