

Analyse und Bewertung des Dieselgeräusches aus Körperschallsignalen

Marco Decker¹, Marco Ebel¹, Philipp Schmiechen², Carsten Haukap² und Clemens Gühmann¹

¹ TU Berlin, FG Elektronische Mess- und Diagnosetechnik, 10587 Berlin, Deutschland, E-Mail: marco.decker@tu-berlin.de

² IAV GmbH, Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, 10587 Berlin, Deutschland, E-Mail: philipp.schmiechen@iav.de

Einleitung

Nicht nur beim Kraftstoffverbrauch soll der Dieselmotor Maßstab moderner Verbrennungsmotoren sein, sondern zukünftig auch beim Geräusch. Im Rahmen der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen wird zu dieser Zielsetzung das Forschungsprojekt „Geräuscheregelter Dieselmotor“ durchgeführt. Im Projekt soll geklärt werden, welche Verbesserungen sich durch die Integration geeigneter Sensorsignale in das Diesel-Motormanagementsystem bezüglich des Verbrauchs, des Geräusches und der Abgasemissionen erzielen lassen. Dabei soll ein gewichtetes Optimum aus Verbrauch, Abgasemissionen und Luftschallemissionen erzielt werden unter Einhaltung der gesetzlichen Grenzen.

Zur Berücksichtigung des Geräusches in der Regelung des Dieselmotors sind rein akustische Signale wenig aussagekräftig, einen größeren Nutzen versprechen psychoakustische Parameter wie Lästigkeit oder Impulshaftigkeit. Um herauszufinden, welche Motoreinstellparameter die Psychoakustik beeinflussen, wurden bei der IAV Messungen an einem Dieselmotor durchgeführt. Hierbei wurde sowohl aus Luftschall- als auch aus Körperschallsignalen psychoakustische Merkmale berechnet.

Obwohl die Algorithmen für Luftschallsignale entwickelt wurden, zeigt die anschließende Regressionsanalyse der Parameter eine sehr hohe Korrelation. Nachfolgend werden die Untersuchungen vorgestellt.

Methoden

Der Dieselmotor hat während der Start- und Warmlaufphase sowie im unteren Last- und Drehzahlbereich ein gegenüber den anderen Geräuschquellen dominierendes Verbrennungsgeräusch. Als besonders lästig wird dabei das impulshaltige Geräusch „Dieselnageln“ empfunden.

Im Rahmen des FVV-Projektes „Objektivierung subjektiver Beurteilungen“ wurden auf Basis subjektiver Beurteilungen objektive Kennwerte für die Bewertung der Lästigkeit von Geräuschen entwickelt [1]. Die Bewertungskriterien wurden hier für Luftschallsignale entwickelt. Zur Bestimmung der Lästigkeit ist die Berechnung der Lautheit (L) und der Modulation (M) notwendig. Die Note (DN) des Dieselnagelgeräusches im Teillastbereich wird wie folgt aus beiden Größen berechnet:

$$DN = a - bL - cM, \quad (1)$$

wobei die Einteilung der Skala von 1 (nicht akzeptabel) bis 10 (nicht feststellbar) erfolgt.

Die psychoakustische Kenngröße Lautheit [2] beschreibt

das Lautstärkeverhältnis zweier Schalle, wobei eine Verdopplung des Lautheitswertes einer Verdopplung des Lautheitsempfindens entspricht. Die gehörrichtige Einteilung der Frequenzgruppenbreite erfolgt über die Barkgruppen. Für die Bewertung des Dieselnagels im Teillastbereich wurde die Lautheit gewichtet über die Barkgruppen bewertet (Abbildung 1).

