

Analyse und Simulation turbulent überströmter Helmholtz-Resonatoren

Johannes Kreuzinger¹, Stefan Schimmelpfennig²

¹ Kreuzinger und Manhart Turbulenz GmbH, 81675 München, Deutschland, Email: j.kreuzinger@km-turbulenz.de

² Audi AG, 85045 Ingolstadt, Deutschland

Einleitung

Eine der auffälligsten Lärmquellen eines Personenkraftfahrzeugs ist die Gesamtheit aller überströmter Karoseriespalte, insbesondere der Heckklappenspalte. Dieser bildet zusammen mit dem darunter liegenden Hohlraum einen Helmholtz-Resonator, angeregt von der darüberstreichenden turbulenten Grenzschicht. Betrachtet wird ein generisches Modell dieses Systems. Im Windkanal wurden unterschiedliche Halsformen und Resonanzvolumina verglichen. In den betrachteten Fällen wird der Resonator passiv durch die Strömung angeregt, es konnte keine Rückkopplung zwischen Resonator und Strömung beobachtet werden.

Eine Analyse der Druckschwankungen im Resonator nach dem Produktansatz, bei dem das Druckspektrum in einen von der Strouhalzahl (Anregungsfunktion) und einen von der Helmholtzzahl abhängigen Anteil (Systemfrequenzgang) aufgeteilt wird, zeigt, dass die Halsform (scharfkantig oder abgerundet) nur die Anregungsfunktion beeinflusst. Messung und Simulation bestätigen, dass lokal die Grenzschicht und die Scherschicht über dem Hals verändert werden.

Um die Frage zu beantworten, ob und mit welchem Aufwand dieses System simuliert werden kann, wurden in einem ersten Schritt Strömungssimulationen durchgeführt. Der Vergleich mit Messwerten zeigte, dass die LES der Strömung die Einflüsse der Halsform abbilden kann.

Daher wurden Simulationen des Gesamtsystems mit einer hybriden LES-CAA-Methode (MGLET) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit Messwerten.

Generisches Modell

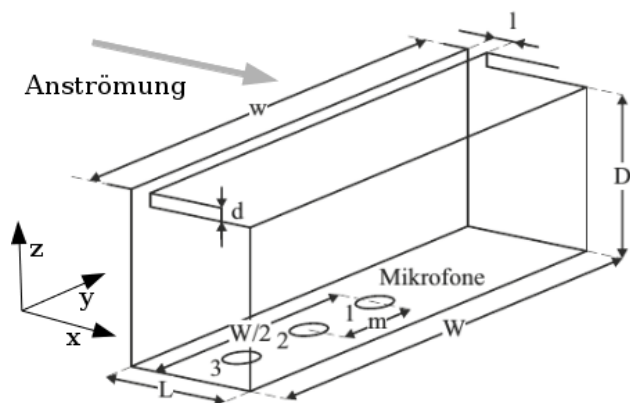


Abbildung 1: Skizze des generischen Modells

Tabelle 1: Geometrievarianten, Angaben in mm

Variante	l	d	L	W	D	m
small	6	5	10	200	15	-
medium	6	5	20	200	30	40
big	4,6,8	5	50	200	60	40

Der untersuchte generische Helmholtzresonator [1] besteht aus einem Spalt in einer Platte über einem quaderförmigen Hohlraum, s. Abb.1. Die Platte wurde an die $266 \times 200\text{mm}$ große Auslassdüse eines offenen Windkanals angeflanscht, sodass der sich in 116mm Abstand von der Düse befindende Spalt quer überströmt wird. Durch ein Tripping mittels Schleifpapier wird sichergestellt, dass die Grenzschicht turbulent ist. Die geometrischen Abmessungen wurden variiert, s. Tabelle 1. Außerdem wurde der Einfluss der Form der Halskanten des Spaltes untersucht. Dabei wurden scharfe Vorder- und Hinterkanten (eckig, E) und mit einem Radius von 2mm abgerundete (rund, R) verglichen.

