

## Diesel Sound Quality Engineering

Markus Bodden\*, Ralf Heinrich\*\*, Torsten Leonhard\*\*

\*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

Auf der Daga 2005 wurde ein Verfahren zur Analyse und Bewertung von Dieselgeräuschen vorgestellt [1]. Dieses Verfahren wurde speziell dazu entwickelt, periodische impulshaltige Signalanteile zu identifizieren und zu quantifizieren. Aufbauend darauf konnte eine Metrik entwickelt werden welche die Beurteilung von Dieselnageln im Innenraum für die kritischste Situation, Idle, vorhersagen kann.

Für den Prozess der Optimierung von Dieselgeräuschen ist aber nicht nur eine Bewertung des letztendlich kundenrelevanten Innen- (bzw. Außen)geräusches notwendig, sondern darüber hinausgehend eine Untersuchung von der Anregung über die Übertragungswege:

- Erzeugung der Impulshaltigkeit durch Zylinderfeuerungen und eventuell zusätzliche mechanische Prozesse (z.B: Injector-Ticking);
- Erfassung und Bewertung der Abstrahlung durch den Motor z.B. im Prüfstand zur Zielwertsetzung auf System-Level;
- Ausbreitung durch Körperschall in Strukturen des Motors und der Karosserie;
- Übertragung auf speziellen beeinflussbaren Pfaden wie z.B. den Motorlagern;
- Ausbreitung von Luftschall für das Außengeräusch;
- Ausbreitung von Luftschall und Körperschall in den Innenraum.

Beispielhafte Anwendungen des Verfahrens werden im folgenden vorgestellt.

### Diesel Sound Quality Engineering

Für die Wahrnehmung und Beurteilung von Dieselgeräuschen sind vorwiegend das Innengeräusch (für den Fahrer) als auch das Außengeräusch (für Passanten sowie für den Gesamteindruck) entscheidend.

Der wichtigste Betriebszustand ist hierbei der Leerlauf, da sich hier meist das Dieselnageln am stärksten zeigt, am wenigsten durch die übrigen Fahrgeräusche maskiert wird und auch die Aufmerksamkeit des Fahrers nicht durch die Fahrsituation abgelenkt ist.

Für die Analyse und Bewertung des Leerlaufgeräusches im Innenraum wurde ein Verfahren vorgestellt [1], das perzeptionsrelevante und physiknahe Signalmerkmale identifiziert und zu einem Einzahlenwert zusammenfasst. Dieser Einzahlenwert, der sog. DKI, erlaubt eine Quantifizierung des Dieselnagelns mit einer hohen Korrelation zu den Bewertungen von Versuchspersonen.

Der resultierende Einzahlenwert wurde speziell für die Bewertung von Leerlauf-Innengeräuschen ausgelegt, die dahinter stehende Methodik lässt sich jedoch auf den gesamten Diesel Sound Quality Engineering Prozess anwenden. Dieser Prozess erfordert, dass die gesamte Übertragungskette von der Anregung bis hin zum Beurteilungspunkt, hier dem Fahrzeuginnenraum, untersucht und optimiert wird.

Die Anregung selbst wird durch den Verbrennungsprozess in den Zylindern erzeugt. Eine Erfassung des abgestrahlten Luftschalls ist somit auf einem Motorprüfstand möglich, wobei sich hier jedoch die Abstrahlung von der im eingebauten Zustand im Fahrzeug unterscheiden kann. Dieser abgestrahlte Luftschall kann nun über unterschiedliche Übertragungswege in den Innenraum gelangen, ist aber vor allem für das Außengeräusch maßgeblich.

Eine weitere Übertragung in den Innenraum erfolgt über eine Vielzahl möglicher Körperschallpfade, welche im wesentlichen die Motorlager, aber auch direkt an den Motor angekoppelte Elemente wie Kabel und Leitungen umfasst. Für eine Optimierung des Gesamtgeräusches sowie für eine Zielwertsetzung für das anregende Element, den Motor, muss somit die gesamte Übertragungskette untersucht werden.

