

Aeroakustik in turbulenter Anströmung

Windkanal- und Straßenmessungen

H. Miebling¹, N. Lindener¹, A. Cogotti², F. Cogotti², M. Maffei²

¹ Windkanalzentrum AUDI AG, D-85045 Ingolstadt

² Windkanal Pininfarina S.p.A., I-10095 Grugliasco (Torino)

Einleitung

Die Optimierung von Windgeräuschen in einem PKW erfolgt fast ausschließlich im Aeroakustik-Windkanal mit sehr niedrigem Turbulenzgrad. Diese Anströmung führt zu einem zeitlich konstanten Windgeräusch mit sehr geringer Fluktuation.

Die im Windkanal gemessenen mittleren Spektren des Windgeräusches stimmen sehr gut mit den mittleren Spektren, die auf der Strasse gemessen werden überein. Dies vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, wo das Windgeräusch die anderen Quellen wie Motor, Antriebsstrang und Rollgeräusche übertönt.

Windgeräusch auf der Strasse

Ein wichtiger Unterschied ergibt sich aber in der zeitlichen Geräuschstruktur, wenn man Windkanal und Strasse vergleicht. Durch ständig wechselnde Windverhältnisse (Böen), durch variable Bepflanzung oder Bauwerke am Straßenrand und durch vorausfahrenden Verkehr ist die Anströmung auf das Fahrzeug turbulent. Betrag und Richtung der Anströmung ändert sich statistisch mit der Zeit. Diese turbulente Anströmung führt zwangsläufig auch zu einem Windgeräusch mit deutlich hörbarer zeitlicher Struktur. Da das menschliche Gehör mittlere konstante Pegel durch zeitvariable Filter unterdrücken kann, und gleichzeitig aber eine hohe Sensibilität für zeitliche Strukturen im Geräusch hat, spielen für den Gesamteindruck diese sich zeitlich ändernden Windgeräusche eine wichtige Rolle. Sie können das Hauptmerkmal für die Geräuschbeurteilung werden.

Aufgabenstellung

Um ein besseres Verständnis zu erhalten, wie es zu diesem instationären Geräuscheindruck kommt, haben das Windkanalzentrum der AUDI AG und der Windkanal Pininfarina ein gemeinsames Projekt gestartet, um unter anderem folgende Fragestellungen zu klären:

- Welcher turbulenten Anströmung ist das Fahrzeug auf der Strasse ausgesetzt (Turbulenzgrad, turbulente Längenskalen)?
- Zu welchen Windgeräuschen führt diese turbulente Anströmung im Vergleich zum Windkanal?
- Gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugen bei gleicher turbulenter Anströmung?
- Lässt sich diese Anströmung (und die entsprechenden Windgeräusche) auch im

Windkanal bei Pininfarina mit den Turbulenz-Generatoren simulieren?

Messprogramm und Messtechnik

Messtechnik

Um die Anströmung auf das Fahrzeug im Windkanal und auf der Strasse zu messen, wurde eine Cobra-Sonde (4 Loch Sonde) im Bereich vor der Motorhaube befestigt. Damit lässt sich zeit- und richtungsaufgelöst die Anströmung auf das Fahrzeug erfassen. Die Höhe über der Fahrbahn war 1m. Zeitsynchron wurde mit einem Kunstkopf das Innengeräusch aufgenommen. Für die exakte Fahrgeschwindigkeit bei allen Fahrten sorgte ein Radarsensor.

Wo wurde gemessen?

Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten wurden sowohl im Windkanal Audi, als auch bei Pininfarina durchgeführt. Des Weiteren wurde im Audi Prüfgelände, sowie auf verschiedenen deutschen Autobahnen gemessen. Auf der Strasse wurde bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen gemessen.