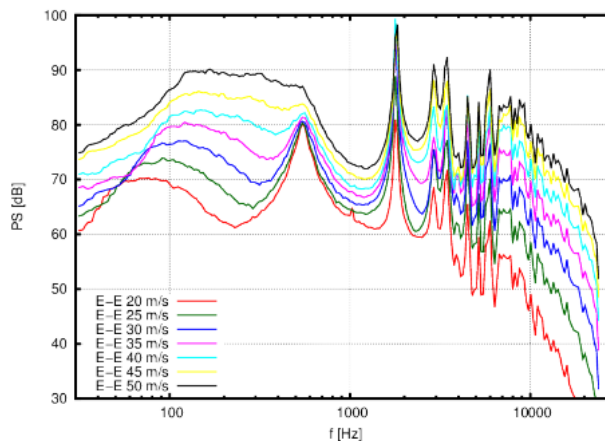


Abbildung 2: Druckspektren am Resonatorboden (big, Mikrofon 1) für unterschiedliche Geschwindigkeiten

Der Resonator wurde entsprechend den Eigenschaften überströmter Karoseriespalte so ausgelegt, dass er passiv ist, d.h. es gibt keine akustische Rückwirkung des Resonators auf die anregende Grenzschicht. Daher werden Hohlraumresonanzen unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit immer angeregt und die Resonanzfrequenzen weisen keine Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit auf. Dies zeigen die Druckspektren bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten in Abb.2.

Diese Spektren zeigen einen tieffrequenten Buckel, der sich mit steigender Geschwindigkeit von 75Hz zu 175Hz

verschiebt. Vermutlich handelt es sich um einen Effekt der seitlichen Strahlränder aufgrund der im Vergleich zu den Abmessungen des Resonators kleinen Düse. Zwischen 500Hz und 600Hz liegt die Helmholtzresonanz. Die höherfrequenten Peaks sind Hohlraumresonanzen des Resonatorvolumens.

Analyse mit Produktansatz

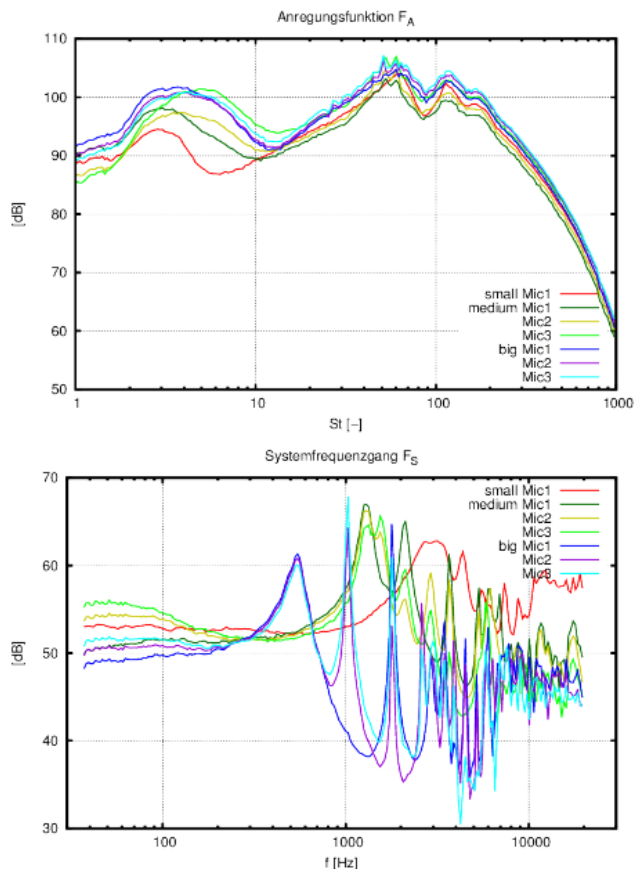


Abbildung 3: Anregungsfunktion und Systemfrequenzgang für Fälle mit gleicher Halsform ($l = 6\text{mm}$, E-E)

Der gemessene Schallpegel L hängt von der Strömungsgeschwindigkeit U und der Frequenz f ab (Abb.1), oder – ausgedrückt in dimensionslosen Kennzahlen – von $St = fL_{ref}/U$ und $He = fL_{ref}/c$ (Hier wurde $L_{ref} = 1\text{m}$ verwendet.). Für Reynoldsähnliche Strömungen kann man diese Abhängigkeit sehr gut mit einem Produktansatz beschreiben ([2], [3]):

$$L(St, He) \approx F_a(St) \cdot F_s(He) \cdot Ma^n \cdot konst \quad (1)$$

F_a bezeichnet die Anregungsfunktion und F_s den Systemfrequenzgang. Als Exponent der Machzahl wird im Folgenden $n = 6$ verwendet. Die Wahl ist beliebig, sie beeinflusst, da $Ma = U/c = He/St$, nur die globale Steigung der Funktionen F_a und F_s . F_a und F_s werden für jede Konfiguration und für jedes Mikrofon bestimmt durch einen least-squares-fit an bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemessene Spektren des Pegels L .

