

Einfluss turbulenter Anströmung und fahrzeugerregter Turbulenz auf das Windgeräusch im Fahrzeug

Domenic Staron, Matthias Riegel, Reinhard Blumrich, Jochen Wiedemann
Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

Einleitung

Die aeroakustische Entwicklung von Fahrzeugen findet aus Gründen der Reproduzierbarkeit vorrangig in Aeroakustik-Windkanälen bei stationärer Anströmung statt. Auf der Straße erfahren Fahrzeuge allerdings instationäre, turbulente Strömungsverhältnisse. Es resultieren zeitliche Veränderungen des Windgeräusches im Fahrzeug, die den subjektiven Qualitätseindruck der Insassen beeinflussen und somit bei der Fahrzeugentwicklung zu berücksichtigen sind.

Da Straßenmessungen aufgrund äußerer Einflüsse für gezielte Untersuchungen nur bedingt geeignet sind, wurden Methoden zur realitätsgetreuen und reproduzierbaren Bestimmung des instationären Windgeräusches entwickelt.

In diesem Beitrag werden die Methoden vorgestellt und genutzt, um das instationäre Windgeräusch der Entstehung nach zu unterteilen und zu analysieren. Unterschieden werden Anteile aus der Turbulenz der Anströmung und aus fahrzeugerregter Turbulenz. Letztere wird durch die Geometrie des Fahrzeugs erregt, auch bei stationärer Anströmung.

Diese Unterteilung ermöglicht im Fahrzeugentwicklungsprozess eine gezielte Optimierung des Windgeräusches. Des Weiteren erlaubt sie eine verbesserte Bewertung der Methoden zur Windgeräuschbestimmung.

Grundlagen

Beschreibung der Strömungsverhältnisse

Die Strömungsverhältnisse bei Straßenfahrt resultieren aus zeitlicher und räumlicher Variation der Anströmung (natürlicher Wind, weitere Verkehrsteilnehmer, Hindernisse am Fahrbahnrand bei Seitenwind) sowie aus Änderungen der Fahrgeschwindigkeit.

Die Fahrzeuganströmung wird dabei entsprechend **Abbildung 1** mit der resultierenden Anströmungsgeschwindigkeit u_{res} und dem Schiebewinkel β beschrieben. Die resultierende Anströmungsgeschwindigkeit stellt den Betrag der Resultierenden aus Windgeschwindigkeit u_{Wind} und Fahrgeschwindigkeit u_{Fzg} dar, der Schiebewinkel den Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und der Resultierenden.

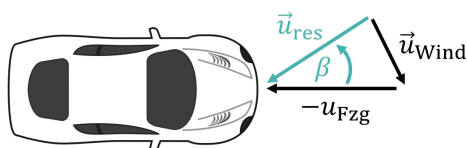


Abbildung 1: Beschreibung der Fahrzeuganströmung: resultierende Anströmungsgeschwindigkeit u_{res} und Schiebewinkel β

Bestimmung des instationären Windgeräusches

Als Methoden zur reproduzierbaren Bestimmung des instationären Windgeräusches sind aktive Böengeneratoren im Windkanal sowie quasistationäre Simulationsverfahren zu nennen.

Bei quasistationären Simulationsverfahren wird im Windkanal stationär das Geräuschverhalten des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Anströmung, also für verschiedene Geschwindigkeiten und Schiebewinkel, erfasst und ein Kennfeld erzeugt. Hiermit ist es anschließend möglich, für beliebige Anströmverläufe das Windgeräusch vorherzusagen. Bei Straßenfahrt können allerdings bereits über die Fahrzeuglänge variierende Strömungsverhältnisse vorliegen. Dies wird mit den Verfahren aufgrund der stationären Kennfelderzeugung nicht berücksichtigt, woraus Fehler resultieren. Zu den quasistationären Simulationsverfahren zählen die Verfahren nach Riegel und Horn (geb. Krampol) [1] sowie nach Oettle [2].

