

# Korrelation turbulenter Anströmung zum Fahrzeuginnengeräusch im Straßenversuch

Jasmin Dörr<sup>1</sup>, Jan Schulze<sup>2</sup>, Jörn Sesterhenn<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BMW AG, 80788 München, E-Mail: [jasmin.doerr@bmw.de](mailto:jasmin.doerr@bmw.de)

<sup>2</sup> BMW AG, 80788 München, E-Mail: [jan.schulze@bmw.de](mailto:jan.schulze@bmw.de)

<sup>3</sup> Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, 10623 Berlin, E-Mail: [joern.sesterhenn@tu-berlin.de](mailto:joern.sesterhenn@tu-berlin.de)

## 1. Einleitung

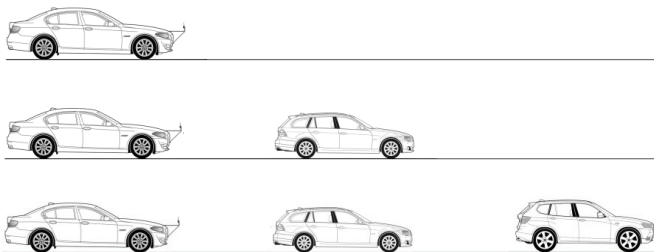
Die Fahrzeug-Aeroakustik bei einer Straßenfahrt unterscheidet sich stark von einer Messung im Akustikwindkanal. Im Straßenversuch können dabei im Fahrzeuginnengeräusch Modulationen auftreten. Aus diversen Untersuchungen, u.a. [1], [2], ist bekannt, dass zwischen den Fluktuationen in der Anströmung und im resultierenden Fahrzeuginnengeräusch ein Zusammenhang besteht. Im Straßenversuch, u.a. [2], konnte bereits nachgewiesen werden, dass unter einer turbulenten Anströmung vor allem Modulationen im Bereich unter 5 Hz auftreten.

Darüber hinaus ist bekannt [3], dass das menschliche Ohr am sensitivsten im höheren Frequenzbereich (zwischen 2 kHz bis 4 kHz) auf Fluktuationen mit einer Modulationsfrequenz von 4 Hz reagiert. Aufgrund dessen wurde der Fokus dieser Arbeit bei den akustischen Auswertungen auf diesen Bereich gelegt.

## 2. Durchführung der Messungen

Im realen Straßenversuch besteht aufgrund der variierenden Verkehrssituation das Problem der Reproduzierbarkeit der einzelnen Messungen. Aus diesem Grund wurden die im Folgenden erwähnten Versuche gezielt auf der Messstrecke durchgeführt um bestimmte Verkehrssituationen reproduzierbar darzustellen.

Dabei werden zum einen Versuche auf der freien Messstrecke (Freifahrt) und zum anderen Versuche mit vorausfahrenden Fahrzeugen (ein Fahrzeug voraus, zwei Fahrzeuge voraus) durchgeführt (siehe Abbildung 1).

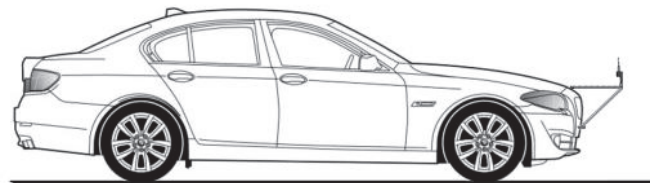


**Abbildung 1:** Skizze des Versuchsaufbaus: Freifahrt, ein Fahrzeug voraus, zwei Fahrzeuge voraus.

Der mittlere Abstand der einzelnen Fahrzeuge beträgt dabei 80 m. Alle Messungen werden bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 150 km/h durchgeführt.

Das Messfahrzeug wird dabei zum einen mit akustischer Messtechnik – einem Kunstkopf und einem Außenohr-Mikrofon auf Beifahrer-Seite – und zum anderen mit 3D-Strömungs-Messtechnik – einer Cobra-Sonde (Hersteller: Turbulent Flow Instrumentation) mittig vor dem Fahrzeug – ausgestattet. Die folgenden Auswertungen beziehen sich dabei auf die Messergebnisse des Außenohr-Mikrofons und der Cobra-Sonde.

Um den zeitgleichen Start beider Messsysteme sicher zu stellen, wird ein Trigger installiert.