Abb.3 zeigt die Funktionen für Fälle mit gleichem Hals des Helmholtzresonators, aber unterschiedlichen Resonatorgrößen und Mikrofonorten. Die Anregungsfunktion F_a

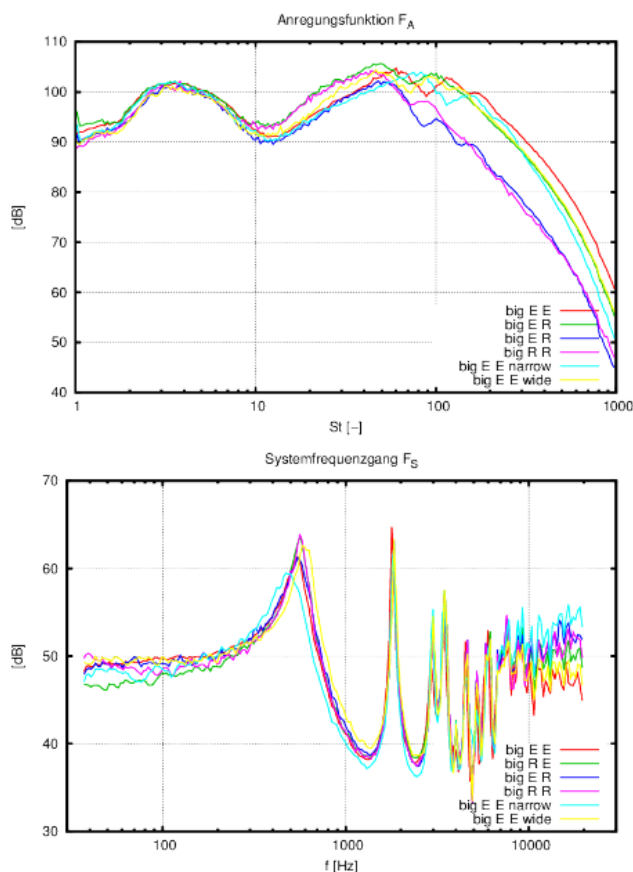


Abbildung 4: Anregungsfunktion und Systemfrequenzgang für Fälle mit gleichem Resonator (big)

variiert für $St > 10$ kaum, wohingegen die Systemfrequenzgänge F_s sich stark unterscheiden und teils mehr als 20dB auseinanderliegen.

Für Fälle, bei denen sich nur der Hals unterscheidet, Resonator und Mikrofonort aber unverändert sind, zeigt sich ein umgekehrtes Bild, s. Abb.4. Die Systemfrequenzgänge F_s liegen nahe beieinander. Die Anregungsfunktionen variieren abhängig von der Halsgeometrie, insbesondere der Kantenform. Eine runde Vorderkante führt im Bereich $St = 10 \dots 50$ zu einer ca. 5dB höheren Anregung. Oberhalb von $St > 50$ senkt eine runde Hinterkante die Anregung in weiten Bereichen um ca. 10dB.

Die Annahme, die auch in [1] getroffen wurde, ist, dass die Halskantenform lokal die Scherschicht im Bereich des Spalts und damit die Anregung verändert.

Simulation der anregenden Grenzschicht

Simuliert wird die über den Spalt streichende Grenzschicht in einem Ausschnitt von $160 \times 64 \times 192\text{mm}$ für eine Anströmgeschwindigkeit von $U = 40\text{m/s}$. Eintrittsrandbedingung ist ein vorgegebenes mittleres Profil mit $\delta_{0,99} = 4.6\text{mm}$, dem Fluktuationen, die 16 Grenzschichtdicken stromab entnommen werden, überlagert werden. Damit erhält man auf kurzer Gebietslänge ein vollentwickelte turbulente Grenzschicht [5]. Die Grenzschichtdicke am Eintritt wurde so gewählt, das an der Position des Spalts die im Experiment gemessene

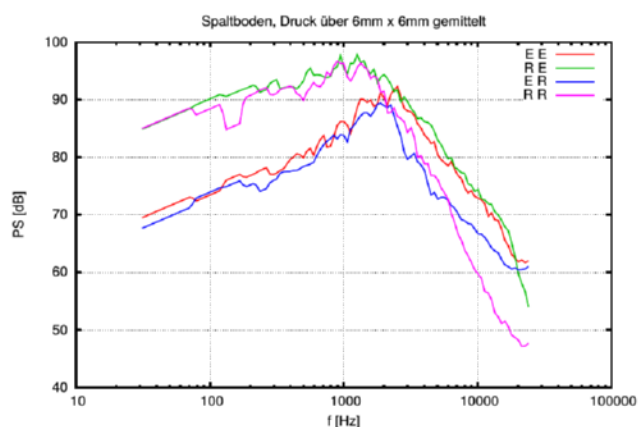


Abbildung 5: Simulierte Spektren des am Spaltboden über $6 \times 6 \text{ mm}$ gemittelten Drucks

