Benchmarking des Star-CCM+ Acoustic Wave Solvers anhand eines generischen HVAC-Ausströmers

Jörg Riedel[1], Stefan Becker[1]

[1] *Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 91052 Erlangen, E-Mail:ri@ipat.fau.de*

Einleitung

In Zeiten von zunehmender Elektromobilität spielt die Schallemission von HVAC-Systemen (**HVAC:** Heating, Ventilation and Air Conditioning) in Personenkraftwagen eine immer zentralere Rolle, da das vormals vom Verbrennungsmotor maskierte Klimaanlagengeräusch durch den Wegfall desselbigen von den Insassen des Automobils nun intensiver wahrgenommen wird. Aus diesem Grund besteht seitens der Automobilhersteller und Zulieferer ein großes Interesse daran, die Schallemission einer neuen Klimaanlagenserie zu einem möglichst frühen Produktentwicklungszeitpunkt zielgenau vorhersagen zu können. Daher spielt die akustische Optimierung der Ausströmergeometrie, wie sie beispielhaft in Abbildung 1 gezeigt wird, eine entscheidende Rolle

Abbildung 1: Beispiel für einen Automobil-Ausströmer auf dem vorderen Armaturenbrett [1].

In diesem Kontext wird sich der numerischen Methoden der Aeroakustik bedient (engl. **CAA:** Computational Aeroacoustics). Die Verwendung von sogenannten hybriden Berechnungsverfahren, bei denen Strömungsmechanik und Akustik in zwei separaten Schritten, zumeist auch auf zwei verschiedenen Gittern, berechnet wird, hat sich in den vergangenen Jahren als Mittelweg zwischen den schnellen aber bedingt aussagekräftigen auf RANS-Modellen (**RANS:** Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) basierenden stationären Methoden und der sehr genauen aber Ressourcen-intensiven DNC (**DNC:** Direct Noise Computation) etabliert.

Bislang fanden hybride Simulationsansätze hauptsächlich im universitären Kontext Anwendung, da die kommerziellen Strömungslöser einen derartigen Ansatz nicht zur Verfügung stellen. An der TU Graz und der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg entstand so in den vergangenen Jahren die Open-Source-Software openCFS [2], die eine Schallausbreitungsrechnung, basierend auf zuvor berechneten akustischen Quelltermen ermöglicht. TAUTZ hat sich in seiner Dissertation [3] mit der Optimierung von openCFS für HVAC-Systeme beschäftigt. Und dabei den kommerziellen Strömungslöser Star-CCM+ [4] mit dem Multiphysics-Code openCFS kombiniert. Seit einigen Releases bietet nun Star-CCM+ einen sogenannten Acoustic Wave Solver an, der eine hybride aeroakustische Berechnung auf einem Gitter ermöglicht. Ziel dieses Beitrags ist es, das etablierte Berechnungsverfahren [3], im Folgenden als Verfahren 1 bezeichnet, mit dem neuen Solver, im Folgenden als Verfahren 2 bezeichnet, anhand eines vereinfachten, generischen Ausströmers zu vergleichen.

Theoretische Grundlagen

Beiden Verfahren gemein ist, dass die Lösung der Strömungsmechanik mittels Star-CCM+ erfolgt. Auch die Berechnung der akustischen Quellterme aus den Strömungsdaten, fußt für beide Varianten auf demselben System an Differentialgleichungen den Acoustic Perturbation Equation (kurz: **APE**) nach EWERT und SCHRÖDER [5], die beispielsweise wie folgt formuliert werden können:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + c^2 \nabla \left(\bar{\rho} \cdot v^a + \bar{v} \frac{p'}{c^2} \right) \tag{1}$$

$$\frac{\partial v^a}{\partial t} + \nabla (\bar{v} \cdot v^a) + \nabla \left(\frac{p'}{\bar{\rho}} \right) \tag{2}$$

In den beiden Gleichungen (1) und (2) steht p' für instationäre Druckschwankungen, ∂t für die partielle Zeitableitung, c für die Schallgeschwindigkeit, $\bar{\rho}$ für die zeitlich gemittelte Fluiddichte, v^a für die Schallschnelle, $\bar{v}$ für die zeitlich gemittelte Strömungsgeschwindigkeit und Φ_P für die akustische Quellfunktion. ∇ symbolisiert bekanntermaßen den Nabla-Operator.