**Abbildung 2:** Anbindung Cobra-Sonde an Messfahrzeug.

### 2.1 Ergebnisse der Strömungs-Messungen

In Abbildung 3 ist der Zusammenhang der Längenskala  $L_x$  und des Turbulenzgrades  $Tu_x$  (in Hauptströmungsrichtung  $x$ ) aufgetragen. Die Berechnung der Längenskalen beruht auf der VonKarman-Methode [5]. Der Turbulenzgrad repräsentiert dabei das Verhältnis von Geschwindigkeitsschwankungen und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit bezogen auf die jeweilige Richtungskomponente.

Es zeigt sich ein typisches Verhalten beider Größen je nach Strömungszustand vor dem Fahrzeug (siehe auch [4]). Hierbei ergeben sich bei einer Freifahrt die größten Längenskalen zusammen mit den kleinsten Turbulenzgraden. Fahren Fahrzeuge voraus, sinken die Längenskalen fast um eine Größenordnung, der Turbulenzgrad steigt. Es ist zu erkennen, dass sich die Messergebnisse in Abhängigkeit der vorausfahrenden Fahrzeuge sehr ähneln.

Für weitere Auswertungen wird exemplarisch jeweils eine Messung von jedem Fahrzustand ausgewählt (repräsentiert durch die ausgefüllten Kreise in Abbildung 3).

In Abbildung 4 ist die turbulente kinetische Energie in Form von Leistungsdichtespektren der zuvor in Abbildung 3 ausgewählten Messungen dargestellt. Zur Validierung wird zusätzlich das „Kolmogorov-5/3-Gesetz“ aufgetragen.

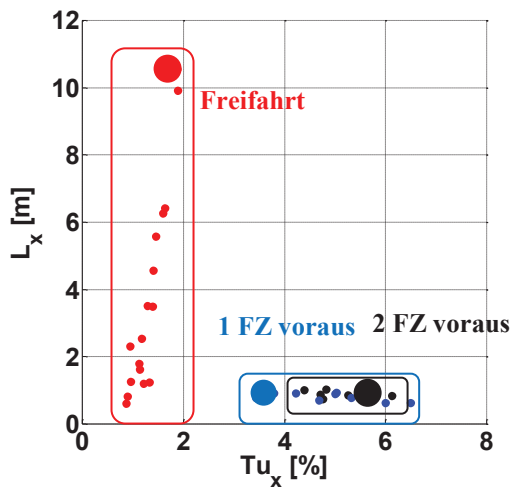


Abbildung 3: Zusammenhang der Größe der Längenskala und des Turbulenzgrades in x-Richtung unter verschiedenen Fahrzuständen.

Aus Abbildung 4 lässt sich schließen, dass die Strömung bei einer Freifahrt die geringste turbulente kinetische Energie aufweist, was mit Abbildung 3 korreliert, da in diesem Zustand die geringsten Turbulenzgrade auftreten.

Sobald Fahrzeuge voraus fahren, steigt die turbulente kinetische Energie entsprechend dem Turbulenzgrad an. Zu erkennen ist hierbei, dass der Unterschied zwischen einem vorausfahrenden Fahrzeug und zwei vorausfahrenden Fahrzeugen im Vergleich zur Freifahrt gering ist. Im Fall der vorausfahrenden Fahrzeuge ist eine gute Übereinstimmung mit der für isentrope Turbulenz geltenden Steigung von  $-5/3$  zu erkennen.

Der Anstieg der Spektren bei einem und zwei vorausfahrenden Fahrzeugen im hochfrequenten Bereich ist hierbei auf ein hochfrequentes Rauschen der Messeinrichtung zurückzuführen.

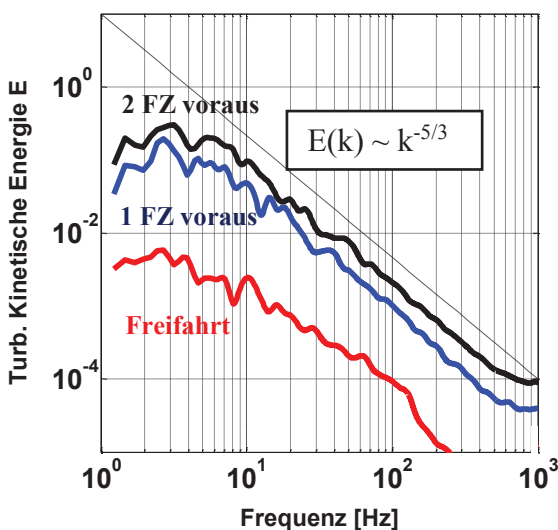


Abbildung 4: Leistungsdichtespektrum der Geschwindigkeits-Schwankungen in x-Richtung unter verschiedenen Fahrzuständen.

