

Applikationsbeispiele des Dieselnagelindex in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung

Oliver Jung¹, Klaus Pfeleiderer²

¹ Adam Opel AG, 65423 Rüsselsheim, E-Mail: oliver.jung@de.opel.com

² Adam Opel AG, 65423 Rüsselsheim, E-Mail: klaus.pfeleiderer@de.gm.com

Einleitung - Dieselnageln

Der Begriff „Dieselnageln“ steht allgemein für das impulshafte Geräuschverhalten von Dieselmotoren. Dieses wird hauptsächlich durch das Verbrennungsgeräusch verursacht, welches aufgrund hoher Verdichtungsraten, eines steilen Zylinderdruckanstiegs während der Kompressionsphase und durch den schnellen Druckabfall während der Expansionsphase einen impulshaften Klangcharakter aufweist. *Abbildung 1* zeigt einen schematischen Verlauf des Zylinderinnendruckes. Durch die Anzahl der Einspritzungen, deren Startzeitpunkte und Dauer sowie durch die jeweils eingespritzte Kraftstoffmenge lässt sich die Gleichmäßigkeit der Verbrennung und damit auch das Geräuschverhalten maßgeblich beeinflussen. Je steiler die Flanken im Druckverlauf, desto impulshaltiger ist die Ausprägung des Verbrennungsgeräusches.

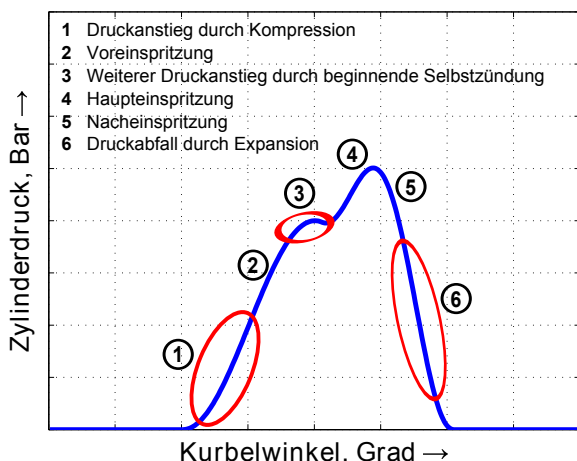


Abbildung 1: Schematischer Zylinderinnendruckverlauf

Weitere Komponenten wie etwa die Injektoren, der Ventilttrieb, die Hochdruck-Kraftstoffpumpe oder Druckpulsationen in den Spritleitungen tragen zusätzlich zum impulshaften und „nageligen“ Geräuscheindruck bei. Zur objektiven Bewertung der Lästigkeit des Dieselnagelns wurde im Rahmen eines Projektes der *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)* der „Diesel Knocking Index“ (DKI) entwickelt, der das Nageln im Außenbereich des Fahrzeuges sowie auf Motorenprüfständen quantifiziert [1]. Diese Metrik bildet aus einer frequenzgewichteten Lautheit und einem frequenzgewichteten Modulationsgrad ein lineares Regressionsmodell und gibt jeweils einen Einzahlwert für die Lautheit, die Modulation und das Gesamtdieselnageln aus. Für den Fahrzeuginnenraum gibt es mehrere Adaptionen des DKI, die sich vor allem in den Frequenzgewichtungen zur

Originalmetrik unterscheiden [2]. Im Folgenden werden einige Anwendungen des DKI beschrieben, angefangen von der Spezifikation der Geräuschquelle Antriebsstrang und den Transferpfaden bis hin zur Gesamtsystemvalidierung im Fahrzeuginnenraum.

