

Auralisation des Innengeräusches von Dieselfahrzeugen

Sabrina Skoda¹, Jörg Becker-Schweitzer¹, Ralf Heinrichs²

¹ Fachhochschule Düsseldorf, Kompetenzplattform Sound and Vibration Engineering,
E-Mail: sabrina.skoda@fh-duesseldorf.de

² Ford Werke GmbH, 50725 Köln, E-Mail: rheinri1@ford.com

Einleitung

Der Einsatz leistungsfähiger Simulationstools zur Vorhersage und Beurteilung des Geräusch- und Schwingungsverhaltens eines Fahrzeugs gewinnt in der Produktentwicklung zunehmend an Bedeutung. Um im Rahmen eines Hörversuchs valide Versuchsergebnisse zu erzielen, ist es erforderlich, das Fahrgeräusch originalgetreu im Simulator darzubieten.

Bei der gehörrichtigen Auralisation von Fahrgeräuschen stellt die impulshaltige Signalstruktur des Dieselmotorgeräusches („Diesel-Impulshaftigkeit“) eine besondere Herausforderung dar. Üblicherweise werden Dieselgeräusche durch zeitbereichsbasierte Analyse- und Syntheseverfahren erfasst und reproduziert ([1]). Im Rahmen dieser Arbeit wurde mittels eines ordnungsbasierten Verfahrens die „Diesel-Impulshaftigkeit“ untersucht. Die Untersuchungen beschränkten sich dabei auf Fahrzeuge mit 4-Zylindermotor. Es wurden Parameter zur Beschreibung der Impulshaftigkeit evaluiert und die Anwendbarkeit des frequenzbereichsbasierten Synthesalgorithmus auf Dieselgeräusche geprüft.

Dieselgeräusche

Das Fahrzeuginnengeräusch eines Dieselfahrzeugs weist starke impulshafte Geräuschanteile auf, die eine breitbandige Signalanalyse erfordern. Somit ist eine Beschreibung des Motorgeräuschcharakters durch die ersten 24 halben und ganzen Ordnungen, wie beim Benzinfahrzeug, nicht ausreichend. Um bei der Untersuchung von Dieselgeräuschen den Einfluss drehzahlbedingter tonaler Veränderungen auszuschließen, auf die das menschliche Ohr besonders empfindlich reagiert ([2]), werden quasi-stationäre Fahrzustände betrachtet. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit zum einen Rollenprüfstandsmessungen mit konstanter Last und einer konstanten Drehzahl von 2000 U/min und zum anderen Leerlaufgeräusche analysiert. Unter Verwendung der Modulationsanalyse wurde die „Diesel-Impulshaftigkeit“ über dem gesamten Signalspektrum detailliert untersucht.

Modulationsanalyse

Ein amplitudenmodulierter, sinusförmiger Träger stellt sich im Frequenzspektrum als Linie mit zwei Seitenbändern dar. Aus der Höhe der Seitenbänder kann der Grad der Modulation bestimmt werden. Das Fahrzeuginnengeräusch ist ein Signal, das durch die Zylinderfeuerungen vielfach amplitudenmoduliert ist ([3]). Im Frequenzspektrum sind daher in den Seitenbändern mehrere Frequenzlinien sichtbar, deren Höhe durch die Modulationsanalyse ausgewertet wird. In der Praxis wird zur Analyse impulshafter Dieselgeräusche die

Schmalband-Modulationsanalyse ([3]) angewendet, um das Modulationsverhalten frequenzbereichsabhängig zu untersuchen.

Analyse der Ordnungen

Unter Verwendung schmalbandiger Filter mit einer Frequenzbreite von 3 Hz wurden die Motorordnungen in einem Frequenzbereich bis 6,7 kHz schrittweise aus einem stark impulshaften Dieselgeräusch extrahiert und anschließend zu einem Summensignal addiert. Durch die Filterung wurden im Frequenzspektrum die Seitenbänder der Ordnungen entfernt. Der verbleibende Restgeräuschanteil sowie das Ordnungssignal wurden anschließend einer Modulationsanalyse unterzogen.