Der Unterschied besteht nun darin, wie das beschriebene Gleichungssystem in den jeweiligen Softwarepaketen implementiert wird und auf welche Art und Weise der akustische Quellterm berechnet wird. Auf eine genauere mathematische Herleitung der Quelltermformulierungen wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen für Verfahren 1 auf [6] und für Verfahren 2 auf [7] verwiesen.

An dieser Stelle wird lediglich ein Vergleich der beiden vollständig hergeleiteten Quelltermformulierungen vorgenommen:

$$-\frac{1}{\bar{\rho} c^2} \left(\frac{\partial p^h}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla p^h \right) \qquad [1/s] \tag{3}$$

Gleichung 3 beschreibt für Verfahren 1 den Quellterm der sogenannten Perturbed Convective Wave Equation (kurz: **PCWE**) mit der Einheit 1/s. Die Variable p^h symbolisiert die rein hydrodynamische Druckschwankung, die in

Addition mit p^a die in Gleichung 1 eingeführte instationäre Druckschwankung p' ergibt.

Die Quelltermformulierung, die im kommerziellen Strömungslöser StarCCM+ implementiert ist, sieht hingegen wie folgt aus:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p^h}{\partial^2 t}+\frac{2\bar{v}\cdot\nabla}{c^2}\cdot\frac{\partial p^h}{\partial t}+\frac{1}{c^2}(\bar{v}\cdot\nabla)\nabla\cdot(\bar{v}\cdot p^h) \quad [\mathrm{Pa/m^2}] \qquad (4)$$

Im Gegensatz zu Gleichung (3) muss in Gleichung (4) die zweifache Zeitableitung $\partial^2 t$ der hydrodynamischen Druckschwankung p^h implementiert werden.

Beschreibung des generischen Ausströmers und des dazugehörigen Validierungsexperimentes

Wie bereits erwähnt, wir der Vergleich der beiden Solver anhand eines vereinfachten, generischen Ausströmers vollzogen, der in Abbildung 2 gezeigt wird. Der Ausströmer besitzt im Inneren des quadratischen Strömungskanals eine einzige horizontal angeordnete Platte. Auf einen Grill am Auslass wurde bewusst verzichtet.

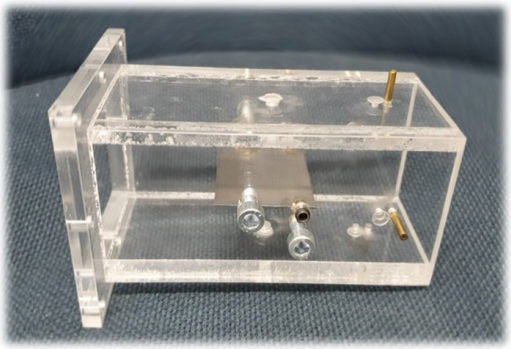


Abbildung 2: Fotografie des aus Plexiglas gefertigten generischen Automobil-Ausströmers.