Anwendung I - Quellenbeschreibung des Motors

Für die Festlegung der Anforderungen an den Motor ist es notwendig, die gewünschte Dieselnagel-Performance an einem Empfängerort zu definieren, zum Beispiel im Fahrzeuginnenraum oder im Außenbereich des Fahrzeuges. Zudem ist eine Berechnung, Messung oder Abschätzung der Luft- und Körperschalltransferpfade von der Quelle zum Empfänger notwendig, um Zielwerte für Lautheit und Modulation des Basismotors zu formulieren. Befindet sich der Empfängerort außerhalb des Fahrzeuges, ist diese Abschätzung vergleichsweise unkompliziert, da eine reine Luftschallübertragung angenommen werden kann. Am Transfer in den Fahrzeuginnenraum sind jedoch zahlreiche Luft- und Körperschallübertragungswege beteiligt, die zum Teil erst aufwändig bestimmt werden müssen. *Abbildung 2* illustriert die Herangehensweise der Zielwertbestimmung, ausgehend vom gewünschten Geräuscheindruck am Empfängerort.

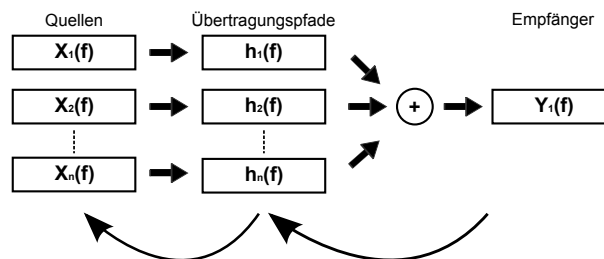


Abbildung 2: Modell der Zielwertbestimmung

Um die Beiträge des Verbrennungsgeräusches und der mechanischen Komponenten unterscheiden zu können, wird aus dem Zylinderinnendruckverlauf ein Einzahlwert des Verbrennungsgeräusches in dB(A) berechnet, der abhängig von den verwendeten Materialkombinationen, der Motorgeometrie sowie der Anordnung der Nebenaggregate eine Korrelation zum DKI aufweist. Die mechanischen Komponenten weisen oftmals akustische Auffälligkeiten auf, mit deren Hilfe eine Schwachstellenanalyse auf Grundlage der Lautheits- und Modulationswerte in einzelnen Frequenzbändern möglich ist. So verursachen etwa die Injektoren oftmals starke Modulationen in der Hauptmotorordnung für Trägerfrequenzen

oberhalb von fünf Kilohertz. Gezielte Gegenmaßnahmen sind beispielsweise die Anbringung von absorptiven Materialien auf dem Common Rail oder die Optimierung der Injektorabdeckungen.

Anwendung II - Außengeräusch des Fahrzeuges

Die Übertragung des Motorengeräusches zu einem vor dem Fahrzeug liegenden Empfängerpunkt ist nahezu ausschließlich von Luftschalltransfer beeinflusst. Mit der vereinfachten Grundannahme, dass sich die Einflüsse von Bestandteilen des Absorptionssystems linear addieren, lassen sich akustische Maßnahmen definieren, die das Erreichen eines gewünschten DKI-Zielwerts für das Außengeräusch ermöglichen. *Abbildung 3* veranschaulicht eine exemplarische Zusammenstellung eines Absorptionssystems, ausgehend von einem Basiswert für die Quelle und einer Anforderung für den Empfängerpunkt.

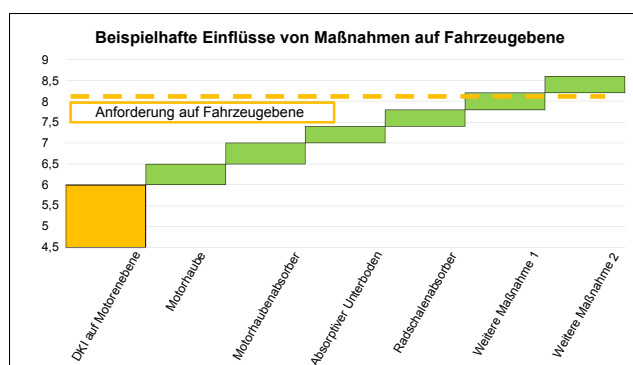


Abbildung 3: Auswirkungen von Maßnahmen auf den DKI im Außengeräusch

Um die Einflüsse der Maßnahmen auf den DKI zu quantifizieren, ist es notwendig, diese zuvor beispielsweise in einem *Design of Experiments (DoE)* zu bestimmen. Teilfaktorpläne ermöglichen es hierbei, den zeitlichen Aufwand für die Versuchsdurchführung bei akzeptabler Ergebnisqualität in einem überschaubaren Rahmen zu halten [3].