Mit aktiven Böengeneratoren werden im Windkanal gezielt die bei Straßenfahrt vorliegenden Strömungsverhältnisse nachgebildet. Hierzu zählen das Pininfarina TGS [3], der Toyota NWG [4] sowie FKFS *swing*[®] [5]. Letzterer besteht aus vertikal in der Windkanaldüse angeordneten Flügelprofilen, deren Winkel dynamisch mit Frequenzanteilen bis 10 Hz vorgegeben werden können (siehe **Abbildung 2**). Dies ermöglicht eine realistische Abbildung des Schiebewinkel-Verlaufs.



Abbildung 2: Aktiver Böengenerator FKFS *swing*[®]

Messtechnik

Zur Untersuchung des Windgeräusches bei Straßenfahrt werden mit einem Versuchsfahrzeug (siehe **Abbildung 3**) die Fahrzeuganströmung und das Innengeräusch synchron erfasst. Die Anströmung wird mit einer Cobra-Sonde (4-Lochsonde) räumlich aufgelöst auf dem Fahrzeugdach ermittelt, das Innengeräusch mit einem Kunstkopf auf dem Beifahrersitz gemessen. Bei der späteren Analyse ist zu berücksichtigen, dass hierbei nicht nur Windgeräusche aufgezeichnet werden.



Abbildung 3: Versuchsfahrzeug mit Cobra-Sonde auf dem Dach (rot markiert) und Kunstkopf auf dem Beifahrersitz

Messdaten

Basis der Untersuchung stellt eine Straßenmessung auf der Autobahn bei 140 km/h dar. **Abbildung 4** gibt einen Überblick über die Messung. Zusätzlich zu den beiden Strömungsgrößen ist auch der Schalldruckpegel der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerohr aufgetragen. Dies ist eine der Terzen, in der bei Straßenfahrt das Windgeräusch maßgebend ist. Es ist zu erkennen, dass die Variation der Fahrzeuganströmung Schwankungen des Schalldruckpegels zur Folge hat.

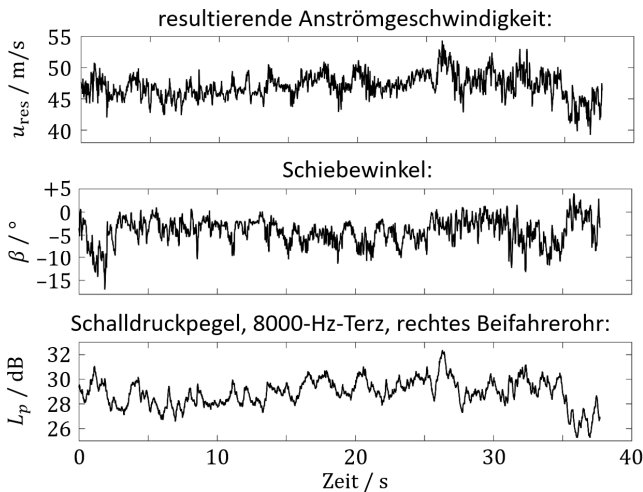


Abbildung 4: Straßenmessung: resultierende Anströmgeschwindigkeit, Schiebewinkel und Schalldruckpegel der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerohr über der Zeit

Methodik

Für die vorliegende Untersuchung werden quasistationäre Simulationsverfahren nach Oettle verwendet, um das instationäre Windgeräusch der Entstehung nach zu unterteilen. Es kommen zwei verschiedene Varianten zum Einsatz. Im Folgenden werden diese nacheinander vorgestellt und die Analyse der Ergebnisse am Beispiel der 8000-Hz-Terz erläutert.

Simulationsverfahren Variante 1

Der Ablauf der ersten Simulationsvariante ist in **Abbildung 5** dargestellt. Im Zentrum stehen die im Windkanal unter stationären Strömungsbedingungen ermittelten Kennfelder. Je Kennfeld ist für eine Terz T des Windgeräusches der effektive Schalldruck p_{RMS} über der resultierenden Anströmgeschwindigkeit u_{res} und dem

Schiebewinkel β enthalten. Die zu simulierende Anströmung geht in Form der Zeitverläufe beider Strömungsgrößen in die Simulation ein. Für jeden Zeitschritt der zu simulierenden Anströmung und jede Terz wird aus den Kennfeldern der effektive Schalldruck bestimmt. Es ergibt sich ein Zeitverlauf des effektiven Schalldrucks je Terz. Schwankungen des effektiven Schalldrucks resultieren dabei nur aus Veränderungen der Fahrzeuganströmung. Fahrzeugerreger Schwankungen fließen durch Mittelung bei der Kennfelderzeugung nicht in das Simulationsergebnis ein.