Zeitlich gemittelte Ergebnisse

Abbildung (1) zeigt die gemessene mittlere Anströmung an einem Fahrzeug bei Messungen im Windkanal und auf verschiedenen Autobahnen mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen, sowie im Prüfgelände. Die Fahrgeschwindigkeit betrug 140 km/h. Da sich die Cobra-Sonde im Vorstau des Fahrzeugs befindet, zeigt sie bei 140 km/h Windgeschwindigkeit im Windkanal nur 119,9 km/h an. Ein Vergleich zur CFD-Rechnung zeigt gute Übereinstimmung. Wie zu sehen ist, ergeben sich deutliche Unterschiede in der mittleren Anströmung bei den verschiedenen Messungen auf der Strasse. Im Prüfgelände und auf der A92 (jeweils keine Fahrzeuge voraus) ergeben sich ähnliche Werte wie im Windkanal. Je mehr Verkehr, desto niedriger die mittlere Anströmung. Diese unterschiedlichen Anströmungsgeschwindigkeiten führen zu leicht unterschiedlichen mittleren Spektren im Innengeräusch. Die zugehörige mittlere Turbulenz der Anströmung ist dort, wo die mittlere Geschwindigkeit niedrig ist, besonders hoch. Dies wirkt sich auf die Zeitstruktur im Innengeräusch aus. Fahrzeuge voraus reduzieren die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit und erhöhen die Turbulenz.

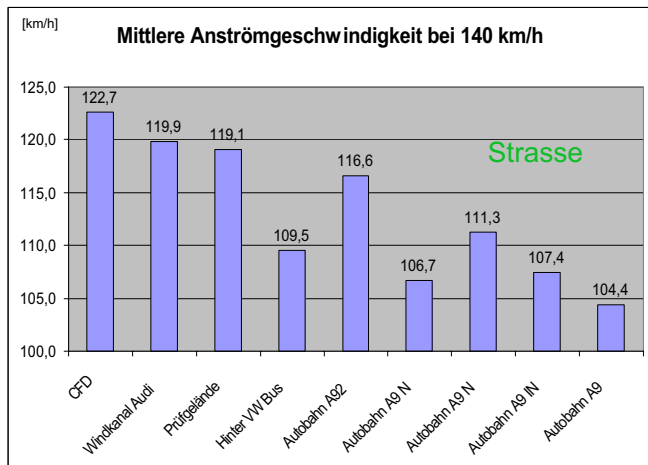


Abbildung 1: Mittlere Anströmgeschwindigkeit bei verschiedenen Straßenmessungen, CFD und Windkanal. Konstantfahrt 140 km/h.

Vergleicht man das Innengeräuschspektrum im Windkanal mit Messungen auf der Strasse (wenig Verkehr, kaum Wind), so ergeben sich bei höheren Geschwindigkeiten sehr gute Übereinstimmungen in den mittleren Terz-Spektren.

Zeitabhängige Analysen – Korrelation Strömung und Akustik

Abbildung (2) zeigt die Anströmung auf das Fahrzeug bei einer Straßenmessung (blaue Kurve), sowie das gemessene Innengeräusch in der 4 kHz Oktave (rote Kurve). Es zeigen sich zwei Effekte:

A) Langsame, aber große Schwankungen in der Anströmung; die gleichen Schwankungen zeigen sich auch im Innengeräusch. Die Änderung des Pegels im Innengeräusch hängt direkt von der Änderung der Anströmung ab. Die mit Formel (1) nur aus der Anströmung berechnete Schalldruckpegeländerung Δ um einen Mittelwert zeigt die gute Übereinstimmung mit der tatsächlichen Akustikmessung (grüne Kurve). Hier ist V_{tot} die gemessene Anströmung und v_0 eine mittlere Anfangsgeschwindigkeit. Diese großen, deutlich hörbaren Schwankungen im Geräusch resultieren direkt aus der sich zeitlich ändernden Anströmung. Dieses Verhalten ist in der Entwicklung im Windkanal mit niedrigem Turbulenzgrad abgedeckt.

