

# Methode zur Analyse und Bewertung von Dieselgeräuschen

Markus Bodden\*, Ralf Heinrichs\*\*

\**Product-Sound - Ingenieurbüro Dr. Bodden, Ursulastr. 21, 45131 Essen; email: db@product-sound.de*

\*\**Ford Werke GmbH, Acoustic Centre Cologne, Spessartstraße, 50725 Köln; email: rheinri1@ford.com*

## Einleitung

Geräusche von Fahrzeugen mit Dieselmotoren weisen typische Geräuschmerkmale auf, die sie eindeutig von Fahrzeugen mit Benzinmotor unterscheiden. Diese typischen Merkmale lassen sich auf charakteristische Signaleigenschaften zurückführen, die nur mit spezifischen Analyseverfahren identifiziert und quantifiziert werden können.

Eine entsprechende Methode wird im folgenden vorgestellt, wobei sich hier alle Angaben auf Fahrzeuge mit 4-Zylindermotor beziehen.

## Wahrnehmung von Dieselgeräuschen

Die Geräusche von Dieselfahrzeugen lassen sich eindeutig von Fahrzeugen mit Benzinmotor unterscheiden. Das typische Merkmal, häufig als „Dieselnageln“ bezeichnet, beschreibt eine impulshaltige Geräuscheigenschaft, deren Periodizität auf der Folge der Zylinderfeuerungen beruht.

Von Kunden wird das Dieselnageln meist mit negativen Eigenschaften („Traktor!“) assoziiert, so dass das Ziel der Automobilhersteller zumeist darin besteht, das Dieselnageln soweit wie möglich zu reduzieren bzw. im Innenraum perceptiv völlig zu eliminieren.

Der Charakter des Dieselnagelns besteht prinzipiell aus folgenden unterschiedlichen Eigenschaften:

- der Grundimpulshaltigkeit, deren Wiederholfrequenz durch die 2. Motorordnung vorgegeben ist (z.B. 30 Hz bei einer Leerlaufdrehzahl von 900 rpm);
- der Variabilität der Impulshaltigkeit, welche auf Unterschieden zwischen den Feuerungen einzelner Zylinder beruht. Hierdurch entstehen zusätzliche Rhythmen z.B. mit der 0,5ten und/oder 1. Motorordnung (z.B. 7,5 Hz/15 Hz im Beispiel oben);
- der Variabilität der Impulshaltigkeit, welche auf Unterschieden der Feuerungen einzelner Zylinder über der Zeit beruht.

Perzeptiv am kritischsten ist zumeist das Dieselnageln im Idle. Hier sind die übrigen möglichen maskierenden Geräusche relativ leise, und das Dieselnageln tritt besonders deutlich hervor. Da zudem auch keine Interaktion mit dem Fahrer stattfindet, wird das Nageln nicht als Rückmeldung akzeptiert, und die Aufmerksamkeit des Fahrers ist auch nicht durch die Bedienung des Fahrzeugs blockiert.

## Analyse von Dieselgeräuschen

Die charakteristischen Merkmale von Dieselgeräuschen bestehen im wesentlichen aus impulshaltigen Anteilen, die jedoch aufgrund ihrer Beziehung zur Zylinderfeuerung periodische Strukturen aufweisen.

Die „Grundfrequenz“ dieser Periodizität ist zunächst die 2. Motorordnung, also die Wiederholfrequenz der Zylinderfeuerungen. Unterschiede zwischen den Feuerungen einzelner Zylinder führen jedoch auch zum Auftreten von Periodizitäten mit der halben Motorordnung.

Die Kombination aus Impulshaltigkeit und deren Periodizitäten läßt sich nicht direkt mit einer Analyseverfahren beschreiben. Weitgehende Informationen erhält man jedoch bei Anwendung einer Modulationsanalyse, die jedoch eine Analyse sinusförmiger Amplitudenmodulationen durchführt.

Das Gesamtfahrzeuggeräusch wird folglich als ein durch die Zylinderfeuerungen amplitudenmoduliertes Signal aufgefaßt. Die wesentlichen Unterschiede zu einer sinusförmigen Amplitudenmodulation wirken sich jedoch darin aus, dass nicht nur die Grundfrequenzen der Impuls-Periodizitäten dargestellt werden, sondern auch deren Vielfache - eine „Impuls-Modulation“ läßt sich in eine Fourierreihe zerlegen.

