

# Akustik-Fluid-Struktur-Kopplung (AFSI) eines Trapped Mode

Johannes Kreuzinger<sup>1</sup>, Florian Schwertfirm<sup>1</sup>

<sup>1</sup> KM-Turbulenz GmbH, 81675 München, Deutschland, Email: j.kreuzinger@km-turbulenz.de

## Einleitung

Der Strömungsakustik-Code MGLET ist ein validiertes Tool für CFD-CAA mit hybridem Ansatz [1]. Eine typische Anwendung ist die Untersuchung der Schallabstrahlung von KFZ-Klimaanlagen.

Da (Akustik)-Fluid-Struktur-Kopplung in vielen Anwendungen relevant ist, ist es ein Ziel diesen Code zu erweitern, um auch solche Fragestellungen bearbeiten zu können.

Auch sollen physikalische Fragen untersucht werden:

- Ist AFSI relevant für KFZ-Klimaakustik?
- Ist hierbei eine Zwei-Wege-Kopplung notwendig?

## AFSI-Implementierung

Folgender Gleichungssatz wird gelöst:

**Strömung: Navier-Stokes-Gleichungen**

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p^{ic}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$u_{i, RB} = w_{n,i} \frac{df_n}{dt}; \quad x_{i, RB} = w_{n,i} f_n$$

$p^{ic}$ : inkompressible Druckfluktuation (Strömung)

**Akustik: APE1**

$$\frac{\partial u_i^A}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p^{ic}}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\rho_0 c^2 \frac{\partial u_j^A}{\partial x_j}$$

$$u_{i, RB}^A = 0; \quad x_{i, RB} = w_{n,i} f_n$$

$p'$ : gesamte Druckfluktuation, Strömung und Akustik

**Struktur: Modalansatz**

$$M_{(n)} \frac{\partial^2 f_{(n)}}{\partial t^2} + \eta \sqrt{M_{(n)} C_{(n)}} \frac{\partial f_{(n)}}{\partial t} + C_{(n)} f_{(n)} = \int p' w_{n,i} dA_i$$

$w_{n,i}$ : Form (Verschiebungsvektor) des Modes  $n$

$f_n$ : Amplitude des Modes  $n$

Die Kopplung zwischen den Gleichungssystemen erfolgt durch Quell- oder Lastterme und Randbedingungen (blau markiert).

Einschränkend wird im Folgenden der Fall kleiner Auslenkungen (Vibroakustik) betrachtet. Dabei wird die Rückwirkung der Verschiebung der Struktur auf die Strömung vernachlässigt ( $x_{i, RB} = 0$ ). Die Struktur wirkt nur über ihre Geschwindigkeiten, die als Randbedingung

für die Strömungslösung gesetzt werden. Für die Schallschnellen gilt  $u_{i, RB}^A = 0$ , da es sich um eine Störgröße handelt.

Für die AFSI-Implementierung wurde die cut-cell-Variante der immersed boundary verwendet [2], da in dieser Variante die Kontrollvolumen der Erhaltungsgleichungen bis zur Geometrieoberfläche reichen. Es wurde eine schwache Kopplung mit einem seriell versetzten Algorithmus implementiert [3], s. Abb.1. Die Zeitschrittverfahren sind explizit.

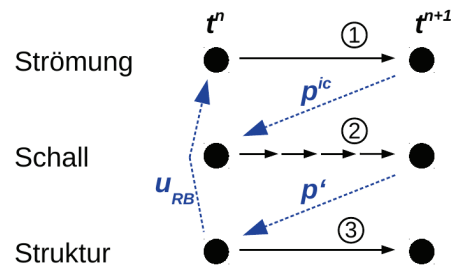


Abbildung 1: Zeitliche Abfolge der Berechnungsschritte

Dieses Verfahren ist erster Ordnung in der Zeit und es tritt ein Zeitversatz zwischen den einzelnen Gleichungssystemen auf. Aus diesem Grund wurde für die Anwendungsfälle der Zeitschritt sukzessive verringert, bis kein Einfluss auf des Spektrum der Strukturgeschwindigkeiten mehr sichtbar war.

