

Der Einfluss turbulenter Strömung auf das Fahrzeuginnengeräusch - Ein Vergleich von Straßen- und Windkanalmessungen

Matthias Riegel¹, Jochen Wiedemann², Martin Helfer³

¹FKFS, D-70569 Stuttgart, Germany, Email: riegel@fkfs.de

²FKFS, D-70569 Stuttgart, Germany, Email: wiedemann@fkfs.de

³FKFS, D-70569 Stuttgart, Germany, Email: helfer@fkfs.de

Einleitung

Die Entwicklung bezüglich des Windgeräusches im Innenraum von Fahrzeugen erfolgt vorzugsweise in aeroakustischen Windkanälen unter reproduzierbaren Strömungsverhältnissen. Die Strömung im Stuttgarter 1:1-Windkanal weist beispielsweise bei leerer Messstrecke einen Turbulenzgrad T_u kleiner als 0,3% auf [1].

Das durch die Umströmung des Fahrzeugs verursachte Windgeräusch ist abhängig von Geschwindigkeit und Richtung der Anströmung. Der Strömungsvektor ist unter realen atmosphärischen Bedingungen jedoch örtlich und zeitlich nicht konstant, die Turbulenzgrade variieren sehr stark [2], [3].

Objektive und subjektive Bewertungen sollen klären, ab welchem kritischen Turbulenzgrad sich Unterschiede zwischen Windkanal- und Straßenmessungen ergeben. Es wird ein Verfahren gezeigt, mit welchem die Empfindlichkeit eines Fahrzeuges auf turbulente Anströmung abgeschätzt werden kann.

Turbulenzzeugung im Windkanal

Um im Windkanal Turbulenzgrade vergleichbar zu den Straßenmessungen im Bereich zwischen 3-7% zu erhalten, wurden rechteckige Platten (1m²) als Störkörper quer zur Strömung auf Höhe der Strömungsgleichrichter vor der Düse eingebracht. Die Abmessung der zusammengesetzten Platten betrug 6x4m². Der damit erreichte Turbulenzgrad in Längsrichtung am Fahrzeug beläuft sich auf 3.1% und ist nahezu unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal. Die Art der Turbulenzzeugung führt zu Wirbeln geringer Abmessung mit hohen charakteristischen Turbulenzfrequenzen im Vergleich zu den typischen Frequenzen bei Fahrt unter atmosphärischen Bedingungen (0.25-2.5Hz, [4]).

Messtechnik und Versuchsdurchführung

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte mit einer 4-Loch TFI¹-Sonde. Diese hat eine zentrale Bohrung, die aus dem Staudruck die Geschwindigkeit in Fahrtrichtung bestimmt, und drei um 45° abgewinkelte Bohrungen außen um den Richtungsvektor bestimmen zu können. Die Sonde besitzt eine relativ konstante Übertragungsfunktion im Bereich bis 1500 Hz, wobei die Leitungsresonanz korrigiert wird. Die Genauigkeit beträgt +/- 0.5 m/s, die Winkelabweichung liegt bei 0.2 Grad.

Die Bestimmung der globalen Anströmgeschwindigkeit sollte an einer Position erfolgen, an welcher der Fahrzeug-einfluss auf die Strömung möglichst gering ist.

Untersuchungen [5] haben gezeigt, dass durch die A-Säulenströmung vor allem im Bereich der Seitenscheiben die lokale Turbulenz in der Strömung deutlich höher ist als in der Anströmung selbst. Daher wurde die Sonde in der Mittelachse des Versuchsfahrzeuges (**Bild 1**) auf dem Schiebedach angebracht (Höhe 350 mm).

Für die Analyse der Anströmungsbedingung kann der Turbulenzgrad herangezogen werden. Er ist definiert als:

$$T_u = \frac{\sqrt{(\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2)}}{\bar{u}}$$

Darin sind \dot{u}^2 , \dot{v}^2 , \dot{w}^2 die mit Hilfe der TFI-Sonde bestimmten mittleren Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung und \bar{u} die mittlere Anströmgeschwindigkeit.