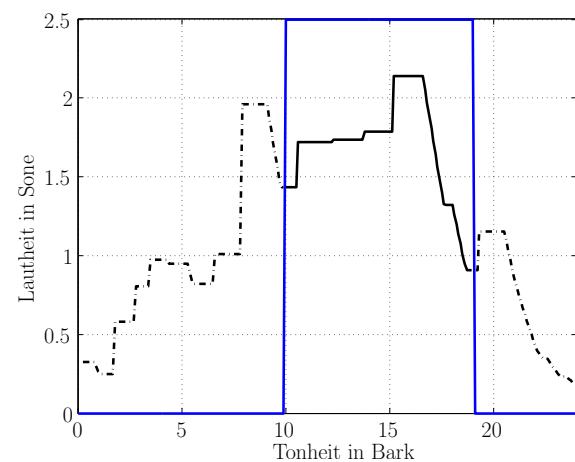


Abbildung 1: Lautheit eines Luftschallsignals mit Wichtung für den relevanten Bereich des Dieselnagels im Teillastbereich

Durch den Modulationsparameter M wird die Impulshaltigkeit des Nagelgeräusches ausgedrückt. Die Berechnung des Modulationsspektrums erfolgt in zwei Stufen [3]:

$$P(u, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)w(n-u)e^{-j2\pi\frac{kn}{N}}. \quad (2)$$

Für jede Trägerfrequenz k wird dann im zweiten Schritt wiederum die gefensterter Fouriertransformierte entlang der Zeitachse berechnet:

$$P(m, k) = \sum_{u=0}^{M-1} |P(u, k)|w(u)e^{-j2\pi\frac{um}{M}}. \quad (3)$$

Abschließend erfolgt eine Normierung:

$$P_N(m, k) = \frac{|P(m, k)|}{|P(0, k)|}. \quad (4)$$

Die Auswertung des Modulationsspektrums erfolgt dann mit einer Gewichtung der Trägerfrequenz. Die Datenbasis mit denen die Noten erstellt wurden, weisen keine signifikanten Modulationsgrade auf halben Feuerungsordnungen auf. Deshalb wurde für die Bewertung des Teillastbereiches die zweite Zündordnung ausgewertet (Abbildung 2).

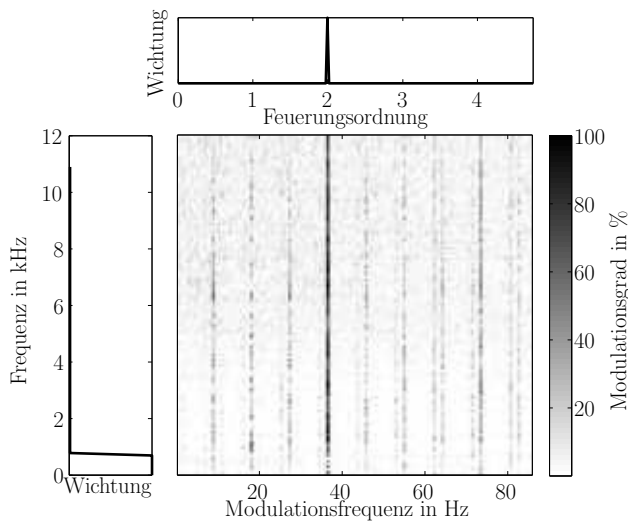


Abbildung 2: Modulationsspektrum eines Luftschallsignals mit Wichtung im Trägerfrequenz- und Modulationsbereich für den relevanten Bereich des Dieselnagelns im Teillastbereich

Ergebnisse

Die Versuche wurden bei der IAV GmbH in Berlin durchgeführt. Ein aktueller, vollindizierter Serien-4-Zylinder Dieselmotor, mit Vollzugriff auf das Steuergerät, wurde in einem vollkonditionierten Motorprüfstand betrieben. Nach Vorgabe durch ein Design of Experiments (DoE) wurden bei 132 Messungen im Betriebspunkt $n = 1900 \frac{1}{\text{min}}$, $T = 120 \text{ Nm}$ Einspritzbeginne und Einspritzmengen variiert, die vorab als relevante Einflußgrößen identifiziert wurden. Neben den Eingangsgrößen und den langsamen Motorreaktionen/Ausgangsgrößen, wie Temperaturen und Drücken im Luftpfad, wurden als schnelle Größen Zylinderdruck, Körperschall und Luftschall an jeweils mehreren Positionen aufgenommen. Dabei kamen drei Mikrofonpositionen im Abstand von einem Meter vom Motorblock zum Einsatz:

Mikrofon 1 - Einlassseite Oberseite
 Mikrofon 2 - Auslassseite Motor
 Mikrofon 3 - Zylinderkopf.