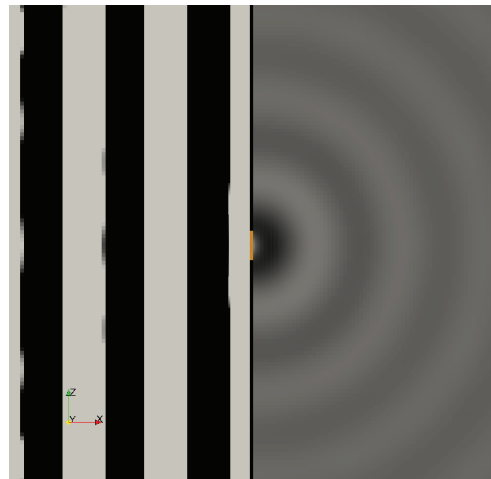


Abbildung 2: Testfall akustisch angeregte Platte, Schnitt durch das würfelförmige Berechnungsgebiet

Zur Verifikation der gekoppelten Lösung der Gleichungen wurde der in Abb.2 gezeigte Testfall gerechnet. Von links laufen ebene Schallwellen auf eine starre Wand mit einem Fenster aus flexiblem Material in der Mitte (orange im Bild). Diese wird angeregt und strahlt Schall in den

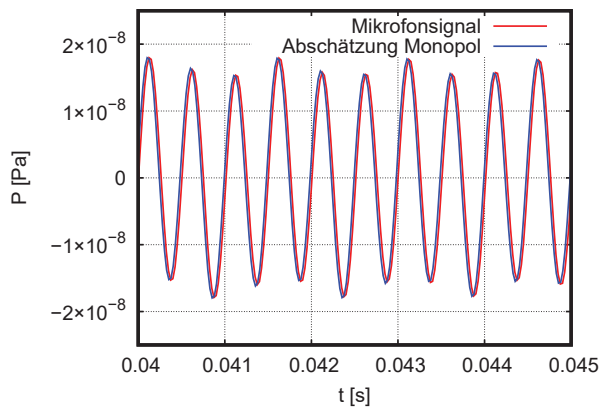


Abbildung 3: Testfall, Druck in 1.5 Wellenlängen Abstand von der flexiblen Platte

rechten Halbraum ab. Die Amplitude des abgestrahlten Schalls lässt sich unter der Annahme, dass sich die Platte wie ein Monopol verhält, aus der Geschwindigkeit der Platte abschätzen:

$$\begin{aligned} p'(r) &= \frac{\dot{m}(t - \frac{r}{c})}{4\pi r} \\ &= \frac{1}{4\pi r} \int 2u_{Platte} \left( t - \frac{r}{c} \right) dA \end{aligned}$$

Abb.3 zeigt den Vergleich des Druckverlaufs in der Simulation mit der Abschätzung. Die Amplituden stimmen überein. Ein leichter Zeitversatz, wahrscheinlich aufgrund des versetzten Koppelalgorithmus, ist erkennbar. Dieser Testfall – physikalisch eine Kopplung nur zwischen Akustik und Struktur – zeigt, dass die Rückwirkung der Struktur als Randbedingung für die Strömungsmechanik indirekt über die dabei entstehenden Quellterme auch das richtige akustische Ergebnis liefert.

## Parkermode um Klappe

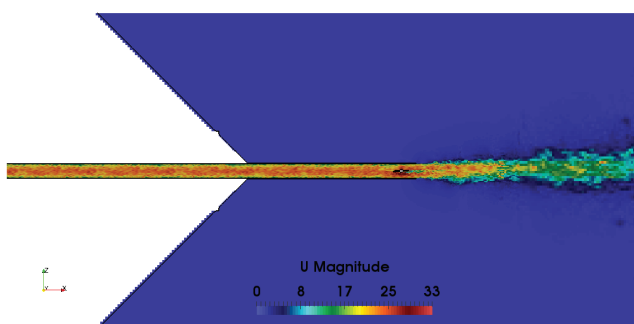


Abbildung 4: Schnitt durch das Geschwindigkeitsfeld

Die erste Anwendungsfall (Abb.4) bildet mit der turbulenten Umströmung einer Drosselklappe einen in KFZ-Klimaanlagen typischen Schallentstehungsmechanismus ab [4]. Die geöffnete Drosselklappe (Abb.5) befindet sich kurz vor dem Ende eines quadratischen 48mm weiten Kanals. Mit der querschnittsgemittelten Geschwindigkeit von 18.8m/s ergeben sich die Kennzahlen  $Re = 59000$  und  $Ma = 0.055$ . Die Strömung wird mit einer wall modeled LES berechnet. Die voll entwickelte turbulente Ka-