Anwendung III - Fahrzeuginnenraum

Die Dämmung des Luftschalls aus dem Motorraum, Absorption im Fahrzeuginnenraum sowie der Beitrag von Körperschallübertragungspfaden bewirken eine Verschiebung der spektralen Verteilung des Dieselnagels im Fahrzeuginnenraum hin zu tieferen Frequenzen. Dies gilt für die Lautheit und gleichermaßen für den Modulationsgrad, da hochfrequente modulierende Schallanteile wie zum Beispiel das Injektorgeräusch stark gedämmt werden, wohingegen das Verbrennungsgeräusch durch die ausgeprägte Körperschallübertragung dominanter wird.

Da ein grundlegendes Ziel in der aktuellen Fahrzeugentwicklung die Optimierung von Spritverbrauch und CO₂-Emissionen ist, gilt es oftmals einen Kompromiss zwischen dem gewünschten Klangbild und ebendieser Optimierung zu finden. Wesentliche Einflussfaktoren sowohl für das Dieselnageln als auch für die Emissionen sind

die Motorkalibrierung sowie die Einspritzstrategie. Mit Hilfe von DKI-Kennfeldern, bestehend aus verschiedenen Motorlasten, die über Motordrehzahl bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen sind, lassen sich kritische Lastfälle von CO₂-optimierten Motorkalibrierungen identifizieren und nach Analyse der Details im Frequenz- und Modulationsspektrum Kompensationsmaßnahmen definieren. Die Werte des DKI dienen hierbei als Marker, die auf ein potentiell problematisches Geräuschverhalten innerhalb eines Kennfeldes hinweisen.

Anwendung IV - Transferpfad vom Motor in den Innenraum

Der DKI kann auch bei den Übertragungswegen vom Motor in den Fahrzeuginnenraum als Indikator von problematischen Transferpfaden dienen. Als zusätzlicher Auswerteparameter einer Betriebschwingungsanalyse ist er sowohl auf Luftschall- als auch auf Körperschallübertragungswege anwendbar. Bei auffälligen DKI-Werten lassen sich zeitvariante Ereignisse durch Berechnung der gewichteten Lautheit und des gewichteten Modulationsgrades der Transferpfade über der Zeit darstellen. Durch die Hinzunahme weiterer Analysen wie zum Beispiel des Isolationsgrads zwischen Quelle und Empfänger ist eine weitere Gewichtung der einzelnen Pfade und somit eine gezielte Definition von Abhilfemaßnahmen möglich.

Zusammenfassung und Ausblick

In der Entwicklung von Motoren und Fahrzeugen wird der Dieselnagelindex in vielen Teilbereichen der Entwicklung eingesetzt. Das Einhalten von Zielwerten auf Komponenten- und Gesamtfahrzeugebene dient hierbei als technische Übersetzung und Quantifizierung von Kundenanforderungen. Zudem dient die Metrik als Marker für kritische Lastfälle und Übertragungswege. Detaillierte Analysen der jeweiligen Frequenz- und Modulationsspektren sind nachfolgend notwendig, um die Ursachen für das jeweilige Geräuschproblem zu finden und Gegenmaßnahmen festzulegen.

Verbesserungspotentiale birgt die Metrik unter anderem in der Harmonisierung der Berechnungsvorschriften zwischen dem Fahrzeuginnenraum und der Motorebene. Der Vergleich und die Interpretation der jeweiligen Einzelwerte könnten so weiter verbessert werden.

Literatur

- [1] Pischinger, Stefan et al.: *Objektivierung subjektiver Geräuschbeurteilungen*, FVV Forschungsvorhaben Nr. 841, 2006.
- [2] Hunken, Dirk et al.: *Development of a Vehicle Interior Diesel Knocking Metric*, AIA-DAGA 2013, Merano, Italien, 2013.
- [3] Gewalt, Markus & Grützmaker, Volker: *Global Road Noise Development: Example for the use of a DfSS approach to optimize the vehicle development*, AIA-DAGA 2013, Merano, Italien, 2013.