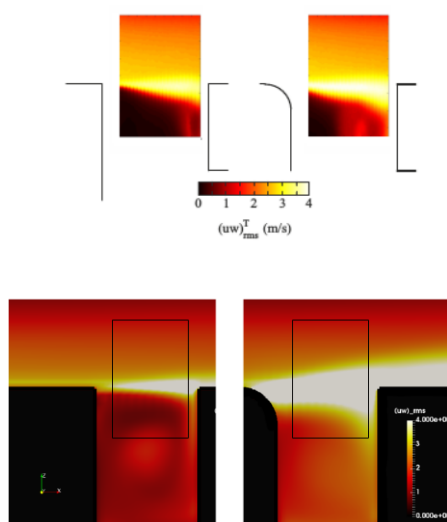


Abbildung 6: Geschwindigkeitsfluktuationen in einer Ebene senkrecht y . oben: Messung; unten: Simulation

ne Dicke von 6 mm erreicht wird. Der Spalt ist in der Simulation abgebildet, allerdings ist er nur 8 mm tief in z -Richtung, es ist kein Resonator angeschlossen. Eingesetzt wurde der Code MGLET, es wurde eine wall-modeled-LES der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen mit Smagorinsky-Modell für die Feinstrukturspannungen und Werner-Wengle-Wandmodell für die Wandschubspannungen durchgeführt. Die Oberfläche wurde durch eine cut-cell-immersed-boundary dargestellt. Eine Gitterstudie zeigte, dass sowohl Grenzschichtwachstum als auch Oberflächendruckspektra für Gitterweiten der würfelförmigen Zellen von $\Delta x < 0.5 \text{ mm}$ im Bereich der Grenzschicht konvergiert sind. Ein Vergleich der Oberflächendruckspektra mit Messwerten zeigte eine gute Übereinstimmung. Gewählt wurde eine Gitterweite $\Delta x = 0.5 \text{ mm}$ mit einer Verfeinerung auf $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$ im Bereich des Spalts. Untersucht wurden unterschiedliche Halskantengeometrien: Vorder- und Hinterkante wurden eckig oder abgerundet mit einem Radius von 2 mm abgebildet. Abb.5 zeigt die Druckspektren am Boden des Spalts. Sie verhalten sich – ausgenommen tiefe Frequenzen $f < 400 \text{ Hz}$ bzw. $St < 10$ – qualitativ wie die

aus der Messung extrahierten Anregungsfunktionen F_a : Unterhalb von $f = 2000 \text{ Hz}$ bzw. $St = 50$ erhöht eine Abrundung der Vorderkante die Spektren, oberhalb dieser Frequenz sinkt das Spektrum bei abgerundeter Hinterkante.

Der verstärkende Effekt der runden Vorderkante wird damit erklärt, dass der Ablösepunkt nun entlang der Rundung schwankt und damit insgesamt höhere Fluktuationen auftreten. Eine Messung mit einer Hitzdrahtsonde im Spalt bestätigt die höheren Fluktuationen (Abb.6 oben), die Auswertung der Simulation zeigt qualitativ das gleiche Bild (Abb.6 unten).

Simulation des Gesamtsystems

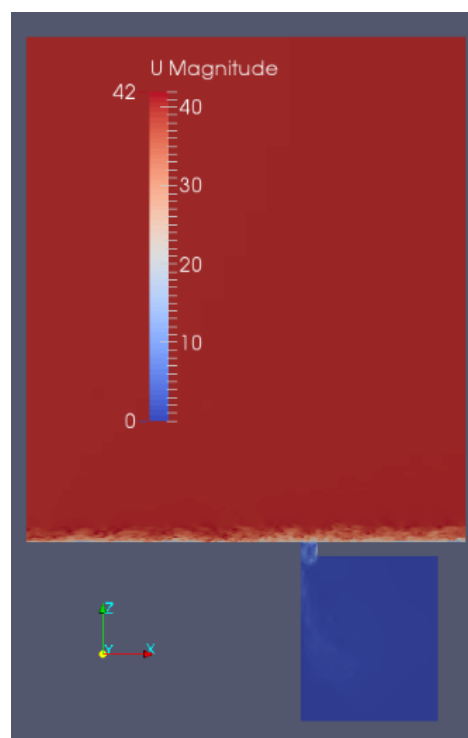


Abbildung 7: Gesamtsystem: Schnitt durch das Geschwindigkeitsfeld

Das Gesamtsystem Grenzschicht-Spalt-Resonator wurde nach dem hybriden Ansatz simuliert: Eine inkompressible LES (entsprechend der Simulationen im vorangegangenen Abschnitt) liefert die Quellterme für die zur Schallausbreitungsrechnung eingesetzten APE-Gleichungen. Strömungs- und Schallsimulation werden simultan auf dem selben Gitter mit dem Code MGLET durchgeführt [4].