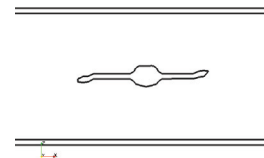


Abbildung 5: Position der Klappe im Kanal

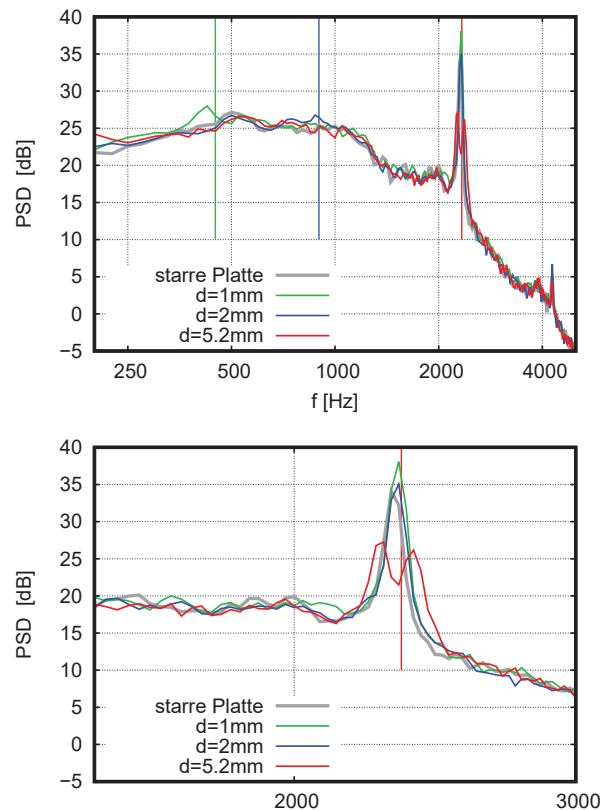


Abbildung 6: Spektrum des abgestrahlten Schalls

nalströmung wird durch einen inflow generator mit periodischen Randbedingungen erzeugt. Der abgestrahlte Schall wird an einem Kugelarray in 0.25m Abstand vom Kanalende ausgewertet. Sein Spektrum (Abb.6) ist ein breitbandiges, zu hohen Frequenzen abfallendes Rauschspektrum, aus dem die Peaks der Parkermoden (1. Mode bei 2320Hz, 2. Mode bei 4270Hz) herausragen.

Ausgangsfall ist ein Modell, in dem alle Kanalwände und die Klappe starr sind. Für die Untersuchung mit AFSI wurde ein rechteckiger, 72mm × 44mm großer Teilausschnitt der Kanalwand oberhalb der Drosselklappe als flexible Kunststoff-Platte modelliert (Abb.7). Die Platte ist ringsum gelenkig gelagert. Verschiedene Plattendicken von 1mm, 2mm und 5.2mm wurden betrachtet. Die verwendeten Stoffparameter waren: Elastizitätsmodul  $E = 1.55GPa$ , Dichte  $\rho = 907.5kg/m^3$ , Querkontraktionszahl  $\nu = 0.35$  und Verlustfaktor  $\eta = 0.02$ . Die Bewegung der Platte wird durch 12 Moden aufgelöst, wobei der Großteil der Energie bereits in der Grundmode (Ausbeulen) enthalten war.

