

Eine neue Metrik für PKW-Windgeräusche aus Messungen auf öffentlichen Straßen auf Basis statistischer Korrelationen

Jörg Bienert¹, Karola Krehl¹

¹ Technische Hochschule Ingolstadt, 85049 Ingolstadt, E-Mail: joerg.bienert@thi.de

Einleitung

Die Optimierung des Fahrzeuginnengeräusches bei PKW ist nach wie vor eines der Hauptarbeitsgebiete für Akustikingenieure. Dabei geht es neben der Geräuschreduzierung auch um das Sounddesign. Im Rahmen der drei Hauptbeiträge des PKW-Geräusches sind die Roll- und Windgeräusche als breitbandige statistische Signale im Gegensatz zu den Antriebsgeräuschen nicht klangbildend. Sie sollen als Hintergrundgeräusch möglichst reduziert werden.

Rollgeräusche treten bereits bei geringen Geschwindigkeiten auf, so dass sie bei langsamen Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit analysiert und optimiert werden können. Alternativ zu Messungen auf speziellen Straßenoberflächen auf Testgeländen sind Messungen auf öffentlichen Straßen eine erstrebenswerte Vereinfachung der praktischen Durchführung. Eine Methode zur Beseitigung von Störgeräuschanteilen auf öffentlichen Straßen wurde in [2] vorgestellt.

Bei Windgeräuschen gestaltet sich der Ansatz über Straßenmessungen bisher als ungelöst, da Windgeräusche erst bei höheren Geschwindigkeiten signifikant werden und es somit keine Fahrbedingung gibt, diese isoliert zu messen. Die Aufgabe ist nach Stand der Technik nur in einem akustischen Windkanal lösbar. Der Aufwand dafür ist jedoch immens, so dass eine Prüfstandstunde mehrere Tausend Euro erfordert. Die Windgeräuschuntersuchung auf öffentlichen Straßen wäre also eine weitreichende Verfahrensverbesserung.



Abbildung 1: Vergleich FFT Straßenmessung mit Windkanal

Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf Korrelationsanalysen der Strömungsgeschwindigkeit außerhalb des Fahrzeugs mit dem Innengeräusch. Wie jeder aus eigener Erfahrung kennt, ist das Strömungsgeräusch auch bei konstanter Geschwindigkeit etwas moduliert, da die Strömung aufgrund von Windbedingungen oder anderen Verkehrsteilnehmern schwankt. Stellt man die gemessene Strömungsgeschwindigkeit dem gemessenen Schalldruckpegel gegenüber, so ergibt sich nach statistischer Regression der Gradient des Innengeräuschpegels L

gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit u bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit v :

$$\frac{dL}{du}_{v=const}$$

Zukünftiges Ziel soll die Ermittlung des Windgeräuschpegels für die Fahrgeschwindigkeit v_e aus der Integration des Gradienten sein:

$$L = \int_0^{v_e} \frac{dL}{du}_{v=const} dv$$

Windkanalmessungen könnten somit ersetzt werden.

Aufbau der Datenerfassung und Messung

Grundlage des Messverfahrens ist die synchrone und hochfrequente Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit und des Fahrzeuginnengeräusches. Die Schalldruckmessung ist Standard. Lediglich die Mikrofonposition sollte ausgewählt werden. Grundsätzlich eignet sich die „Fahrerohrposition“. Zusätzlich wurde eine scheibennahe Position am Innenspiegel aufgezeichnet, die eine stärkere Korrelation erwarten lässt.

Als Strömungssensor wurde ein Hitzdrahtsensor gewählt, der die Strömung in der Nähe der oberen Windschutzscheibenkante erfasst. Dieser sollte sich außerhalb der Grenzschicht befinden. Den Aufbau zeigt Abb. 2.



Abbildung 2: Montage des Strömungssensors

Der Strömungssensor ist an das SVMtec-Messsystem angeschlossen, welches außerdem die parallele Datenerfassung des Mikrofons übernimmt. Die Abtastrate

sollte grundsätzlich den hörbaren Bereich abdecken. Aus Gründen der Datenreduktion für die Fahrtmessungen über mehrere Minuten wurde die Abtastrate auf 10kHz reduziert. Dies ist für die Erfassung des wesentlichen Spektralbereichs des Windgeräusches ausreichend.

Die Daten wurden für einen Audi A6 Avant und einen Golf VII auf der Autobahn A9 zwischen Ingolstadt und dem Kreuz Hallertau bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und trockenen Bedingungen erfasst. Dabei herrschte zum Teil starker Verkehr mit vielen LKWs.