B) Schnelle Schwankungen in der Anströmung, wie sie besonders bei der Fahrt hinter einem Fahrzeug oder im dichten Verkehr auftreten. Dies führt zu schnellen Fluktuationen im Innengeräusch. Turbulenz mit kleinen turbulenten Längenskalen ist hier die Ursache. Diese können im Windkanal Pininfarina mit den Turbulenzerzeugern generiert werden.

$$\Delta[dB] = 10 \cdot \log\left(\frac{V_{tot}(t)}{v_0}\right)^{5,5} \quad (1)$$

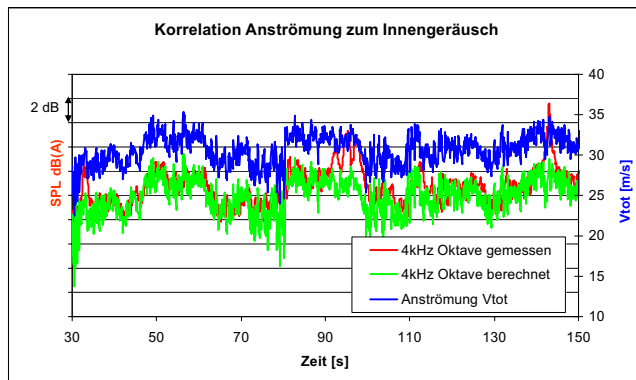


Abbildung 2: Korrelation der instationären Anströmung zum Innengeräusch in der 4 kHz Oktave.

Zur weiteren Analyse dieser schnellen Fluktuationen im Geräusch wurden Modulationsanalysen in der 4 kHz Oktave durchgeführt (Abbildung 3). Hierbei zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Modulationsgrades im Innengeräusch vom Turbulenzgrad der gemessenen Anströmung. Dies wurde auch in Hörvergleichen bestätigt.

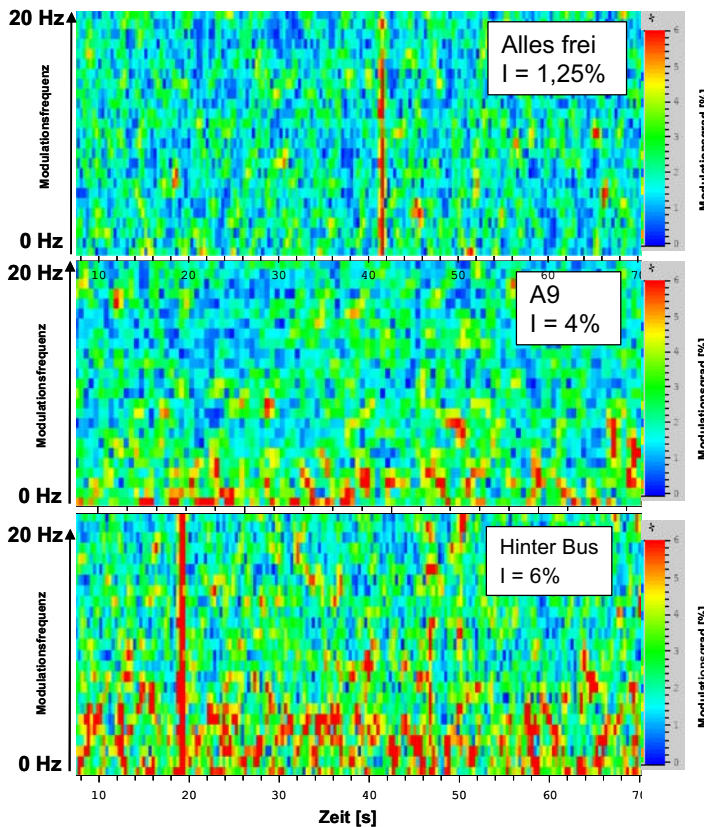


Abbildung 3: Modulationsspektren des Innengeräusches in der 4 kHz Oktave bei verschiedenen Verkehrssituationen I: Turbulenzintensität der Anströmung

Kontakt: Hans.Miehling@audi.de

Literatur

Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse finden sie in

[1] N. Lindener, H. Miehling, A. Cogotti, F. Cogotti, M. Maffei, Aeroacoustic Measurements in Turbulent Flow on the Road and in the Wind Tunnel, SAE paper n. 2007-07B-189, SAE Congress, Detroit, April 2007