Die in [1] vorgestellten Methoden der NBMA (Narrow Band Modulation Analysis) sind auf alle diese Übertragungspfade anwendbar und liefern hilfreiche Information zur Optimierung. Der Einzahlenwert des DKI wurde jedoch speziell für die Bewertung des Leerlaufgeräusches im Innenraum entwickelt und ist nicht direkt anwendbar. Als sinnvolle Größe hat sich vielmehr der Zwischenwert des M-DKI, des Modulationsbeitrages zum DKI, gezeigt. Neben dieser rein aus dem Modulationsindex (also unabhängig von Pegelwerten) gewonnenen Größe fließt in den DKI noch der Pegel des Signals ein, der aber für eine allgemeine Bewertung der Impulshaltigkeit nicht betrachtet werden muss.

### Beispiele

#### Prinzipuntersuchungen am Motorlager

Eine besondere Bedeutung für eine gute Fahrzeugakustik kommt den Motorlagern zu. Sie bilden zum einen die direkten und wesentlichen Einkopplungspunkte der Schwingungen des Motors in die Karosserie, und zum anderen haben sie eine direkte Rückwirkung auf die Schwingungen des Motors.

Die möglichen Einkoppelpunkte der Diesel-Impulshaltigkeit in die Karosserie sind demnach überschaubar und können untersucht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass auch weitere an den Motor angekoppelte Elemente wie z.B. Bowdenzüge und Kabel Körperschallübertragungen ermöglichen.

Untersuchungen wurden an einem Fahrzeug durch folgende Körperschallmessungen durchgeführt:

- Messung am rechten und linken Motorlager sowie dem Rollrestriktor (jeweils x, y und z-Richtung) jeweils auf der Motorseite und der Karoserieseite;
- Messungen am kompletten Fahrzeug (d.h. jeweils ohne Entkopplung der anderen Lager).

Es wurden folglich nicht direkt die Übertragungsfunktionen gemessen, sondern die lokalen Verhältnisse an dem Messpunkten.

Quantifiziert wurden die Zustände an den jeweiligen Messpunkten zum einen durch den Pegel der Körperschallsignale im Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 3 kHz (relevanter Bereich für das Innengeräusch) sowie durch den M-DKI. Bei einer Drehzahl von 1250 rpm, bei der deutliches Dieselnageln auftritt, zeigen sich die in Abb. 1 dargestellten Zusammenhänge.

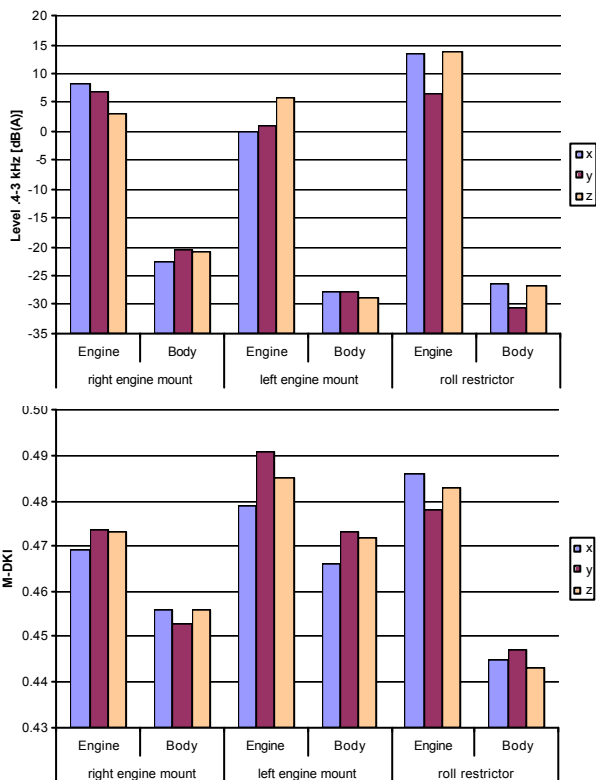


Abb. 1 Pegel und M-DKI bei 1250 rpm

Auf der Motorseite sind sowohl die Pegel als auch die Impulshaltigkeiten am Rollrestriktor am höchsten, diese werden aber zur Karoserieseite hin wirkungsvoll bedämpft. Bezüglich des Pegels bietet das linke Motorlager die bessere Dämpfung gegenüber dem Rechten, die Impulshaltigkeit nimmt hier jedoch auf der Karoserieseite die höchsten Werte an. Für die Übertragung der Impulshaltigkeit ist somit im wesentlichen das linke Motorlager verantwortlich.