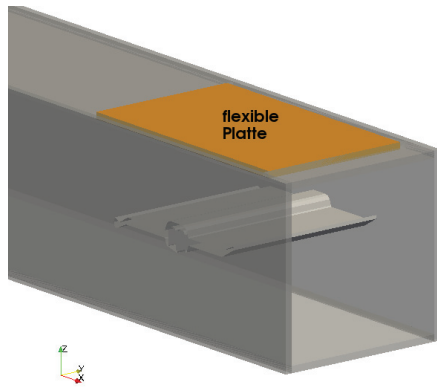


Abbildung 7: Position der flexiblen Platte

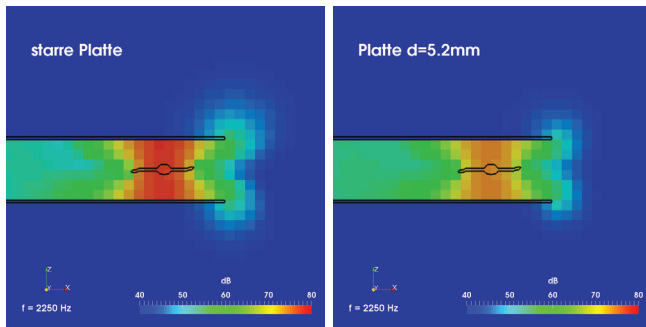


Abbildung 8: Amplitude des frequenzgefilterten akustischen Drucks  $p^a = p' - p^{ic}$  im 2250Hz-Band

Der Effekt der AFSI auf die Schallabstrahlung wird im Folgenden durch den Vergleich mit dem Ausgangsfall diskutiert. Für die beiden realistischen Plattenstärken  $1\text{mm}$  und  $2\text{mm}$  zeigen sich zusätzliche Peaks nahe an der Eigenfrequenz der Grundmode der Platte, eingezeichnet durch senkrechte Linien in Abb.6. Die Amplitude der 1. Parkermode erhöht sich leicht, breitbandig sind kaum Einflüsse auf das Spektrum zu sehen. Die Plattendicke  $5.2\text{mm}$  wurde gewählt, damit die Eigenfrequenz der Plattengrundmode und der Parkermode zusammenfallen. In diesem Fall sinkt der Peak in der Schallabstrahlung um  $7.5\text{dB}$  und der Peak teilt sich in einen Doppelpack auf. Wie stark der Peak zurückgeht hängt vom Verlustfaktor der Struktur ab (nicht gezeigt).

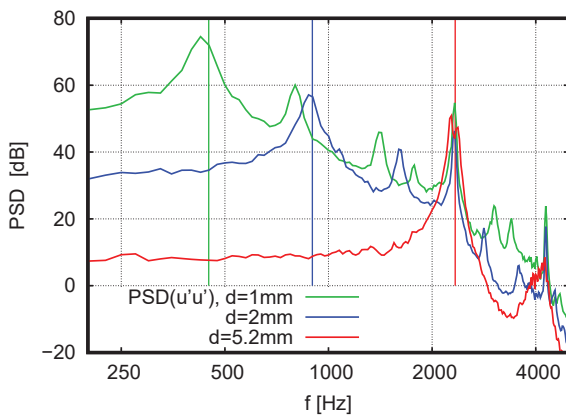


Abbildung 9: mittlere PSD der Geschwindigkeiten der flexiblen Platte

Innerhalb des Kanals verringert sich die Amplitude der Parkermode in derselben Größenordnung wie die Schallabstrahlung, s. Abb.8. Physikalisch wird die Schallabstrahlung also durch die Rückwirkung der Plattenbewegung auf die Parkermode verringert. In der Abbildung ist auch zu sehen, dass der nach außen direkt durch die schwingende Platte abgestrahlte Schall keinen relevanten Beitrag liefert.

Einen Hinweis auf die Art der Anregung der Platte liefern die Spektren der Plattengeschwindigkeiten (Abb.9). Sie zeigen die für jede Plattenstärke unterschiedlichen Peaks bei den Eigenfrequenzen der Platten und zusätzlich unabhängig von der Plattenstärke Peaks bei den akustischen Parkermodes. Die Anregung der Platte ist also bei der Frequenz der Parkermodes akustisch dominiert. Der physikalische Mechanismus im Fall der  $5.2\text{mm}$  dicken Platte ist also eine Zwei-Wege-Kopplung von Akustik und Struktur.