Die Sonde ist mit einem spiralförmig angeordneten Schlauch umwickelt, wodurch tonale Störgeräusche vermieden werden. Die Strömungsgeschwindigkeit am Ort der Sonde ist um 15% höher gegenüber der ungestörten Strömung. Der Turbulenzgrad T_u beträgt 0.5%.

Das Innengeräusch wird am rechten Ohr eines Kunstkopfes auf der Beifahrerseite simultan mit dem Geschwindigkeitssignal der Sonde aufgezeichnet.



Bild 1 Versuchsfahrzeug mit Messtechnik

Datenanalyse

Das akustische Signal des Kunstkopfhöres wurde als gemittelttes Frequenzspektrum sowie als Spektrum über der Zeit ausgewertet. Um Informationen über die Stärke und Frequenz der Modulationen im Schallsignal zu erhalten, wurde eine Modulationsanalyse durchgeführt. Amplitudenmodulierte Schalle werden unter einer Frequenz von 5 Hz als fluktuierendes Geräusch wahrgenommen, höherfrequente

¹ Turbulent Flow Instrumentation, Australia

Modulationen über 20 Hz werden als Rauigkeit bezeichnet. Die Modulationsanalyse berechnet das Spektrum der Einhüllenden eines bandpassbegrenzten Signals unter Verwendung der Hilbert-Transformation.

Um den Einfluss von Motor- und Reifen-Fahrbahngeräuschen zu minimieren, wurde für die Modulationsanalyse das Innengeräusch von 4kHz-8kHz, in diesem Frequenzbereich dominiert das aerodynamische Geräusch, bandpass- gefiltert.

Messergebnisse

Der Vergleich verschiedener Anströmbedingungen (**Bild 2**) von Windkanal- und Straßenmessungen mit unterschiedlichen Turbulenzgraden zeigt, dass die Straßenmessungen niederfrequente Schwankungen insbesondere der Anströmgeschwindigkeit bei höheren Turbulenzgraden ($Tu=7.4\%$) aufweisen, welche sich auch auf das Modulationsspektrum auswirken (**Bild 3**) und mit subjektiven Beurteilungen einhergehen.

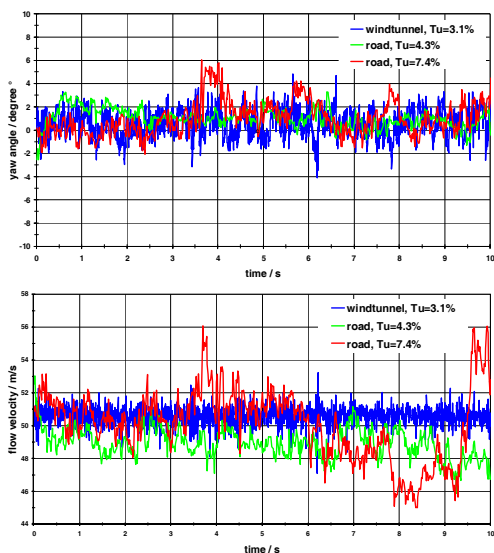


Bild 2 Verlauf von Anströmgeschwindigkeit und -winkel im Windkanal und auf der Straße bei unterschiedlichen Turbulenzgraden.

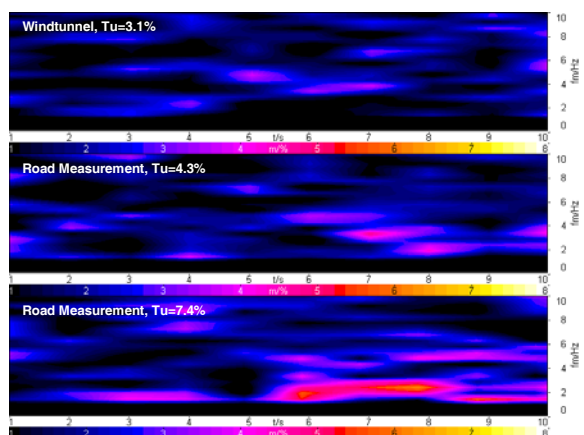


Bild 3 Modulationsspektren von Windkanal- und Straßenmessungen (Frequenzband: 4-8 kHz).