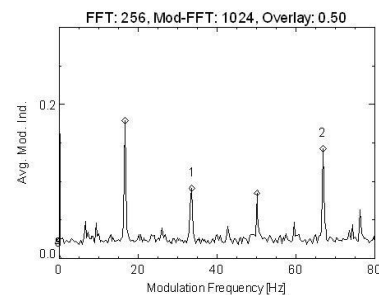


Abbildung 1a: Modulationsspektrum des Gesamtgeräusches, gemittelt über Trägerfrequenzbereich.

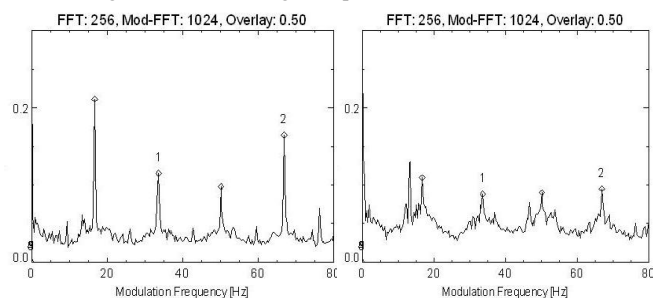


Abbildung 1b+c: Modulationsspektrum des Ordnungssignals (links) und des Restgeräuschanteils (rechts), gemittelt über Trägerfrequenzbereich.

Abbildung 1a zeigt das Modulationsspektrum des original gemessenen Dieselgeräusches. Es treten Modulationsfrequenzen auf, die der Frequenz der 0,5. bis 2. Motorordnung und ihren Vielfachen entsprechen. Diese Frequenzen werden im Folgenden als „modulierende Ordnungen“ bezeichnet. Anhand der in Abbildung 1b dargestellten Modulationsstruktur des Ordnungssignals wird deutlich, dass bereits durch Addition der unmodulierten Ordnungen die Modulationsstruktur des Originalgeräusches korrekt reproduziert wird,

wie auch die Signaltheorie schon vermuten lässt. Der Grad dieser Modulationen ist geringfügig erhöht, da kein maskierendes Restgeräusch vorhanden ist. Der Restgeräuschanteil (Abbildung 1c) weist die gleichen modulierenden Ordnungen auf wie das Ordnungssignal. Versuche mit vertauschten Ordnungs- und Restsignalen haben jedoch gezeigt, dass die Modulationen im Restgeräuschanteil aufgrund des geringen Signalpegels keinen akustisch relevanten Beitrag zur Impulshaftigkeit liefern.

Betrag und Phase der Ordnungen

Eine Motorordnung wird durch ihren Betrag und ihre Phasendifferenz zum Drehzahlsignal beschrieben. Werden anhand einer Drehzahlhochlaufmessung diese zwei Parameter in regelmäßigen Abständen (z.B. in 10-rpm-Schritten) über der Drehzahl erfasst, kann das Zeitsignal der Motorordnung für beliebige Drehzahlverläufe rekonstruiert werden. Während sich beim Drehzahlhochlauf je ein Wertepaar aus Betrag und Phase pro Drehzahlstützstelle ergibt, sind im quasi-stationären Zustand mit geringem Drehzahlwertebereich mehrere Auswertepunkte pro Drehzahlwert vorhanden. Eine statistische Untersuchung dieser Werte führte zu der Erkenntnis, dass der Ordnungsbetrag über der Zeit nur minimale Schwankungen aufweist und geringfügige Variationen des Betrags bei der Synthese keine Veränderung der „Diesel-Impulshaftigkeit“ zur Folge haben. Im Gegensatz dazu führten schon kleinste Veränderungen der Phasendifferenzen zu deutlich wahrnehmbaren Klangunterschieden. Der Phasenbezug der Ordnungen zum Drehzahlsignal ist somit entscheidend für Stärke und Charakteristik der „Diesel-Impulshaftigkeit“. Da der zeitliche Verlauf der Phasen keine Erklärung für Impulshaftigkeit bot, wurde die Streubandbreite der Phasendifferenzen zu verschiedenen Zeitpunkten im Signal untersucht. Doch auch hier konnte bei starker Impulshaftigkeit entgegen den Erwartungen keine Häufung bestimmter Phasenwerte festgestellt werden. In der folgenden Abbildung werden exemplarisch die Histogramme eines schwach und eines stark impulshaften Signals einander gegenübergestellt.