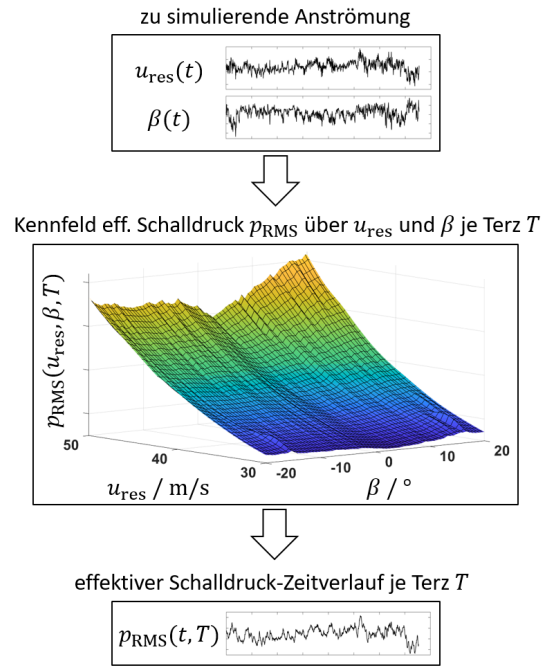


Abbildung 5: Simulationsverfahren nach Oettle Variante 1

In **Abbildung 6** sind das Simulationsergebnis für die Anströmung der Straßenmessung und das tatsächlich bei der Straßenmessung vorliegende Windgeräusch gegenübergestellt. Die Schalldruckpegel-Zeitverläufe der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerohr (125 ms Mittelung) zeigen eine genaue Übereinstimmung.

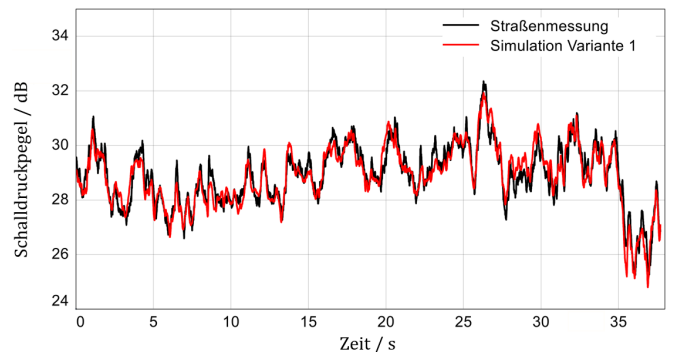


Abbildung 6: Straßenmessung und Simulation Variante 1: Schalldruckpegel-Zeitverläufe der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerohr

Zum detaillierten Vergleich der Ergebnisse werden diese Fourier-transformiert und über den mittleren Terzpegel normiert. Es resultieren die Modulationsspektren in **Abbildung 7**. Bei niedrigen Modulationsfrequenzen bis

etwa 3 Hz zeigt sich ein ähnliches Niveau der Spektren. Darüber fallen die von der Simulation vorhergesagten Modulationen gegenüber der Straßenmessung ab. Dies ist auf die Vernachlässigung der fahrzeugerregten Modulationen zurückzuführen.

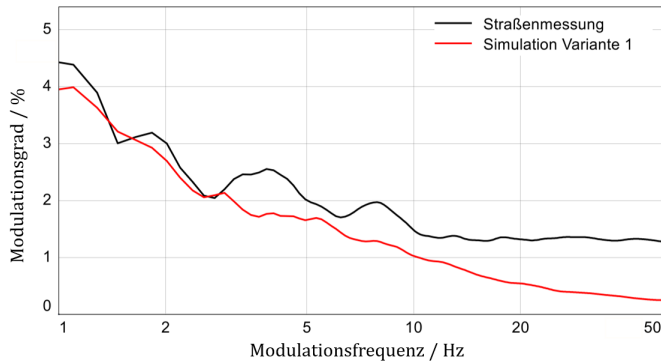


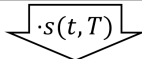
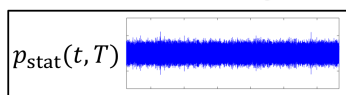
Abbildung 7: Straßenmessung und Simulation Variante 1: Modulationsspektren der Schalldruckpegel-Zeitverläufe der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerrohr