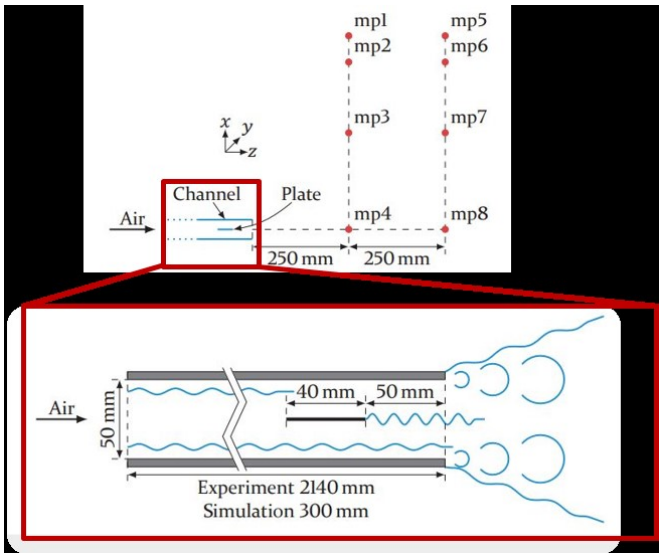


Abbildung 3: Prinzipskizze des untersuchten Ausströmers mit detaillierten Maßen und eingezeichneten Mikrofonpositionen aus dem Validierungsexperiment aus [3].

eingezeichnet. Die ersten vier Mikrofone (mp1-mp4) sind in einem Viertelkreis mit dem Radius 500 mm im Abstand von 250 mm zum Auslass angeordnet. Weitere vier Mikrofone (mp5-mp8) befinden sich auch einem Viertelkreis desselben Radius im Abstand von 500 mm zum Auslass. Die experimentellen Untersuchungen wurden im reflexionsarmen Raum des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird sich im Folgenden bei der Beschreibung der experimentellen und simulativen Ergebnisse auf die Mikrofonpositionen mp1 und mp4 beschränkt. Im betrachteten Betriebspunkt wird der Ausströmer mit einem Volumenstrom von 2,0 m³/min durchströmt.

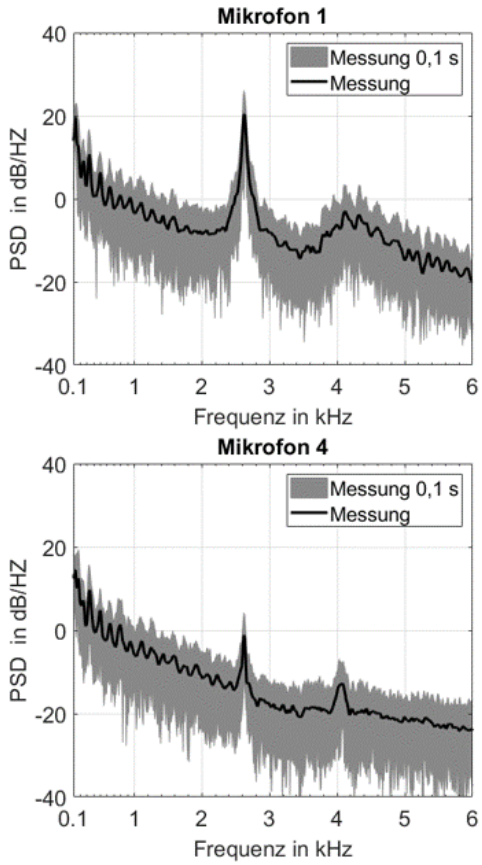


Abbildung 4: Schalldruckpegel an den Mikrofonpositionen mp1 (oben) und mp4 (unten) bei einem Volumenstrom von 2,0 m³/min.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Schaldruckpegelmessungen für die Mikrofone mp1 und mp4 als Power Spectral Density (kurz: **PSD**) in dB/Hz über der Frequenz in kHZ aufgetragen. Die schwarze Linie entspricht dabei der Mittelung über die gesamte Messdauer von 30 s. Der grau hinterlegte Bereich entspricht dem Streubereich der Ergebnisse bei einer Aufteilung des Messsignals in Abschnitte von je 0,1 s, was der ausgewerteten Zeitspanne in der Simulation entspricht.

