

# Statistische Energieanalyse der Windgeräusche am Kraftfahrzeug

M. Eberle<sup>1</sup>, R. Schilling<sup>1</sup>, M. Brennberger<sup>2</sup>, G. Wickern<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Fluidmechanik, Technische Universität München, D-85748 Garching

<sup>2</sup> Windkanalzentrum AUDI AG, D-85045 Ingolstadt

## Einleitung

Ab Geschwindigkeiten über 120 km/h sind die durch Fahrzeugumströmung entstehenden Windgeräusche die für den Innengeräuschpegel eines Fahrzeugs ausschlaggebende Komponente. Für die Berechnung der Ausbreitung dieser in der Regel hochfrequenten Anregung muss ein geeignetes Verfahren gefunden werden. Deterministische Verfahren wie FEM und BEM sind aufgrund des Rechenaufwands für Frequenzen über 300 Hz nicht mehr einsetzbar. Für Untersuchungen an Gesamtfahrzeugmodellen bedient man sich deshalb der statistischen Energieanalyse.

## Ausgangssituation

Bei der Audi AG sind mit dem Programm AutoSEA der Fa. ESI erstellte SEA-Modelle von Gesamtfahrzeugen zur Untersuchung von Motor- und Abrollgeräuschen bereits im Einsatz. Die Modelle sind sehr detailgetreu und liefern gute Übereinstimmungen mit Validierungsmessungen.

## Aufgabenstellung

Für ein besseres Verständnis der Auswirkung der durch den Fahrtwind angeregten Schallquellen auf das Innengeräusch sowie zur genaueren Untersuchung der Schalltransferpfade wurde eine Studie zur Klärung folgender Fragen begonnen:

- Wie sind die dominanten durch Windanströmung angeregten Schallquellen am Fahrzeug lokalisierbar?
- Welche dieser Schallquellen beeinflussen den Innengeräuschpegel entscheidend?
- Mit welcher Messeinrichtung können die Schallquellen quantifiziert werden?
- Wie muss das SEA-Fahrzeugmodell modifiziert werden, um durch Wind erzeugte Geräusche als Anregungen implementieren zu können?
- Kann der Innengeräuschpegel mit Hilfe eines SEA-Fahrzeugmodells ausreichend gut abgebildet werden?
- Über welche Transferpfade gelangt der Schall in den Fahrzeuginnenraum?

## Messtechnik und Messprogramm

### Messtechnik

Zur Lokalisierung der dominanten windangeregten Schallquellen außerhalb des Fahrzeugs werden Mikrofon-Array-Messungen herangezogen. Die Quantifizierung der

Schallquellen erfolgt durch spezielle Oberflächenmikrofone auf überströmten Fahrzeugoberflächen sowie durch Halb Zoll-Freifeld-Mikrofone in windgeschützten Bereichen. Für die Bestimmung des Innengeräusches finden binaurale Kunstköpfe sowie Halb Zoll-Freifeld-Mikrofone Anwendung.

### Ablauf der Messungen

Messungen bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten von 100 km/h und 140 km/h werden im Audi-Windkanal durchgeführt. Um die Einflüsse einzelner Schallquellen genauer untersuchen zu können, wird das Fahrzeug bei verschiedenen Konfigurationen gemessen. Zur Verringerung des Einflusses der Schallquellen im Unterbodenbereich wird die Unterbodenströmung unterbunden, die Schallquellen in Spalten und Hohlräumen werden durch Abdecken mit Klebeband ausgeschaltet. Zur Quantifizierung der Schallleistung, die durch die Fensterflächen ins Fahrzeuginnere gelangt, sind im Fahrzeug einzeln abnehmbare Verschaltungen der Fenster aus Sperrholz angebracht.