### Optimierung eines Motorlagers

Die obigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die vorgestellte Methodik eine Quantifizierung der Übertragungspfade ermöglicht. Bei einem anderen Fahrzeug mit starkem Dieselnageln wurde durch eine entsprechende Untersuchung das rechte Motorlager als Hauptübertragungspfad für die Impulshaltigkeit identifiziert. Der in Abb. 2 links dargestellte Schmalband-Modulationsindex des Innengeräusches zeigt

deutliche Beiträge im Trägerfrequenzbereich zwischen 1.5 und 2 kHz bei allen Motorordnungen. NBMA-Analysen der unterschiedlichen Körperschallmesspunkte hat eindeutig das rechte Motorlager als Übertragungspfad für Impulshaltigkeit in diesem Trägerfrequenzbereich identifiziert. Anhand dieser Information konnte das Motorlager gezielt verändert und die Impulshaltigkeit deutlich reduziert werden (Abb. 2 rechts).

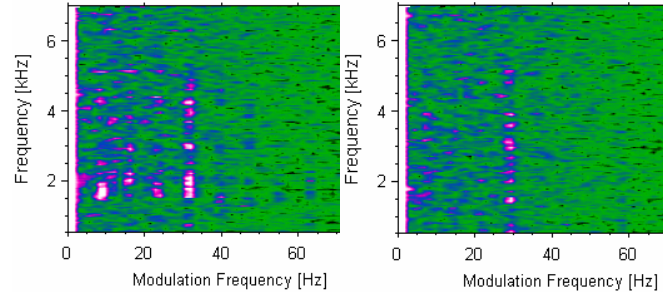


Abb. 2 Verbesserung des Innengeräusches durch Optimierung des rechten Motorlagers: altes Lager (rechts), neues Lager (links)

### Optimierung eines Zylinderkopfes und Einfluss der Motorkalibrierung

NBMA-Analysen des direkt vom Motor abgestrahlten Geräusches erlauben eine Klassifizierung und Zielwertsetzung für den Motor. Weiterführende Körperschallmessungen an unterschiedlichen Bauteilen erlauben eine Identifikation der kritischen Elemente sowie eine Quantifizierung von Maßnahmen. Beispielhaft wurde bei einem Motor der Einfluss des Zylinderkopfes quantifiziert und durch Einsatz von NBMA und M-DKI gezielt optimiert. Hierdurch konnte die Impulshaltigkeit deutlich reduziert werden (Abb. 3 links und Mitte). Gleichzeitig konnte der Einfluss der Motorkalibrierung quantifiziert werden - durch den Übergang von Euro3 auf Euro4 wurde die Impulshaltigkeit aufgrund der dafür nötigen härteren Verbrennung wieder erhöht (Abb. 3 rechts).

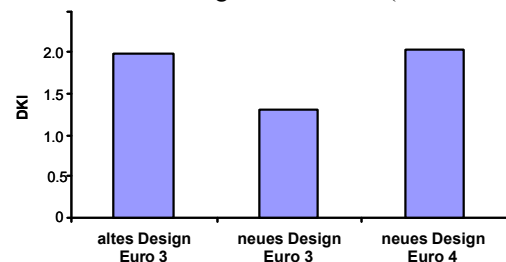


Abb. 3 Optimierung des Zylinderkopfes und Einfluß der Motorkalibrierung

### Zusammenfassung

Die vorgestellte Methodik der NBMA mit dem Einzahlenwert des M-DKI erlaubt eine Analyse und Quantifizierung von Diesel-Impulshaltigkeit in der gesamte Übertragungskette von der Entstehung durch die Zylinderfeuerung über die Übertragungspfade bis hin zum kundenrelevanten Innengeräusch. Sie stellt damit ein für die Entwicklung und Optimierung hilfreiches Tool zur Verfügung.

### Literatur

[1] Bodden, M.; Heinrichs, R. (2005): Methode zur Analyse und Bewertung von Dieselgeräuschen. Fortschritte der Akustik - DAGA'05, DPG-GmbH, Bad Honnef, 219-220.