Abb.7 zeigt einen Schnitt durch das Berechnungsgebiet, das $160 \times 256 \times 256 \text{ mm}$ umfasst. Die Gitterweite beträgt $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$ bis $\Delta x = 8 \text{ mm}$. Insgesamt besteht das Gitter aus 29 Mio. Zellen. Für die Simulation von 100 ms werden 4600 CPUh benötigt.

Ein Vergleich der Spektren aus Messung und Simulation, s. Abb.8 oben und unten, zeigt, dass der Effekt der Halskantenabrundung – 5 dB Erhöhung im mittleren Frequenzbereich und 10 dB Absenkung im hohen – von der

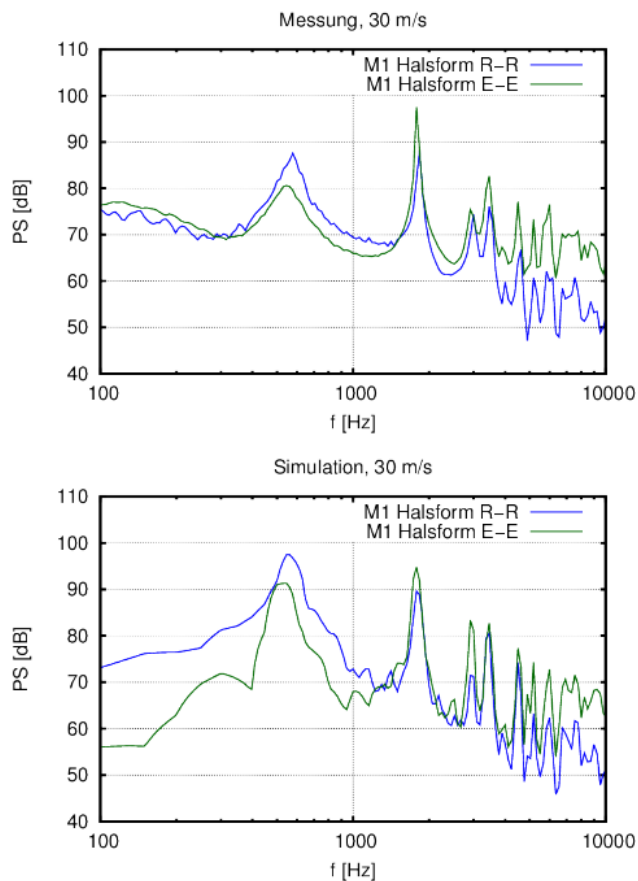


Abbildung 8: Druckspektren am Boden des Resonators, Halskantenform rund (R) und eckig (E). Oben: Messung, Unten: Simulation

Simulation qualitativ und quantitativ richtig wiedergegeben wird. Oberhalb von $f = 1000\text{ Hz}$ gibt die Simulation nicht nur den Unterschied, sondern auch den absoluten Pegel genau wieder. Der Helmholtzresonator-Peak bei $500 - 600\text{ Hz}$ wird von der Simulation überschätzt, dieser Effekt ist noch nicht endgültig geklärt. Bei tiefen Frequenzen ($f < 300\text{ Hz}$) zeigt die Simulation eine große Abhängigkeit des Pegels von der Halskantenform, die in der Messung nicht auftritt. Eine mögliche Erklärung ist, dass hier in der Messung die Anregung durch die seitlichen Strahlränder (die in der Simulation nicht abgebildet sind) stärker als die durch die Grenzschicht ist.

Der untersuchte passive Helmholtzresonator kann also qualitativ und über weite Bereiche auch quantitativ korrekt mit einer hybriden Simulation abgebildet werden.

Literatur

- [1] Schimmelpfennig, S.: Aeroakustik von Karosseriespalten, Doktorarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [2] Weidemann: DLR-FB 71-12, 1971
- [3] Striebel, W.M.: Anwendung akustischer Ähnlichkeitsgesetze zur Schallumrechnung bei Ventilatoren, Praktikumsbericht, EBM-Papst, 2008

[4] 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

[5] Manhart, M. und Friedrich, R.: Towards DNS of separated turbulent boundary layers, Direct and Large-Eddy Simulation III, S. 429-440, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999