## 2.2 Ergebnisse der Akustik-Messungen

Mit Hilfe von Hörversuchen werden die für jeden Fahrzustand charakteristischsten Messungen identifiziert. Anschließend erfolgen erneut Hörversuche mit den entsprechend ausgewählten Signalen und schrittweise darüber gelegten 1-Oktav-Bandpassfiltern.

Daraus ergibt sich, dass sich die Modulation des Fahrzeuginnengeräusches aufgrund der turbulenten Anströmung vor allem in den Bändern von 500 Hz bis 4 kHz niederschlägt.

Ein weiterer Vergleich der einzelnen Bänder untereinander liefert das Ergebnis, dass diese Modulationen im 2 kHz Band am dominantesten auftreten.

In Abbildung 5 ist die Frequenzanalyse der Schalldruckpegel-Schwankungen des 2 kHz-Oktavbandes aufgetragen. Ein Vergleich der Fahrzustände Freifahrt und vorausfahrender Fahrzeuge zeigt, dass vor allem Frequenzanteile unter 5 Hz bei einer turbulenten Anströmung vorherrschend sind.

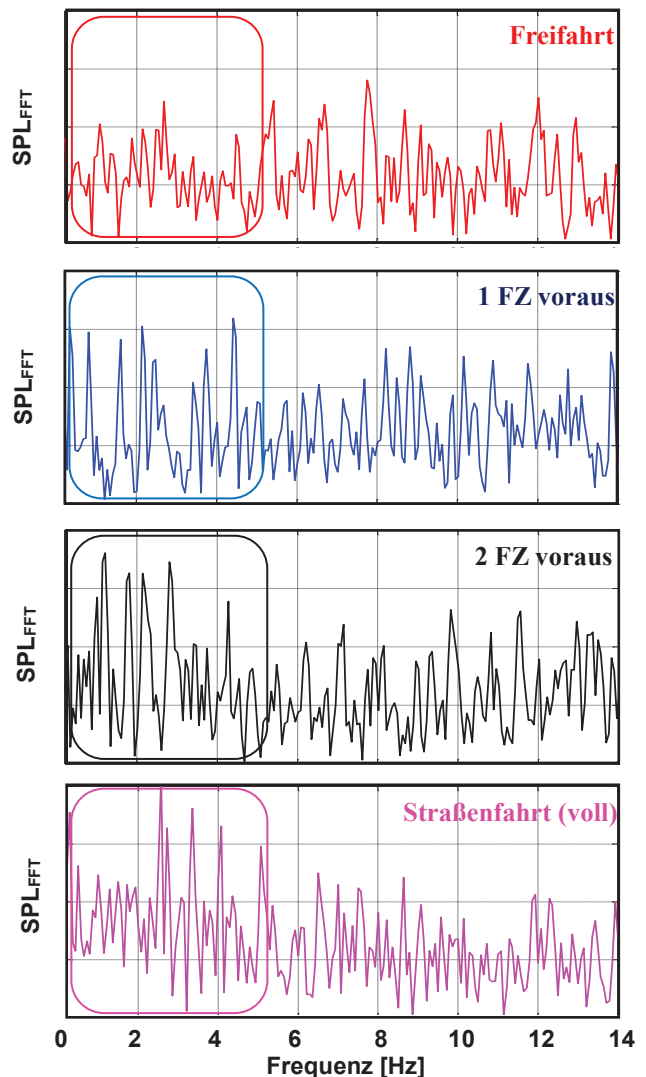


Abbildung 5: Frequenzanalyse der Schwankungen im 2 kHz-Oktavband unter verschiedenen Fahrzuständen (Diagramme jeweils gleich skaliert).

Dabei erzeugt die Vorfahrt eines Fahrzeuges und die zweier Fahrzeuge ähnliche Frequenzanteile.