Auffallend ist der charakteristische Peak bei circa 2600 Hz, welcher der β–Parker-Mode entspricht. Ursächlich dafür sind periodische Schwankungen des akustischen Drucks, die oberhalb und unterhalb der überströmten Platte abwechselnd ihre Maxima und Minima erreichen. Dadurch lässt sich auch

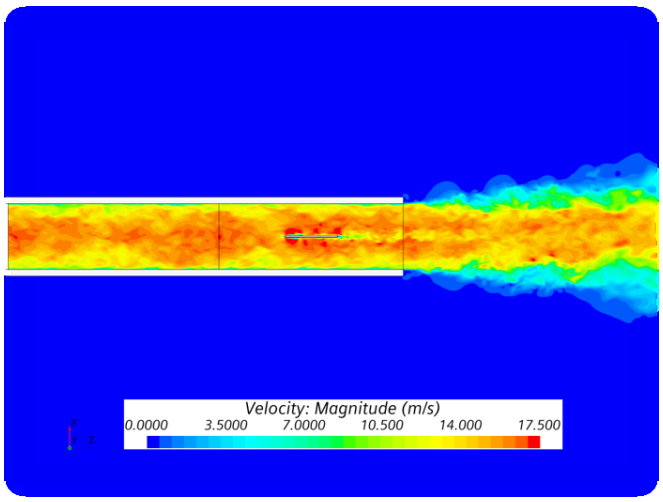
erklären, warum der Peak für Mikrofon 1, das sich direkt oberhalb der Platte befindet, stärker ausgeprägt ist als für Mikrofon 4, das sich auf der Höhe des Schwingungsknoten befindet.

Numerische Ergebnisse

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation in StarCCM+ eingegangen. Zunächst werden stichpunktartig die Solvereinstellungen zusammengefasst:

- LES mit WALE-model
- Δt=1e-05 s
- 5 inner iterations
- Total time: 0.3 s
- trimmed cell mesh
- MUSCL 3rd-order convection scheme
- double precision version of StarCCM+ *-r8*
- Akustik: 40 points per wavelength

Plots zu einem beliebigen Zeitschritt der Large-Eddy-Simulation (kurz: **LES**) für den Geschwindigkeitsbetrag und die APE-Quellterme sind in Abbildung 5 aufgeführt.



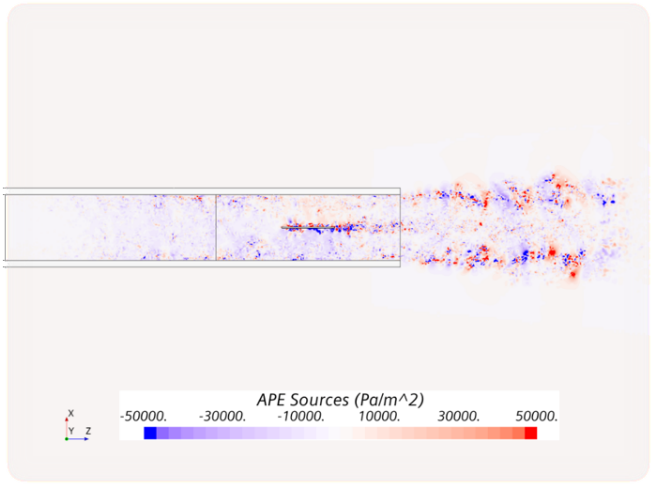


Abbildung 5: Qualitative Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation mit StarCCM+. Betrag der Geschwindigkeit (oben) und Lokalisation der APE-Quellterme (unten)

Deutlich zu erkennen ist im oberen Bild die vollentwickelte turbulente Kanalströmung und die sich entwickelnde Scherschicht im Auslassbereich des Freistrahls. Der untere Teil der Abbildung zeigt, dass sich besonders starke Quellterme im Bereich der überströmten Platte und im Bereich der Scherschicht ausbilden.

