

# Untersuchung der Kopplungseffekte Innenraum-Kofferraum beim Schiebedachwummern an Hand eines SAE-Modells

Reinhard Blumrich<sup>1)</sup>, Bernd Crouse<sup>2)</sup>, David Freed<sup>2)</sup>, Andreas Hazir<sup>2)</sup>, Gana Balasubramanian<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> FKFS, Stuttgart, Email: reinhard.blumrich@fkfs.de; <sup>2)</sup> Exa Corp., Brisbane, CA, USA, Email: bernd@exa.com

## 1. Einleitung und Theorie

Der Geräuschpegel im Pkw-Innenraum ist ein wichtiges Kriterium in der Fahrzeugentwicklung. Das Schiebedachwummern kann hierbei zu einer erheblichen Komfortminderung führen. Bei realen Fahrzeugen können Schalldruckpegel bis ca. 130 dB auftreten bei Geschwindigkeiten von ca. 40 – 90 km/h und Frequenzen um 20 Hz [1].

Die Fahrzeugkabine wirkt als Helmholtz-Resonator, der durch kohärente Wirbelstrukturen meist mit der ersten Rossiter-Mode (ein Wirbel in der Schiebedachöffnung pro Periode) angeregt wird [2]. Nach Rossiter kann der Zusammenhang zwischen der Rossiter-Mode (ganzzahlige Anzahl von Wirbelstrukturen in der Scherschicht über rechteckigen Kavitäten) und der Wirbelablösefrequenz durch folgende Formel abgeschätzt werden:

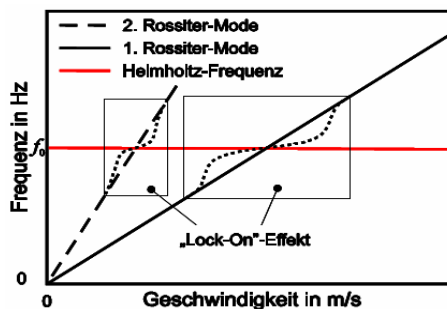
$$f_n(v) = \frac{v}{L} \frac{(n-\gamma)}{\sqrt{K+M}}$$

$v$ : Anströmgeschwindigkeit,  $L$ : Kavitätslänge,  $M$ : Machzahl.  $K$ ,  $\gamma$  sind empirische Konstanten (für  $L/l$  (Tiefe Kavität) = 4:  $\gamma = 0,25$  und  $K = 0,57$ ).  $n$  ist die Modenzahl.

Der Helmholtz-Resonator (Fahrzeugkabine) lässt wie ein Feder-Masse-System charakterisieren. Die Luftsäule in der Öffnung (Schiebdach) stellt die schwingende Masse und das Luftvolumen im Hohlraum (Kabine) die Feder dar. Die Resonanzfrequenz hängt von der Schallgeschwindigkeit  $c$ , dem Volumen des Hohlraums  $V$ , der Fläche der Kavitätsöffnung  $A$  und deren Tiefe  $l$  ab. Für kleine  $l$  wurde eine Mündungskorrektur entwickelt:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{lV}} \quad \Rightarrow \quad f_{0\_korrigiert} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + 0,96\sqrt{A})}}$$

Letztere wurde für Pkw-Schiebedächer experimentell bestätigt [3].



**Abbildung 1:** Interaktion der Rossiter-Moden und Helmholtz-Resonanzen bei Überströmung einer Kavität.

Beim Wummern findet eine bi-direktionale Kopplung zwischen dem Wirbeldurchfluß (Rossiter Moden) in der Scherschicht und der Kabine (Helmholtz Resonator) statt

(Feed-back-Mechanismus). Es kommt zum so genannten „Lock-On“-Effekt: die Wirbelablösefrequenz und die Frequenz der Druckschwankung in der Kabine sind identisch (Abbildung 1).

Bei realen Fahrzeugen können neben der Innenausstattung auch Teile der Struktur (z.B. Seitentüre, Kofferraum) Einfluss auf die akustischen Parameter der Kabine (Frequenz und Dämpfung) nehmen. Im heutigen Entwicklungsprozess nimmt das Bestreben, Strömungssimulationen für Design-Entscheidungen zu verwenden, ständig zu. In [4] wurde gezeigt, daß auch Struktureffekte beim Schiebedachwummern prinzipiell in die CFD-Simulationen einbezogen werden können. Zum besseren Verständnis der Kopplungseffekte sind hierzu zunächst experimentelle Untersuchungen und anschließend Strömungssimulationen durchgeführt worden.