## Aufbau des SEA-Fahrzeugmodells

### Ausgangskonfiguration

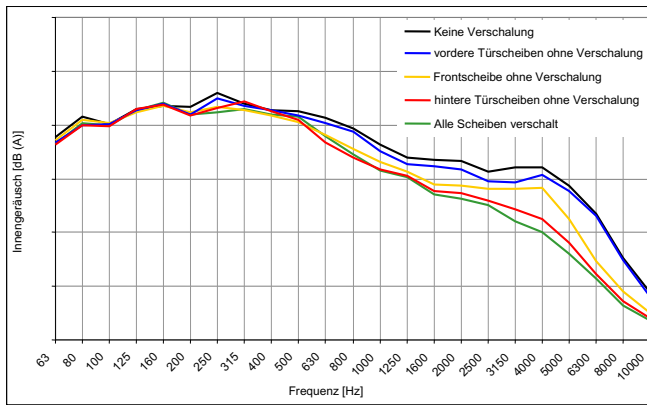
Das bestehende SEA-Modell bildet den Fahrzeuginnenraum sehr detailliert ab. Es besteht aus ca. 600 strukturellen und ca. 100 akustischen Subsystemen. Diese Subsysteme sind zu einem Großteil neben den Materialwerten über experimentell ermittelte Spektren des Absorptionskoeffizienten definiert.

### Modelladaption

Um das SEA-Fahrzeugmodell zur Untersuchung von Windgeräuschen nutzen zu können, müssen nach DeJong [1] um das Fahrzeug herum zwei Schichten von Kavitäten gelegt werden. Die fahrzeugnahe Kavitätschicht hat hinsichtlich Dicke und Schallausbreitungsgeschwindigkeit die Eigenschaften der turbulenten Grenzschicht. Um diese Schicht wird eine weitere Schicht von Kavitäten mit einer Ausdehnung von 0,2 m und den akustischen Eigenschaften von Luft zur Beschreibung des akustischen Nahfelds gelegt.

## Ergebnisse der Windkanalmessungen

Aus den Messungen im Windkanal ergibt sich, dass neben lokalen Schallquellen im Unterbodenbereich und in den überströmten Spalten des Fahrzeugs vor allem die Wecheldruckschwankungen auf den Fensterscheiben des Fahrzeugs ausschlaggebend für den Innengeräuschpegel sind. Abbildung (1) zeigt durch gezielte Entfernung der Verschaltung den Einfluss einzelner Fensterflächen auf den Innengeräuschpegel im vorderen Teil des Fahrzeugs.



**Abbildung 1:** Einfluss einzelner Fensterflächen auf den Innengeräuschpegel im vorderen Teil des Fahrzeugs

Deutlich erkennbar ist, dass über die vordere Türscheibe der größte Schallanteil übertragen wird. Demzufolge müssen die Wechseldrücke auf der vorderen Türscheibe intensiver untersucht werden. Die Scheibenfläche lässt sich hier in vier Strömungsbereiche unterteilen. Diese sind Spiegel-Nachlauf, A-Säulen-Wirbel, der Bereich abgelöster Strömung entlang der Dachkante und der Bereich wiederangelegter Strömung auf der restlichen Fläche der vorderen Türscheibe.

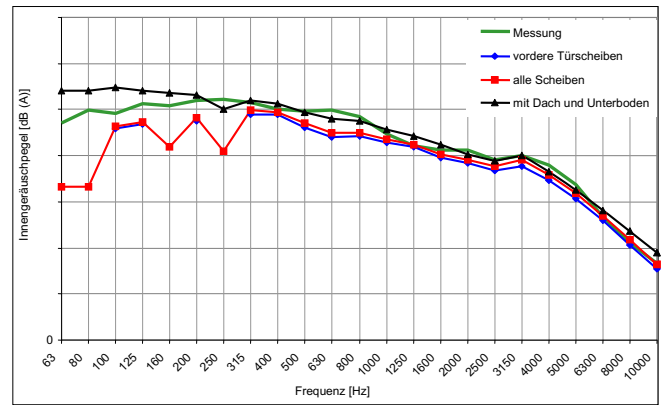
Die Modellierung der Anregung im SEA-Modell erfolgt dann über eine Turbulent-Boundary-Layer-Anregung (TBL), die aus in den einzelnen Strömungsbereichen gemessenen Wechseldruckspektren gemittelt wird. Lokale Geräuschquellen in Spalten und am Unterboden werden mit Hilfe von Leistungsspektren in das SEA-Modell implementiert.