Abbildung 6 zeigt abschließend die Ergebnisse der Akustiksimulation für die Mikrofonpositionen mp1 und mp4. In blau eingezeichnet für das bestehende Verfahren 1 und in rot eingezeichnet für den neuartigen Solver in StarCCM+, das Verfahren 2. In schwarz beziehungsweise grau sind zudem die Ergebnisse aus den Messungen abgebildet. Es zeigt sich, dass beide Verfahren, den charakteristischen Peak bei circa 2600 Hz besonders für Mikrofon 1 sehr gut abbilden. Während die etablierte Simulationsmethode dem gemessenen Schalldruckpegel auch im Hochfrequenten noch sehr gut folgt, fällt der StarCCM+ Acoustic Wave Solver ab einer Frequenz von 3000 Hz im Vergleich zum Experiment um bis zu 10 dB ab. Für Mikrofon 4 mit dem schwächer ausgeprägten Maximum können beide Verfahren die Ergebnisse aus dem Experiment über den kompletten Frequenzbereich sehr gut nachbilden.

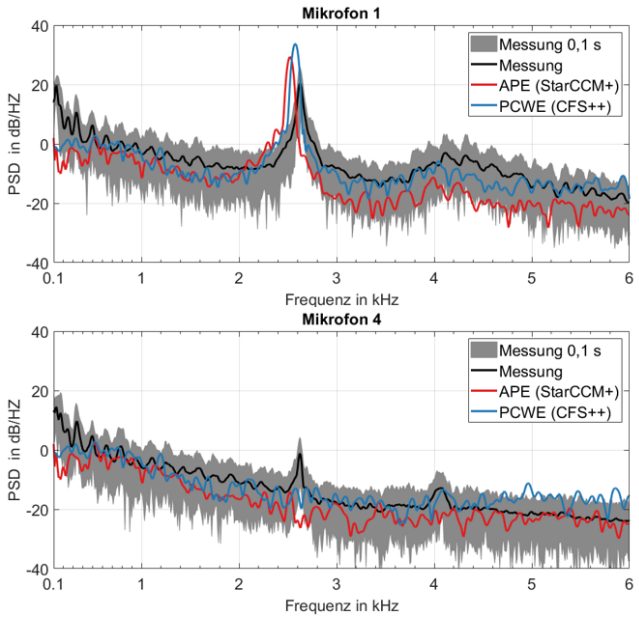


Abbildung 6: Vergleich der Ergebnisse der Aeroakustiksimulation blau: openCFS, rot : StarCCM+, schwarz: Messung. Für die ausgewählten Mikrofonpositionen mp1 und mp4

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine bestehende hybride aeroakustische Simulationsmethode basierend auf openCFS mit dem neuartigen Acoustic Wave Solver von StarCCM+ verglichen. Es zeigte sich, dass die wesentlichen Charakteristika des akustischen Problems mit beiden Methoden erfasst werden können. Während die etablierte Methode mit Hilfe von openCFS für alle Mikrofonpositionen sehr gute Ergebnisse lieferte, offenbarte der StarCCM+-Solver für Mikrofon 1 im Hochfrequenten einige Schwächen.

Literatur

[1] Unsplash Photos for everyone,
URL: `https://unsplash.com/`

[2] Free software openCFS,
URL: `https://www.opencfs.org/`

[3] Tautz, M. Aeroacoustic Noise Prediction of Automotive HVAC Systems. FAU University Press, Erlangen, 2019

[4] StarCCM+ User's guide, Version 15.02

[5] Ewert, R.; Schröder, W.:Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering. Journal of Computational Physics 188 (2003), 365-398

[6] Hüppe, A.; Kaltenbacher, M.; Reppenhagen, A.; Zenger, F.; Becker, S.:A Computational Aeroacoustics for Rotating Systems with Application to an Axial Fan. AIAA Journal, 2017.

[7] Tosh, A.; Caraeni, M.; Caraeni, D.:A Hybrid Computational Aeroacoustic Method For Low Speed Flows. AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2018)