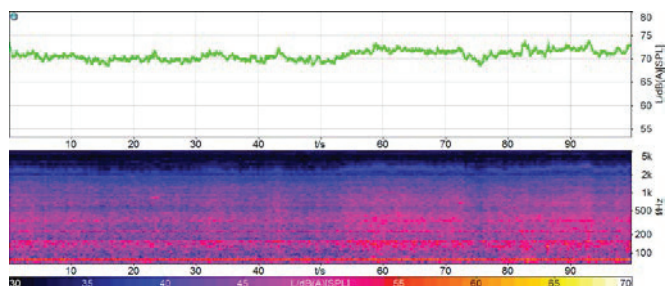


Abbildung 3: Fluktuierender Schalldruckpegel mit zugehörigem FFT-Spektrum

Statistische Korrelation

Die gemessenen Rohdaten werden vor der Korrelationsanalyse vorverarbeitet.

Die Schalldruckpegel werden auf die übliche Weise bestimmt. Da die Windgeräuschanteile bei höheren Frequenzen auftreten eignet sich grundsätzlich eine A-Bewertung, die die Rollgeräuschanteile und Motorordnungen wesentlich reduziert. Eine Hochpassfilterung mit einer Eckfrequenz von z.B. 500 Hz ist ebenfalls geeignet. Anschließend werden die Pegel des gefilterten Signals aus den Zeitblöcken mit einer Länge von 1/10s, also in etwa der Einstellung „fast“, errechnet.

Bei den Strömungsgeschwindigkeiten u muss zunächst einmal festgestellt werden, dass diese natürlich nicht den Fahrgeschwindigkeiten v entsprechen. Der umströmte Karosseriekörper beschleunigt die Strömung. Hierbei wird angenommen, dass zwischen der Strömungsgeschwindigkeit an der Messposition und der Fahrgeschwindigkeit ein fester Faktor vorliegt. Für das Verfahren ist es also grundsätzlich möglich, mit den Strömungsgeschwindigkeiten oder mit den auf die Fahrgeschwindigkeit korrigierten Werten zu rechnen. Die Korrelation bleibt erhalten.

Für die Korrelation sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten für dieselben Zeitblöcke wie für die Schallpegel, hier 1/10s, zu verwenden. Das Zeitsignal wird deshalb zuvor noch auf die Anteile unter 50 Hz tiefpassgefiltert.

Insgesamt ergibt sich eine Datenbasis aus Abb. 4.

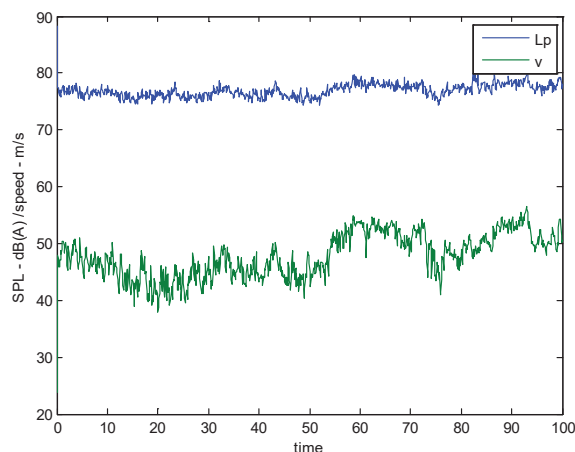


Abbildung 4: Für die Korrelation vorverarbeitete Messdaten

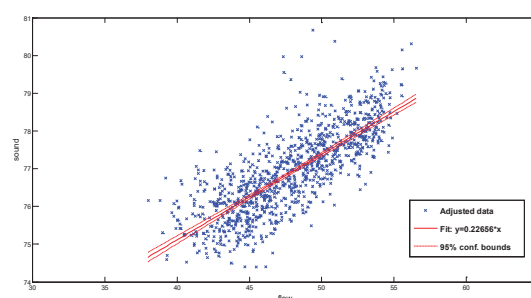


Abbildung 5: Ergebnis der Korrelation

Die Korrelation in Abb. 5 lässt eine hinreichend klare Regressionsgerade erkennen. Der Wert der Steigung ist die eigentliche Performancemetrik für das Windgeräusch und beträgt im gezeigten Beispiel $0,226 \text{ dB/ms}^{-1}$. Je flacher die Gerade verläuft, umso günstiger ist das Windgeräuschverhalten. Die Güte des Datenfits lässt sich auch anhand der Residuenplots ermitteln. Normalverteilte Residuen sind anzustreben.