## Vergleich zwischen Messung und Simulation

### Absoluter Innengeräuschpegel

Abbildung (2) zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Innengeräuschpegeln für den vorderen Teil des Fahrzeuginnenraums. Da in erster Linie der Einfluss der überströmten Fahrzeugoberflächen untersucht werden soll, werden die Berechnungen mit dem gemessenen Innengeräuschpegel bei abgeklebten Spalten und blockierter Fahrzeug-Unterströmung verglichen. Im SEA-Modell werden neben den TBL-Anregungen der Fensterscheiben auch ebensolche Anregungen für das Dach sowie Leistungsspektren zur Charakterisierung der Schallquellen im Unterbodenbereich implementiert. Die Anregungen im Unterbodenbereich entstammen Mikrofonmessungen am Fahrzeug mit blockierter Unterströmung.

Gut ersichtlich ist, dass bereits in der Modell-Konfiguration mit der vorderen Türscheibe als alleiniger Anregung des Fahrzeugs eine gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Spektrum erzielt wird. Analog zu den Messungen haben die turbulenten Anregungen der restlichen Scheiben nur eine geringfügige Erhöhung des SEA-berechneten Innengeräuschs zur Folge. Einen größeren Einfluss auf das Innengeräusch zeigen vor allem bei niedrigeren Frequenzen die turbulente Anregung des Dachs sowie, trotz blockierter Unterströmung, die lokalen Schallquellen im Fahrzeugunterbodenbereich.

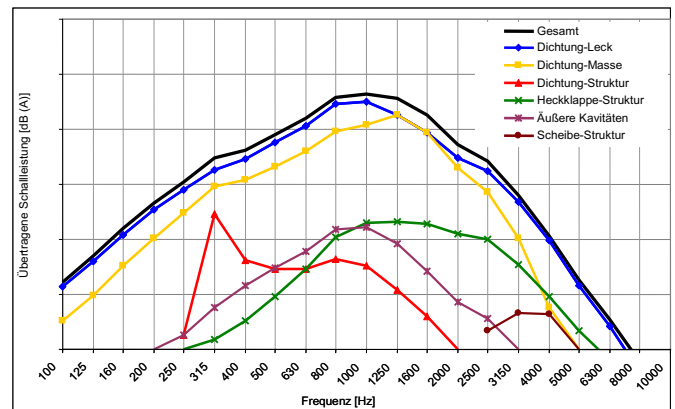


**Abbildung 2:** Vergleich des Innengeräuschpegels zwischen Messwert und SEA-Spektren aus verschiedenen Modell-Konfigurationen im vorderen Fahrzeugteil bei 140 km/h

Für Frequenzen unter 300 Hz sind größere Abweichungen und Unregelmäßigkeiten feststellbar. In diesem tiefen Frequenzbereich sind die Voraussetzungen für eine Nutzung der SEA nicht mehr erfüllt und es entstehen Lücken und Sprünge in den SEA-berechneten Spektren.

### Transferpfadanalyse

In Abbildung (3) ist die Schallausbreitung von einer lokalen Schallquelle im Heckklappenspalt in den Innenraum dargestellt. Es sind ausschließlich SEA-berechnete Spektren abgebildet.



**Abbildung 3:** Vergleich SEA-berechneter Spektren zur Untersuchung der Schallausbreitung vom Heckklappenspalt in den Innenraum am Fahrzeug mit Kombiheck, 140 km/h

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass der Hauptteil der übertragenen Schalleistung über die Dichtung in den Innenraum des Fahrzeugs gelangt. Demgegenüber werden nur geringe Anteile über den Rahmen der Heckklappe oder über die Heckscheibe übertragen.

**Kontakt:** [extern.michael.eberle@audi.de](mailto:extern.michael.eberle@audi.de)

### Literatur

- [1] R.G. DeJong, T.S. Bharj, J.J. Lee: *Vehicle Wind Noise Analysis Using a SEA Model with Measured Source Levels*, SAE-Paper 2001-01-1629