## 2. Experimente

Die Experimente wurden im Modellwindkanal des FKFS an einem SAE-Körper mit Schiebedachöffnung (Maßstab 1:4) durchgeführt (Abbildung 2). Eine Trennwand im Innenraum des Modells ermöglichte verschiedene Konfigurationen:

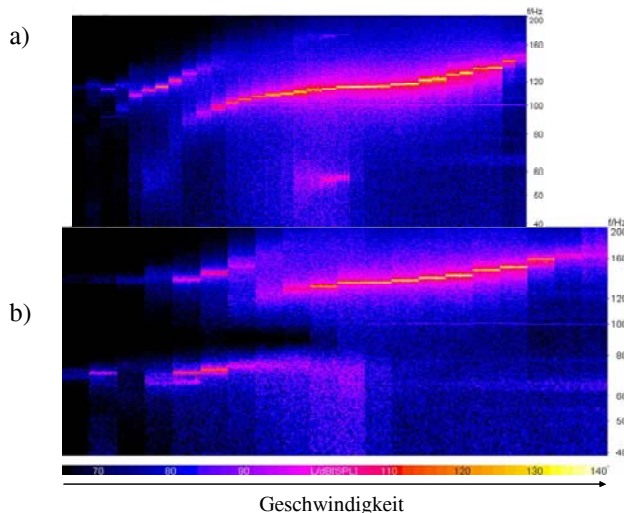
1. "Baseline": ohne Trennwand, großes Volumen.
2. "Reduced Volume": mit Trennwand, kleines Volumen.
3. "Coupled Volume": Trennwand mit Löchern.

Für die verschiedenen Konfigurationen wurde mit mehreren Geschwindigkeitshochläufen und jeweils einem Mikrofon im Innen- und Kofferraum das Druckzeitsignal gemessen.



**Abbildung 2:** 1:4-SAE-Modell mit Schiebedachöffnung und variablem Hohlraum im FKFS-Modellwindkanal.

Abbildung 3 zeigt die gemessenen Schallpegel über Geschwindigkeit und Frequenz der 2. und 3. Konfiguration. Ohne Kopplung (a) ist der Wechsel von 2. zu 1. Rossiter-Mode bei der Helmholtz-Resonanz (ca. 114 Hz) deutlich zu sehen. In Konfiguration 3 ist bei ca. 72 Hz ein Wummern im Kofferraum zu beobachten. Die relativ niedrige Frequenz deutet darauf hin, dass die Luft im Innenraum als Masse im Masse-Feder-System des Kofferraums wirkt, angeregt durch die transiente Scherschicht. Das Hauptwummern findet im Innenraum statt (ca. 138 Hz).



**Abbildung 3:** Schallpegel über Geschwindigkeit und Frequenz (Innenraum-Mikrofon). a) „Reduced Volume“, b) „Coupled Volume“.

In Abbildung 5 werden die Maximalpegel der drei Konfigurationen verglichen (Experiment: Linien). Entsprechend der Theorie werden die Resonanz-Frequenzen mit zunehmenden Volumen kleiner; das Wummern tritt bei niedrigeren Geschwindigkeiten mit geringeren Pegeln auf (Vergleich "Baseline" – "Reduced Volume"). Die Kopplung führt zu einer Verschiebung des Wummerns zu höheren Geschwindigkeiten hin und zu einer Reduzierung des Maximalpegels um ca. 3,5 dB.

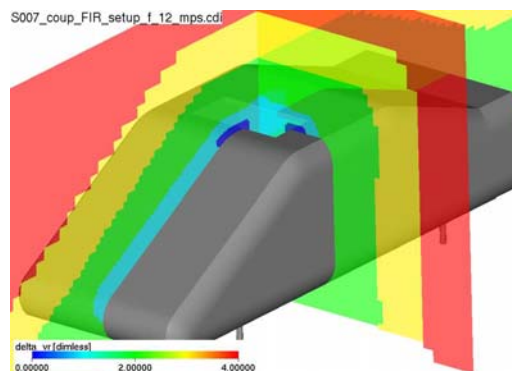
### 3. Simulationen

Parallel zu den Experimenten wurden Simulationen mit der auf der Lattice-Boltzmann Methode basierten CFD/CAA-Software PowerFLOW<sup>®</sup> der Exa Corporation durchgeführt. Es werden Lösungen für die transienten und kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen numerisch berechnet. U.a. deswegen ist PowerFLOW<sup>®</sup> für aeroakustische Simulationen mit einer Wechselwirkung zwischen Strömung und Akustik geeignet [4].