Eine breitbandige Modulationsanalyse liefert jedoch keine aufschlußreichen Ergebnisse, da gerade auch die Frequenzzusammensetzung des Dieselnagelns wichtig ist. Aus diesem Grunde muss eine schmalbandige Modulationsanalyse durchgeführt werden, die sich effizient als NBMA implementieren läßt.

### Schmalband-Modulationsanalyse NBMA

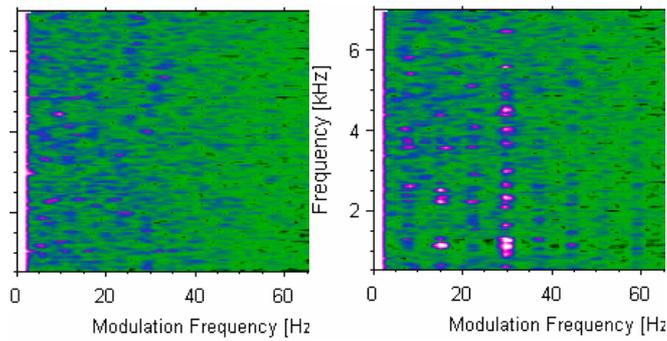
Die Narrow Band Modulation Analysis wurde in [2] vorgestellt. Sie bildet eine effiziente Umsetzung einer Schmalband-Modulationsanalyse und wird durch eine 2-stufige Reihe von FFTs erreicht:

- die erste Reihe von FFTs wird auf überlappende Segmente des Zeitsignals angewendet und berechnet somit das Spektrogramm;
- jede einzelne Trägerfrequenz repräsentiert über der Zeit betrachtet die Hüllkurve des Signals.
- die zweite Reihe von FFTs wird folglich auf diese Signale angewendet.

Der daraus resultierende Narrow Band Modulation Index ist in Abb. 1 für zwei Fahrzeuge dargestellt.

In der oberen Darstellung (Fahrzeug mit geringem Dieselnageln) sind kaum signifikante Modulationen zu erkennen, während in der unteren Darstellung (Fahrzeug mit starkem Dieselnageln) deutliche Modulationen bei Modulationsfrequenzen die Vielfachen der halben Motorordnung entsprechen auftreten.

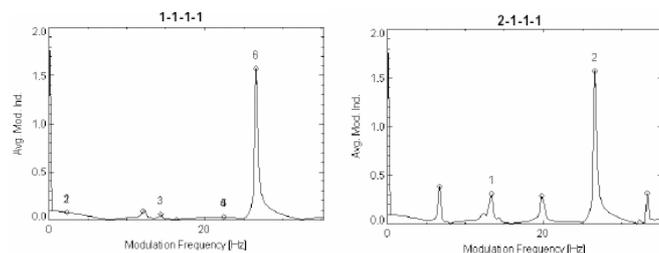
In den Abbildungen ist neben der generellen Aussage der Stärke des Dieselnagelns auch der Vorteil der Schmalband-Modulationsanalyse zu erkennen: Obwohl die Modulationen sich über einen breiten Trägerfrequenzbereich erstrecken,



**Abb. 1** NBMA Darstellung für zwei Fahrzeuge, Idle, links mit wenig Dieselnageln, rechts mit starkem Dieselnageln.

sind deutliche Unterschiede zu beobachten und besonders stark modulierte Trägerfrequenzen erkennbar. Speziell sind auch die Zusammensetzungen bei den jeweiligen Motorordnungen unterschiedlich und können aufgelöst werden. Diese Informationen sind für eine Ursachenanalyse und Reduzierung des Dieselnagels extrem vorteilhaft.

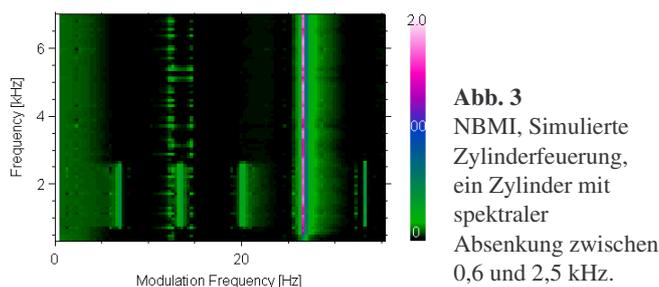
Der Einfluß der Zylinderfeuerungen auf die NBMA wurde unter Verwendung synthetischer Signale untersucht. Abb. 2 zeigt die mittleren Modulationsindices (über der Trägerfrequenz gemittelte NBMI) für identische Zylinderfeuerungen (links) und einen Zylinder, der mit anderer Amplitude feuert (rechts).