Simulationsverfahren Variante 2

Das Ziel bei der Entwicklung der zweiten Simulationsvariante war es, die Ergebnisse anhören und damit subjektiv beurteilen zu können. Hierzu wird eine stationäre Schalldruckmessung aus dem Windkanal verwendet, die entsprechend dem Ergebnis der ersten Simulationsvariante moduliert wird. Nach Gleichung (1) wird je Terz ein Skalierfaktorverlauf s berechnet. Dieser stellt das Verhältnis des effektiven Schalldruck-Zeitverlaufs p_{RMS} aus Variante 1 zum effektiven Schalldruck $p_{stat,RMS}$ der stationären Windkanalmessung dar. Durch Multiplikation der Skalierfaktorverläufe mit der terzweise gefilterten stationären Schalldruckmessung ergibt sich als Simulationsergebnis ein simulierter Schalldruck-Zeitverlauf je Terz. Die Skalierung ist in **Abbildung 8** dargestellt.

$$s(t, T) = \frac{p_{RMS}(t, T)}{p_{stat,RMS}(T)} \quad (1)$$

Schalldruck-Zeitverlauf stationär gemessen je Terz



Schalldruck-Zeitverlauf simuliert je Terz

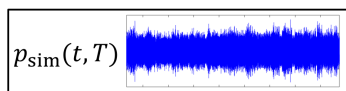


Abbildung 8: Simulationsverfahren nach Oettle Variante 2: Skalierung des stationären Schalldruck-Zeitverlaufs je Terz

Abbildung 9 zeigt die Schalldruckpegel-Zeitverläufe von Straßenmessung, Simulation Variante 2 und der stationären Schalldruckmessung, die der Simulation zugrunde liegt. Der Verlauf der stationären Schalldruckmessung weist trotz gleichbleibender Fahrzeuanströmung Schwankungen auf.

Sie resultieren aus fahrzeugerregter Turbulenz. Im Gegensatz zum Simulationsergebnis der Variante 1 sind zwischen den Zeitverläufen der Simulation Variante 2 und der Straßenmessung Abweichungen zu erkennen. Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Simulation anströmungs- und fahrzeugerregte Schwankungen zufällig überlagert. Inwieweit dies von der Realität abweicht, ist noch zu prüfen.

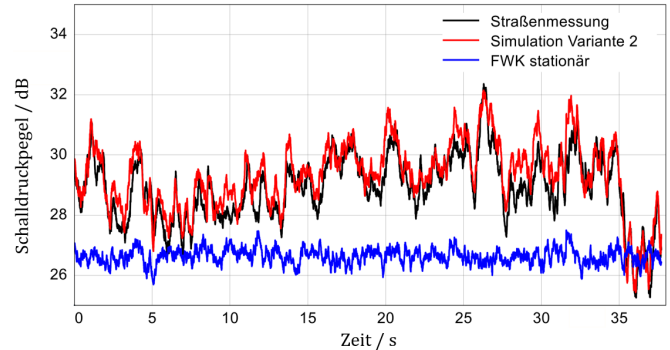


Abbildung 9: Straßenmessung, Simulation Variante 2 und stationäre Messung: Schalldruckpegel-Zeitverläufe der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerrohr

Die zugehörigen Modulationsspektren in **Abbildung 10** zeigen für die Simulation Variante 2 keinen Abfall gegenüber der Straßenmessung zu höheren Modulationsfrequenzen hin, da sie zusätzlich zur Turbulenz der Anströmung auch die fahrzeugerregte Turbulenz berücksichtigt. Noch vorhandene Abweichungen sind verfahrensbedingt.