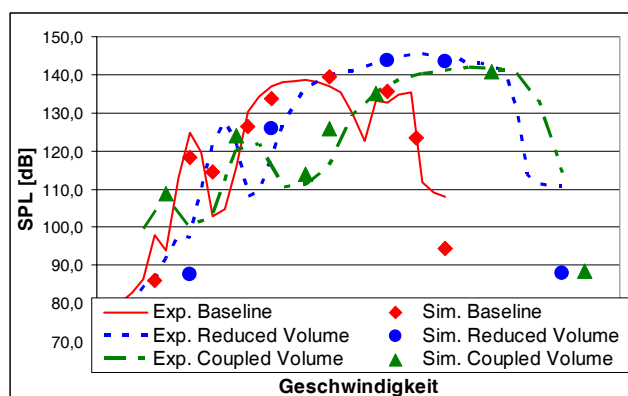
Die Simulationen wurden für die gleichen Konfigurationen allerdings mit weniger Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Der SAE-Körper und der Aufbau des Rechnetzes sind in Abbildung 4 dargestellt. Die relevanten Gebiete (Anströmung, Scherschicht) wurden am feinsten aufgelöst.

Die Ergebnisse der Simulationen stimmen mit den experimentellen Ergebnissen sowohl für das große als auch für das kleine Volumen (ohne Kopplung) sehr gut in Frequenz, Pegel und Geschwindigkeit überein. Das Wummerphänomen kann zuverlässig in der Simulation reproduziert werden. Bei der dritten Konfiguration ("Coupled Volume") handelt es sich um ein weitaus komplexeres akustisches System. Der Wirbeldurchfluss ist sowohl mit der Kabine als auch mit dem Kofferraum gekoppelt. Auch für diese Konfiguration kann in Abbildung 5 sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Experiment (grüne Strich-Punkt-Linie) mit den Simulationen (grüne Dreiecke) gefunden werden.

Die im Vergleich zur Simulation hohen Pegel im Experiment bei hohen Geschwindigkeiten außerhalb des Wummerbereiches, sind auf das Hintergrundgeräusch des Windkanals zurückzuführen.



**Abbildung 4:** Aufbau des dreidimensionalen Rechengitters. Dunkelblau markiert die Gebiete mit der feinsten Auflösung.



**Abbildung 5:** Vergleich der Wummerpegel Simulation – Experiment (Innenraum-Mikrofon).

### 4. Zusammenfassung

Der erwartete Trend, daß das Wummern bei kleinerem Volumen verstärkt wird (größere Resonanzfrequenz) konnte im Experiment im Modellwindkanal des FKFS mit dem SAE-Modell im 1:4-Maßstab bestätigt werden. Die Strömungssimulationen mit der CFD/CAA-Software PowerFLOW haben die Ergebnisse des Experimentes sehr gut wiedergegeben. Auch das gekoppelte System (Kabine, Kofferraum) hat zu vergleichbaren Ergebnissen in Experiment und Simulation geführt.

Die Untersuchungen werden mit anderen Kopplungsformen (z. B. flexible Trennwand) fortgeführt. Damit soll der Einfluß von einer potentiellen Strukturkopplung mit dem Helmholtz-Resonator untersucht und verstanden werden.

[1] Helfer, M.: Aeroakustik. In: Hucho, W. H.: Aerodynamik des Automobils – Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. Wiesbaden: Vieweg, 2005.

[2] Rossiter, J. E.: Wind-Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds. Reports and Memoranda No. 3438, October, 1964. Aeronautical Research Council, London.

[3] Brenberger, M.: Experimentelle und numerische Grundsatzzuntersuchungen zum Schiebedachwummern. In: Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Techn. Mitteilungen, Apr. 2004.

[4] Crouse, B. et al.: Sunroof Buffeting of a Simplified Car Model, SAE Paper No. 2005-01-2498, 2005.