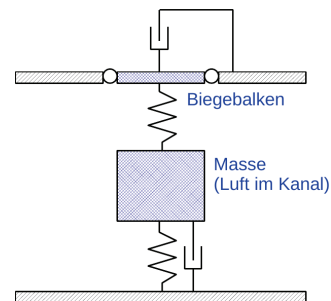


Abbildung 10: Ersatzmodell für die Kopplung zwischen Struktur und Parkermode

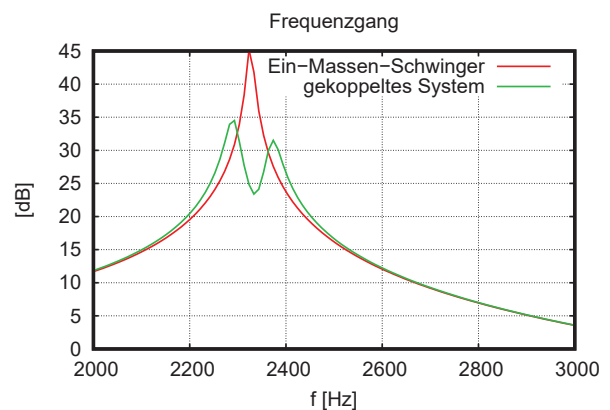


Abbildung 11: Transferfunktion zwischen Anregung und Auslenkung für das Ersatzmodell

Ein Ersatzmodell mit zwei über Federn gekoppelten Körpern kann die Entstehung des Doppelpacks erklären, s. Abb.10. Dieses System mit zwei Freiheitsgraden hat zwei Resonanzfrequenzen. Schätzt man seine Parameter aus Geometrie und Materialeigenschaften des Falls mit Plattenstärke  $5.2\text{mm}$  ab, ergeben sich die in Abb.11 gezeigten Transferfunktionen, die dem Verhalten der Schallabstrahlung in der Simulation entsprechen.

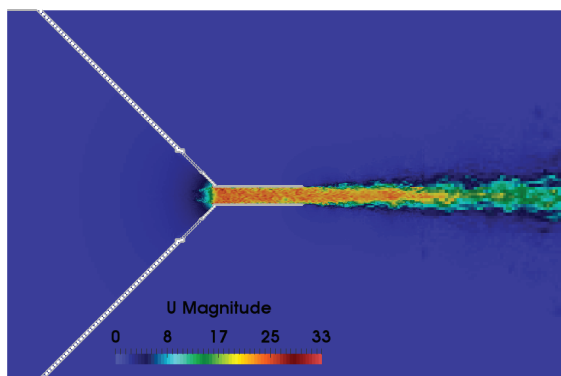


Abbildung 12: Schnitt durch das Geschwindigkeitsfeld

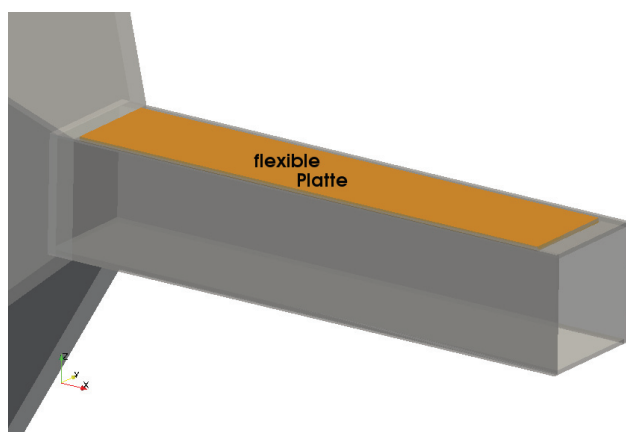


Abbildung 13: Position der flexiblen Platte

## Kanalmode

Motiviert durch die Ergebnisse für die Parkermode wird ein zweiter Anwendungsfall untersucht, bei dem die akustischen Resonanzen bereits bei tieferen Frequenzen und damit bei ähnlichen Frequenzen wie die Struktureigenmoden bei realistischen Wandstärken von  $1\text{mm}$  bis  $2\text{mm}$  auftreten. Der Fall besteht aus einem  $L = 248\text{mm}$  langen Kanalstück (Abb.12) mit gleichem Querschnitt und gleichen Kennzahlen wie im vorherigen Fall. Die Strömung wird von links kommend durch eine Trichter beschleunigt, im Kanal bildet sich Turbulenz aus, an das Ka-