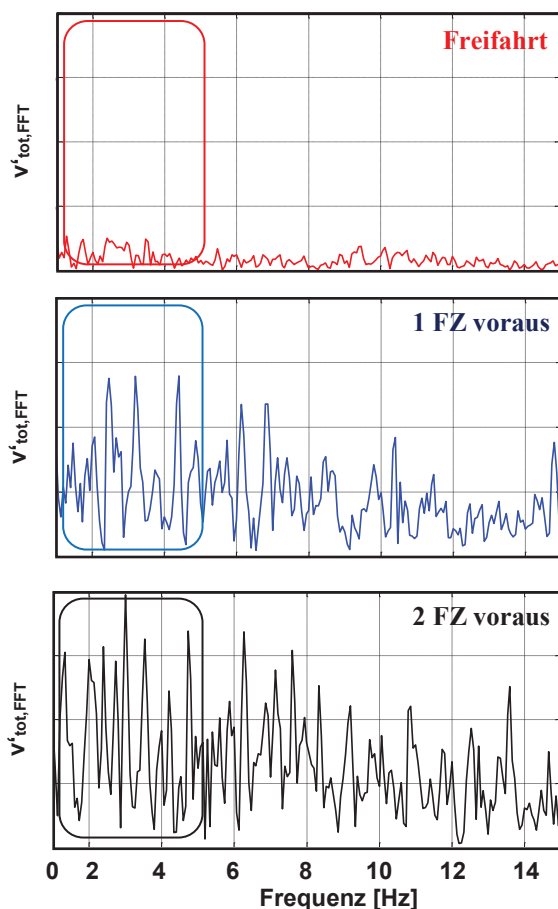
Zum Vergleich der auf der Messstrecke aufgenommenen Messungen wird eine Messung aufgetragen, welche auf einer Autobahn bei voller Straße aufgenommen wurde. Es zeigt sich, dass hier ebenso dominierende Frequenzanteile unter 5 Hz vorhanden sind.

### 2.3 Vergleich beider Messungen

Abschließend erfolgt ein Vergleich der in Abbildung 5 aufgetragenen Frequenzanalyse mit der Frequenzanalyse der Geschwindigkeitsschwankungen in x-Richtung in Abbildung 6. Hierbei lassen sich ebenso tieffrequente, dominante Frequenzanteile bei einer turbulenten Anströmung erkennen.

Bei einer Freifahrt sind diese Anteile erwartungsgemäß sehr gering und dominierende Frequenzanteile besitzen nur sehr geringe Amplituden.

Sobald Fahrzeuge voraus fahren, werden dominante Frequenzanteile sichtbar und vergrößern sich mit der Anzahl der vorausfahrenden Fahrzeuge. Dabei erzeugen zwei Fahrzeuge mehr dominante Frequenzanteile als ein Fahrzeug, was auch der leicht steigende Turbulenzgrad aus Abbildung 3 bestätigt.



**Abbildung 6:** Frequenzanalyse der Geschwindigkeitsschwankungen in x-Richtung unter verschiedenen Fahrtzuständen (Diagramme jeweils gleich skaliert).

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass eine turbulente Anströmung einer auf der Messstrecke simulierten Autobahn-Fahrt Schwankungen im Fahrzeuginnengeräusch bis 5 Hz erzeugt.

Hörversuche zeigten, dass „störende“ Modulationen vor allem im 2 kHz-Oktav-Band auftreten. Damit liegt sowohl die Art der Modulation als auch die Höhe der Modulationen in einem Bereich, in welchem das menschliche Gehör am sensitivsten reagiert.

Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass diese Modulationen auch bei reproduzierbaren Versuchen auf der Messstrecke gezielt erzeugbar sind und gegebenenfalls Autobahn-Fahrten ersetzen können. Diese Modulationen konnten bereits mit einem vorausfahrenden Fahrzeug erzeugt und nachgewiesen werden.

Somit wird eine Bewertung des turbulenten Fahrzeuginnengeräusches kontrolliert durch ein vorausfahrendes Fahrzeug möglich und unter gleich bleibenden Bedingungen reproduzierbar.

Im Folgenden muss nun eine Objektivierung des Phänomens „Turbulenzanfälligkeit“ durch diverse Kennwerte erfolgen. Unterstützend wird eine Gewichtung der einzelnen Kennwerte durch eine subjektive, psychoakustische Bewertung durchgeführt.

### Literatur

- [1] Lindener, N., Miehl, H., Cogotti, A., Cogotti, F., Maffei, M. (2007): Aeroacoustic Measurements in Turbulent Flow on the Road and in the Wind Tunnel. SAE paper 2007-01-1551.
- [2] Oettle, N., Sims-Williams, D., Dominy, R., Darlington, C., Freeman, C., Tindall, P. (2010): The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise. SAE paper 2010-04-12.
- [3] Zwicker, E., Fastl, H. (2007): Psychoacoustics. Facts and Models. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- [4] Wordley, S., Saunders, J. (2008): On-road Turbulence. SAE paper 2008-01-0475
- [5] Von Kármán, T. (1948): Progress in the statistical theory of turbulence. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 34, 530-539.