Körperschall wurde an folgenden Positionen gemessen:

KS 1 - Einlassseite Motor
 KS 2-3 - Oberseite Motor
 KS 4 - Ölwanne.

Aus den Beschleunigungsdaten wurde im ersten Schritt durch Integration die Schnelle berechnet. Anschließend konnte aus beiden Signaltypen mit der Lautheit und der Modulation eine Note für das Dieselnagelgeräusch berechnet werden. Die berechneten Noten für das Dieselnageln lagen zwischen 5 und 7 für Luftschallsignale.

Im nächsten Schritt wurde eine Regression zwischen den Noten aus dem Luftschallsignal und den Noten des Körperschallsignals durchgeführt. Der Messdatensatz wurde aufgeteilt in Lern- und Validierungsdaten. Jede Mikrofonposition wurde mit jedem Körperschallsensor korreliert. Als Bewertungskriterium kamen das adjustierte Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 und der Korrelationskoeffizient

r zum Einsatz, Tabelle 1. Alle Körperschallpositionen zeigen gute Korrelationen zu den Mikrofonen. Abbildung 3 zeigt den Korrelationsplot zwischen Mikrofon 1 und Körperschallsensor 4. Der maximale Fehler zwischen modellierten und berechneten Noten ist unter fünf Prozent.

Tabelle 1: Ergebnisse der Korrelationsanalysen zwischen Luft- und Körperschallsignalen

\bar{R}^2/r	Mikro 1	Mikro 2	Mikro 3
KS 1	0.90 / 0.94	0.85 / 0.92	0.87 / 0.93
KS 2	0.86 / 0.93	0.81 / 0.90	0.84 / 0.92
KS 3	0.86 / 0.93	0.82 / 0.91	0.86 / 0.93
KS 4	0.91 / 0.95	0.83 / 0.93	0.87 / 0.93

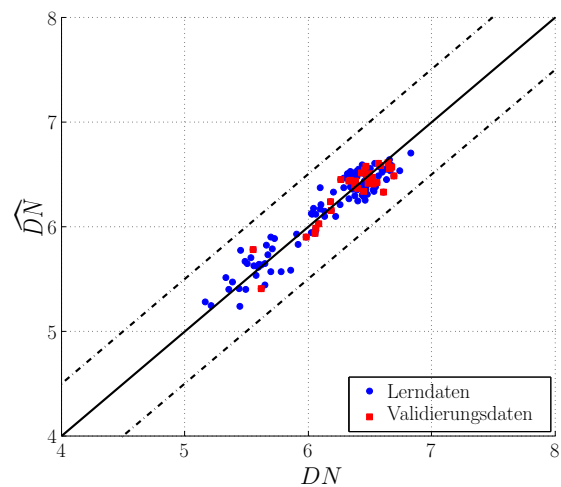


Abbildung 3: Korrelationsplot der berechneten und modellierten Dieselnagelnoten zwischen Mikrofon 1 (DN) und Körperschallsensor 4 (\widehat{DN})

Zusammenfassung

Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass psychoakustische Analysen prinzipiell auf Körperschallsignale angewendet werden können. Die Note für das Dieselnagelgeräusch kann auf 5% genau berechnet werden. Zur Zeit wird die eventuell notwendige Anpassung und anschließende Korrelation für weitere psychoakustische Parameter durchgeführt. Ebenso wird der Einfluss von Drehzahl und Last auf die Korrelation zwischen Luft- und körperschallbasierten Noten untersucht.

Literatur

- [1] Hoppermanns, J.: Objektivierung subjektiver Beurteilungen, FVV Abschlussbericht (2007), Heft 843-2007
- [2] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics: Facts and Models, Springer-Verlag New York, Inc. (2007)
- [3] Bodden, M.; Heinrichs, R.: Analysis of the time structure of gear rattle. Proceedings of the Internoise 99 (1999), Fort Lauderdale, USA, 1273-1278