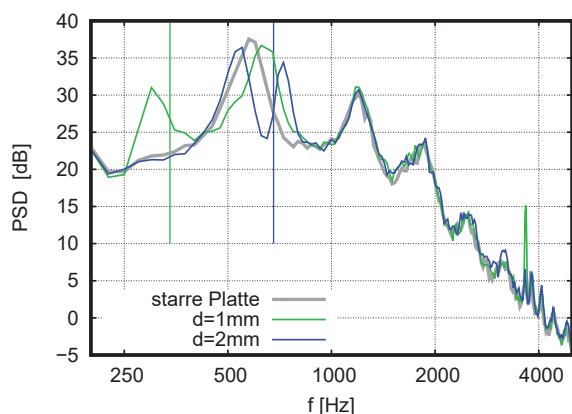


Abbildung 14: Spektrum des abgestrahlten Schalls

nalende schließt ein Freistrahlan. Die Schallabstrahlung wird dominiert durch die Kanalmoden mit Frequenzen  $f_n \approx \frac{c}{nL/2}$ . Wie im vorherigen Fall wird eine Kanalwand – nun über die gesamte Länge – als flexible Kunststoffplatte mit den gleichen Materialeigenschaften modelliert (Abb.13). Die untersuchten Dicken betragen  $1\text{mm}$  und  $2\text{mm}$ .

Für beide Plattenstärken zeigen sich deutliche Effekte auf den abgestrahlten Schall bei Frequenzen  $f < 1\text{kHz}$ , s. Abb.14. Peaks verschieben sich und zusätzliche Peaks ähnlicher Stärke entstehen nahe bei den Eigenfrequenzen der Grundmode der Struktur. Oberhalb  $1\text{kHz}$  zeigt die AFSI kaum Effekte, abgesehen von einer starken Erhöhung des Peaks bei  $3650\text{Hz}$  (1. akustische Quermode im Kanal) bei einer Wandstärke von  $1\text{mm}$ .

## Schlussfolgerung

Die Akustik-Fluid-Struktur-Kopplung (AFSI) mit einer Zwei-Wege-Kopplung für Vibrationen wurde im Code MGELT umgesetzt. Grundsätzlich ist das Konzept nicht auf Vibrationen beschränkt, da bei der bewegte Immersed Boundary die Positionsänderung der Struktur als Randbedingung für Strömungs- und Schallberechnung berücksichtigt werden kann.

Die Anwendungsfälle zeigen, dass für KFZ-Klimaanlagen bei realistischen Wandstärken deutliche Effekte zu erwarten sind, die aber auf schmale Frequenzbänder bzw. einzelne Peaks beschränkt sind.

Vorsicht ist daher bei der Interpretation von Simulations- und auch von Messergebnissen geboten, wenn z.B. Serienbauteile mit rapid-prototyping-Bauteilen verglichen werden. Letztere haben oft andere Wanddicken und mechanische Eigenschaften als Serienbauteile.

## Literatur

- [1] F. Schwertfirm, J. Kreuzinger, N. Peller, and M. Hartmann. Validation of a hybrid simulation method for flow noise prediction. In *Aeroacoustic Conference*, pages 1–16, Colorado Springs, June 2012. AIAA/CEAS.
- [2] Kurz, F. et al.: A hybrid CFD-CAA approach for aeroacoustic simulations of moving arbitrary bodies with a cut-cell immersed boundary method. DMV-GAMM 2016, Minisyposion “Immersed Boundary Methods”
- [3] Pasquariello, V. et al.: A cut-cell finite volume - finite element coupling approach for fluid-structure interaction in compressible flow. *J. Comp. Physics* 307 (2015), 670-695
- [4] J. Kreuzinger, F. Schwertfirm, N. Peller, and M. Hartmann. Analysis of resonance phenomena caused by obstacles in hvac exhaust nozzles using a combined cfd-caa approach. In *19th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference*, page 2132, Berlin, May 2013. AIAA.