**Abb. 2** Simulierte Zylinderfeuerung: Links: 4 identische Zylinder; rechts: ein Zylinder mit anderer Amplitude

Sind alle Feuerungen identisch, so tritt nur die 2. Ordnung auf, sobald ein Zylinder anders feuert treten zusätzlich Vielfache der 0,5ten Ordnung auf.

Spektrale Unterschiede zwischen Feuerungen sind ebenfalls auflösbar. In Abb. 3 sind Analysen für den Fall dargestellt, das ein Zylinder eine spektrale Absenkung zwischen 0,6 und 2,5 kHz aufweist. In exakt diesem Trägerfrequenzbereich treten Vielfache der 0,5ten Ordnung auf, ansonsten nur die 2. Ordnung.



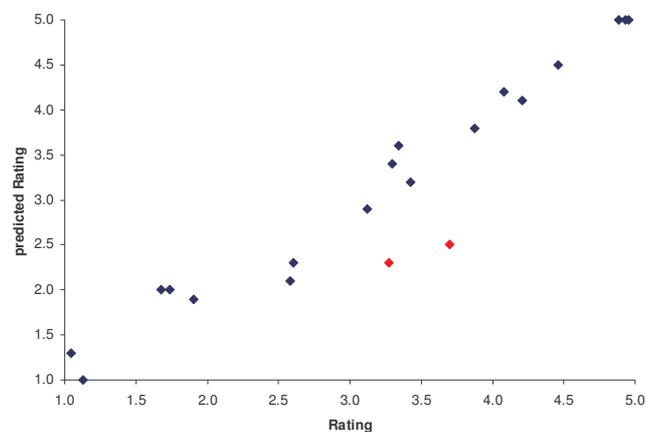
**Abb. 3** NBMI, Simulierte Zylinderfeuerung, ein Zylinder mit spektraler Absenkung zwischen 0,6 und 2,5 kHz.

### Metrik

Zur Bildung einer Metrik wird die komplexe Information der NBMA-Analyse auf einen Index reduziert. Dieser sog. MDKI faßt die Modulationen bei Modulationsfrequenzen welche Vielfachen der halben Motorordnung bis zur Motorgrundordnung entsprechen in einem festgelegten Trägerfrequenzbereich zusammen.

Speziell für die Quantifizierung des Innengeräusches im Idle wurde der sog. Diesel-knocking-Index DKI entwickelt. Dieser Index berücksichtigt neben dem oben beschriebenen MDKI auch die Energie des Signals. Der DKI zeigt eine Korrelation von 0,96 zu Bewertungen von Versuchspersonen.

Aus dem DKI läßt sich schließlich die Bewertung von Dieselnageln für die Idle-Situation vorhersagen. Dies geschieht über ein Polynom zweiten Grades. Die Korrelation zwischen den Versuchspersonenbeurteilungen und dem automatisch vorhergesagten Rating beträgt 0,97, ohne die Berücksichtigung von zwei künstlichen Geräuschen sogar 0,99 (siehe Abb. 4).



**Abb. 4** Bewertung des Dieselnagels durch Versuchspersonen gegenüber dem automatisch vorhergesagten Rating für Fahrzeuginnengeräusche, Idle. Rot sind zwei künstliche Signale markiert. Die Korrelation beträgt 0,97 (0,99 ohne künstliche Signale)

### Zusammenfassung

Das vorgestellte Verfahren erlaubt eine effiziente und detaillierte Analyse von Dieselgeräuschen. Die speziellen perceptiven Charakteristika von Dieselgeräuschen können mit Hilfe des Verfahrens identifiziert und quantifiziert werden. Für den perceptiv zumeist kritischsten Fall des Idle erlaubt der Verfahren zudem eine Vorhersage der Bewertung des Dieselnagels mit einer hohen Korrelation.

### Literatur

[1] Bodden, M.; Heinrichs, R.; Linow, A. (1998): Vergleich psychoakustischer Methoden für den effizienten industriellen Einsatz. Fortschritte der Akustik - DAGA'98, DPG-GmbH, Bad Honnef, 90-91.

[2] Bodden, M.; Heinrichs, R. (1999): Analysis of the time structure of gear rattle. Proceedings of the Internoise 99, Fort Lauderdale, USA, 1273-1278.