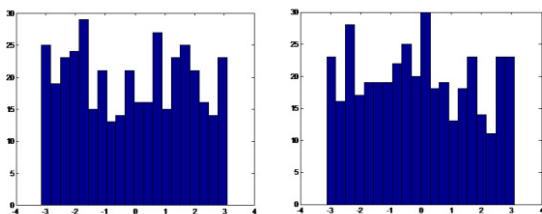


Abbildung 2: Histogramm der Ordnungsphasenwerte beim schwach impulshaften (links) und stark impulshaften Signals (rechts).

Synthese mit definierten Phasenverhältnissen

In weiteren Versuchen wurde das Leerlaufgeräusch eines Dieselfahrzeugs mehrfach mit unterschiedlichen, eindeutig definierbaren Phasenverhältnissen der Ordnungen resynthetisiert und die Auswirkung der Phasenkonstellationen auf die „Diesel-Impulshaftigkeit“ untersucht. Die Synthese mit Nullphase führte zu einem starken Anstieg der Modulationen im Modulationsspektrum. Dies äußerte sich

klänglich als starke Impulshaftigkeit, die allerdings keine Ähnlichkeit mit „Diesel-Impulshaftigkeit“ hatte. Bei der Synthese mit zufällig gewählter Startphase der Ordnungen wies das Signal keine Impulshaftigkeit auf. Auch durch eine Kombination aus Nullphase und Zufallsphase bei verschiedenen Ordnungen konnte die originale Charakteristik der „Diesel-Impulshaftigkeit“ nicht reproduziert werden. Daraufhin wurden die Phasenverhältnisse zu einem einzigen Zeitpunkt im Originalsignal ermittelt und dann bei der Synthese als zeitlich konstante Startphase übergeben. Dadurch konnte sowohl klänglich als auch messtechnisch eine sehr gute Annäherung an das Originalsignal erzielt werden. Die Modulationsanalyse von Originalsignal und Synthese zeigt Übereinstimmungen sowohl bei den modulierenden Ordnungen als auch im Modulationsschnitt (Abbildung 3), in dem der Modulationsgrad einer modulierenden Ordnung über dem Frequenzspektrum des Signals dargestellt ist.

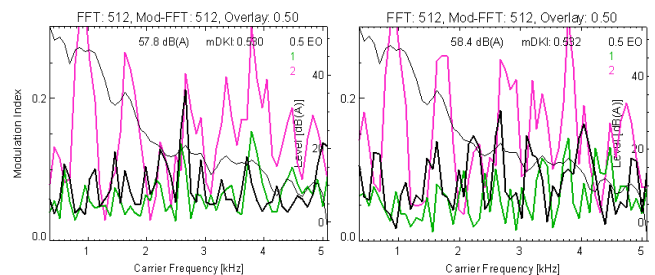


Abbildung 3: Modulationsschnitt des Originalsignals (links) und der Synthese (rechts).

Zusammenfassung

Die gehörrichtige Auralisation impulshaltiger Innengeräusche von Dieselfahrzeugen ist mit frequenzbasierten Syntheseverfahren sowohl für stationäre als auch für dynamische Fahrzustände möglich. Durch Parametrisierung der Motorordnungen nach Betrag und Phase im Frequenzbereich bis 6,7 kHz wird der impulshafte Charakter des Geräusches hinreichend erfasst. Eine statistische Auswertung der Phasenverhältnisse konnte bislang keine Erklärung für die Impulshaftigkeit liefern. In diesem Bereich ist weiterführende Forschung notwendig. Während Modifikationen der Phasenverhältnisse zu starken Veränderungen der Impulshaftigkeit führen, konnte bei Verwendung der originalen Phasenverhältnisse bereits eine sehr gute Annäherung der Synthese an das Originalgeräusch erzielt werden.

Literatur

- [1] Sellerbeck, P.; Nettelbeck, C. (2008): Auralisation zur gehörgerechten Bewertung u. Optimierung von Dieselergeräuschen im Fahrzeuginnenraum mittels binauraler Transferpfadanalyse. Fortschritte der Akustik – DAGA 2008.
- [2] Genuit, K. (1996): Objective evaluation of acoustic quality based on a relative approach. Proceedings of the Internoise '96.
- [3] Bodden, M.; Heinrichs, R. (2005): Methode zur Analyse und Bewertung von Dieselergeräuschen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2005.