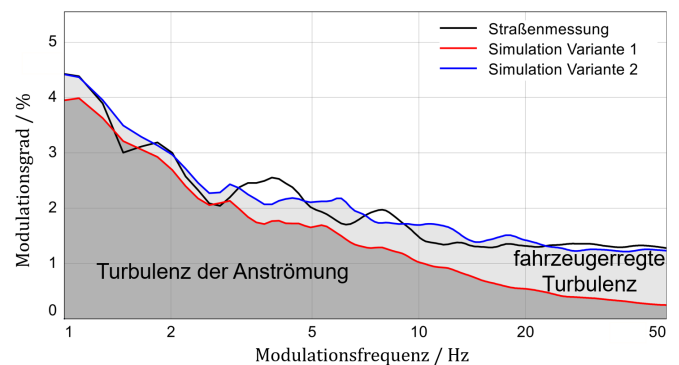


Abbildung 10: Straßenmessung, Simulation Variante 1 und Simulation Variante 2: Modulationsspektren der Schalldruckpegel-Zeitverläufe der 8000-Hz-Terz am rechten Beifahrerrohr

In dieser Darstellungsform ist es nun möglich, die Modulationen des instationären Windgeräusches der Entstehung nach zu unterteilen: Simulation Variante 1 enthält nur Modulationen aus Veränderungen der globalen Fahrzeuanströmung (dunkelgraue Fläche). Die Differenz zwischen Simulation Variante 1 und Variante 2 ist auf die fahrzeugerregte Turbulenz zurückzuführen (hellgraue Fläche).

Für die 8000-Hz-Terz zeigt sich, dass die Modulationen vorrangig aus der Turbulenz der Anströmung resultieren. Zu hohen Modulationsfrequenzen nimmt allerdings der Einfluss der fahrzeugerregten Turbulenz anteilig zu.

Anwendung der Methodik auf weitere Terzen

Die zuvor erläuterte Analyse wird im Folgenden auch auf tiefere Terzen angewandt. In **Abbildung 11** sind die Ergebnisse der 5000-, 3150-, 1600- und 800-Hz-Terz zu sehen. Es zeigt sich für diese Terzen ein qualitativ ähnlicher Einfluss der Anströmturbulenz. Mit sinkender Terzmittenfrequenz ist jedoch ein steigender Einfluss der fahrzeugerregten Turbulenz zu beobachten.