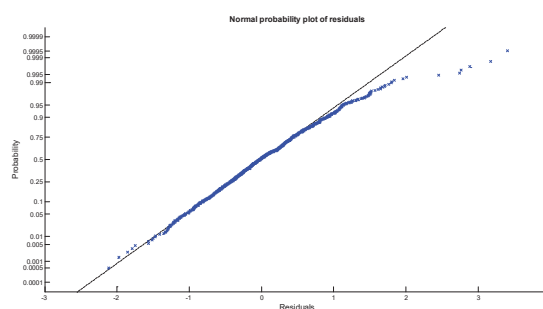


Abbildung 6: Residuen der Regression

Da die Untersuchungen auf einer stark befahrenen Autobahn stattgefunden haben, ist die Robustheit der Analyse eine wichtige Erkenntnis. Störungen waren insbesondere durch andere Verkehrsteilnehmer, wechselnde Fahrbahnbeläge und Fahrbahnstöße gegeben. Solange die Störungen nur mit dem Schallpegel und nicht mit der Strömungsgeschwindigkeit korrelieren, vergrößert sich zwar die Streuung bei der Korrelation, aber die Steigung der Regressionsgeraden bleibt erhalten.

Vergleich der Windgeräuschperformance

Die Metrik der Regressionsgeraden bei einer konstanten Geschwindigkeit mit der Einheit dB/ms^{-1} ist für sich genommen noch keine so aussagekräftige Größe. Sie eignet sich jedoch als vergleichende Benchmarkgröße für den Vergleich verschiedener Fahrzeuge.

Die Untersuchung wurde auf drei Fahrzeugkonfigurationen ausgedehnt.

- VW Golf VII
- Audi A6 Avant
- Audi A6 Avant, modifiziert in Form eines um 2mm geöffneten vorderen Seitenfensters

Die Vergleichsmessungen wurden auf der Autobahn A9 bei annähernd konstanten Geschwindigkeiten zwischen 80 und 130 km/h durchgeführt.

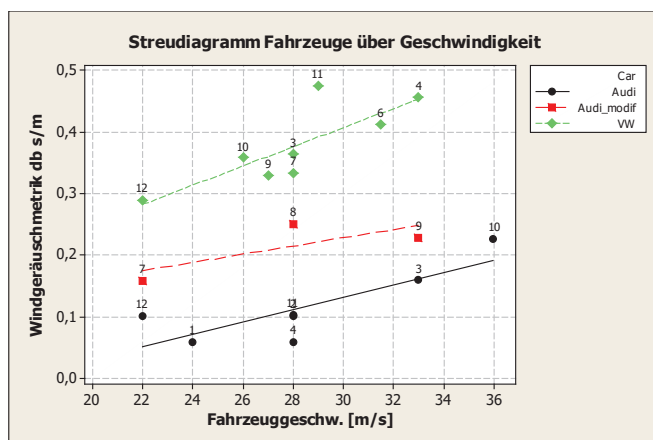


Abbildung 7: Benchmark für verschiedene Fahrzeuge über der Fahrgeschwindigkeit

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse für Windgeräuschempfindlichkeiten, also die Steigungen der Regressionsgeraden. Eine triviale Erkenntnis lässt sich leicht verifizieren. Für einen gegebenen Fahrzeugzustand muss der Gradient mit höherer Fahrgeschwindigkeit zunehmen.

Zum anderen zeigt sich der Unterschied zwischen den Fahrzeugkonfigurationen. Der Audi A6 Avant zeigt die beste Windgeräuschperformance, mit minimal geöffnetem Fensterspalt nimmt diese ab. Der VW Golf zeigt etwas schlechtere Werte, was den Erwartungen der Fahrzeugklasse entspricht.

Zusammenfassung

Das vorgestellte Verfahren zeigt eine eindeutige Korrelation der Schallpegelschwankungen und den Strömungsfluktuationen. Die somit gewonnene Metrik kann zum Vergleich verschiedener Fahrzeuge und Fahrzeugkonfigurationen verwendet werden. Somit wurde eine Alternative zu aufwändigen Windkanalversuchen entwickelt.

Es sind für die Zukunft weitere Untersuchungen geplant, die insbesondere die Robustheit der Messungen weiter optimieren sollen. Dazu sind Fragen nach dem Einfluss der

Straßen- und Verkehrsbedingungen als auch die der Position der Strömungssonde zu beantworten.

Eine weitere Erweiterung ist das Fahren mit variablen Geschwindigkeiten, so dass nach feinen Klassierungen eine quasi kontinuierliche Metrik über der Fahrgeschwindigkeit entsteht. Daraus könnte dann der Gesamtpegel des Windgeräuschanteils integriert werden.

Literatur

- [1] Sachs, L.: Angewandte Statistik, 8. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (1997)
- [2] Bienert, J.: Elimination von Störgeräuschen bei Innengeräuschmessungen von PKW, DAGA Nürnberg (2015)