Eine Möglichkeit die akustische Empfindlichkeit eines Fahrzeuges bei turbulenter Anströmung im Windkanal zu untersuchen ist die Messung des Innengeräusches für verschiedene Anströmwinkel („Winkelsweep“). **Bild 4** zeigt beispiel-

haft das Innengeräusch am Fahrersitz links für ein SUV-Fahrzeug bei Anströmwindeln von -20° – $+20^\circ$. Die Breite des Bereiches mit nahezu konstantem Schalldruckpegel sowie die Stärke des Pegelanstiegs bei zunehmendem Anströmwinkel (Lee- und Luvseite) geben Hinweise darüber, wie empfindlich ein Fahrzeug auf Turbulenzen infolge sich wechselnder Anströmwinkel reagiert. Auf diese Weise können unterschiedliche Fahrzeuge miteinander verglichen werden. Akustisch günstige Fahrzeuge weisen einen breiteren Bereich konstanten Pegels und geringere Anstiege im Lee- und Luv auf als akustisch schlechter bewertete Fahrzeuge.

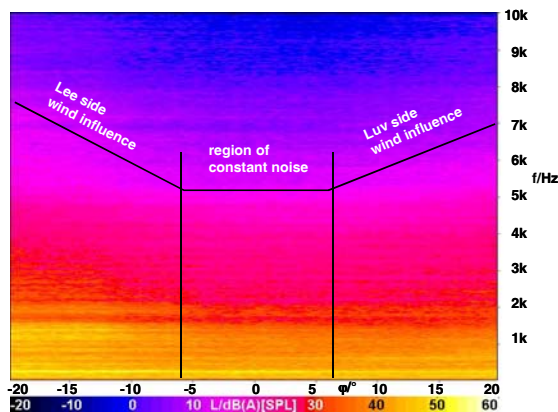


Bild 4 Innengeräuschverlauf (Fahrersitz, linkes Mikrofon) über dem Anströmwinkel.

Zusammenfassung

Es wurden Windkanal- und Straßenmessungen mit unterschiedlichen Turbulenzgraden durchgeführt. Schwankungen der Anströmung machen sich bei höheren Turbulenzgraden im Innengeräusch deutlich bemerkbar, das Modulationsspektrum ist hierfür eine geeignete Analyse, die mit der subjektiven Beurteilung übereinstimmt.

Die Veränderung des Innengeräusches eines Fahrzeuges unter turbulenter Anströmung, bedingt durch Änderungen der Anströmrichtung, können durch einen „Winkelsweep“ detektiert werden.

Literatur

- [1] Künstner, R.; Potthoff, J.; Essers, U.: The Aero-Acoustic Wind Tunnel of Stuttgart University. SAE-Paper 950625, 1995.
- [2] Watkins, S.: Gusts and Transients. In: Automobile Wind Noise and Its Measurement, Part 2. SAE SP-1457, ISBN 0-7680-0389-X, 1999.
- [3] Watkins, S.; Riegel, M.; Wiedemann, J.: The Effect of Turbulence on Wind Noise: A Road and Wind Tunnel Study. In: Bargende, M.; Wiedemann, J. (Ed.): 4. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, 20.-22.2.2001. Renningen: Expert-Verlag, 2001. ISBN 3-8169-1981-2.
- [4] Watkins, S.; Saunders, J. W.: Turbulence Experienced by Road Vehicles under Normal Driving Conditions. SAE Technical Paper 950997.
- [5] Kaltenhauser, A. - Windgeräuschestehung bei laminarer und turbulenter Strömung - Stuttgarter Symp., 2003, S. 290-311 - 2003