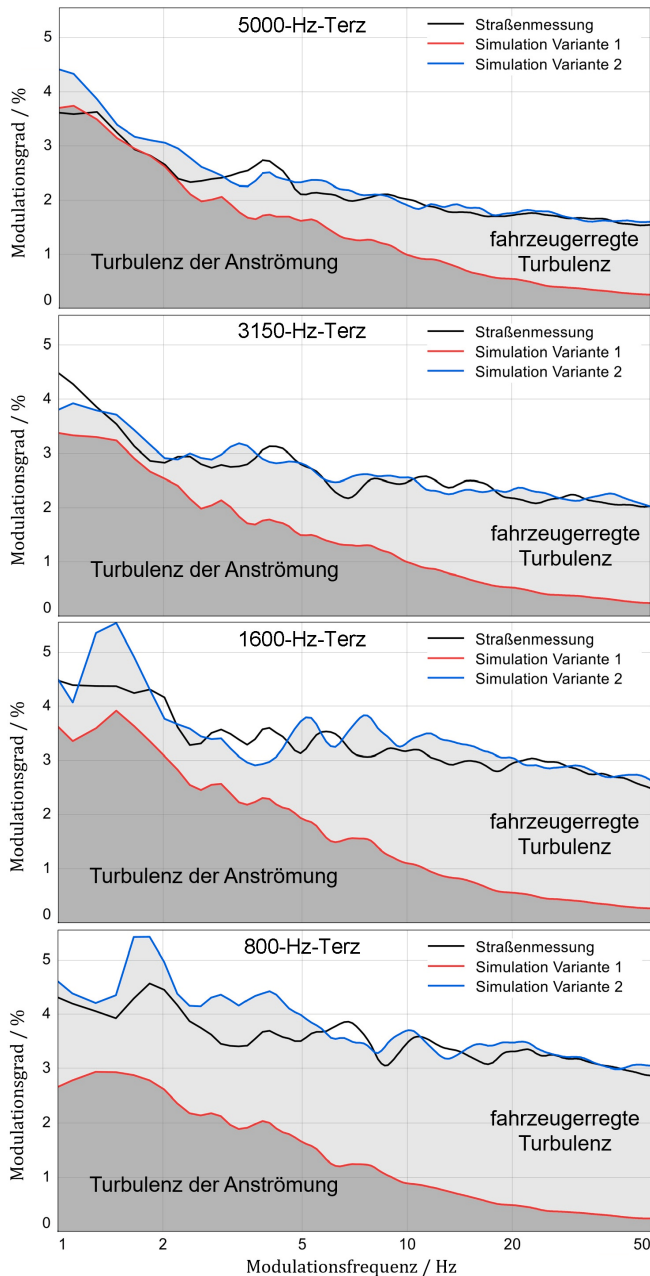


Abbildung 11: Straßenmessung, Simulation Variante 1 und Simulation Variante 2: Modulationsspektren der Schall-druckpegel-Zeitverläufe der 5000-, 3150-, 1600- und 800-Hz-Terz am rechten Beifahrerohr

Für die Wahrnehmung des instationären Windgeräusches zeigen vorhergehende Untersuchungen eine hohe Relevanz der 4000-Hz-Oktave, welche auch die 3150- und 5000-Hz-Terz umfasst [6]. Bezüglich der Modulationen befindet sich die maximale Sensitivität bei 4 Hz [7]. Die für die Wahrnehmung besonders relevanten Terzen und

Modulationsfrequenzen werden somit von der Anströmung dominiert.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden die quasistationären Simulationsverfahren nach Oettle genutzt, um Modulationen im instationären Windgeräusch in anströmungs- und fahrzeugerregt zu unterteilen.

Die Analyse ergibt für das verwendete Fahrzeug und die beispielhafte Fahrzeuanströmung einen:

- für die betrachteten Terzen qualitativ ähnlichen Einfluss der Anströmturbulenz auf die Modulationen
- zu tiefen Terzen hin steigenden Einfluss der fahrzeugerregten Turbulenz
- mit sinkender Modulationsfrequenz steigenden Anteil anströmungsbedingter Modulationen

Im vorliegenden Fall dominiert damit die Turbulenz der Anströmung die für die Wahrnehmung besonders relevanten Terzen (3150 Hz bis 5000 Hz) und Modulationsfrequenzen (um 4 Hz).

In Zukunft gilt es die entwickelte Methodik unter realen Strömungsbedingungen zu validieren. Hierzu soll der aktive Böengenerator FKFS *swing*[®] verwendet werden. Anschließend ist die Analyse der Einflüsse für weitere Fahrzeuge und Strömungsverläufe geplant. Auch stehen weitere Untersuchungen zur Objektivierung der instationären Windgeräusche aus. Ziel ist die Entwicklung eines geeigneten Indexes.

Literatur

- [1] Krampol, S.; Riegel, M.; Wiedemann, J.: Rechner-gestützte Simulation des instationären Windgeräusches. *Automobiltechnische Zeitschrift* 111 (2009), Nr. 11
- [2] Oettle, N.: The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise. Dissertation, Durham University, 2013
- [3] Cogotti, A.: Generation of a Controlled Level of Turbulence in the Pininfarina Wind Tunnel for the Measurement of Unsteady Aerodynamics and Aeroacoustics. SAE 2003-01-0430
- [4] Yamashita, T.; Makihara, T.; Maeda, K.; Tadakuma, K.: Unsteady Aerodynamic Response of a Vehicle by Natural Wind Generator of a Full-Scale Wind Tunnel. SAE 2017-01-1549
- [5] Blumrich, R.; Riegel, M.; Helfer, M.: Advanced Aeroacoustic Vehicle Development in a Full-Scale Wind Tunnel. *ATZextra worldwide* (2016), Nr. 21
- [6] Riegel, M.; Blumrich, R.; Helfer, M.: New Technology for Unsteady Wind Noise Measurements in an Aeroacoustic Full-Scale Wind Tunnel. *International Conference on Vehicle Aerodynamics 2016*, Coventry
- [7] Zwicker, E.; Fastl, H.: *Psychoacoustics – Facts and Models*. Springer, Berlin, 2007