

# Auswirkungen von Einspritzvariationen auf das Verbrennungs- und das TPA-synthetisierte Fahrzeuginnenraumgeräusch

Andreas Nicht, M. Ercan Altinsoy  
Lehrstuhl Kommunikationsakustik, TU Dresden, 01062 Dresden,  
E-Mail: andreas.nicht@tu-dresden.de

## Einleitung

Dieselmotoren finden sich heute in vielen Bereichen, z. B. in Schiffen, Baumaschinen, Stromaggregaten und Nutzfahrzeugen. In den letzten Jahrzehnten finden sie aber auch immer stärker Einsatz in PKW. Vor allem in Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse herrschen hohe Qualitätsanforderungen – gerade an die Laufruhe und den Klang des Fahrzeuggeräusches. So ist das im Innenraum wahrgenommene Geräusch ein wesentliches subjektives Beurteilungskriterium für den Fahrzeugkomfort. Das klassische impulshaltige Dieselmotorengeräusch steht der gewünschten Qualitätswahrnehmung und der so transportierten Wertigkeit allerdings entgegen [1].

Es besteht daher eine deutliche Forderung nach einer Senkung der als lästig empfundenen Geräuschkomponenten, zumal diese durch die in den letzten Jahrzehnten erreichte kontinuierliche Senkung des gesamten Fahrzeuggeräusches heute immer stärker in den Vordergrund treten. Dies betrifft besonders die Reduzierung der Impulshaltigkeit des Verbrennungsgeräusches

## Verbrennungsgeräusch

Das Fahrzeuggeräusch setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, von denen das Motorgeräusch als wichtigste Komponente angesehen werden kann. Dieses besteht zum einen aus einem mechanischen Teil und zum anderen aus dem Verbrennungsgeräusch.

Der durch den Verbrennungsprozess im Brennraum des Motors hervorgerufene Zylinderdruckverlauf kann als Ursache für die Kraftanregung der Motorstruktur verstanden werden. Diese Kraftanregung führt zu periodischen, lokal elastischen Verformungen und regt damit die Motorstruktur zu Schwingungen an [2].

Veränderungen an den Verbrennungsparametern bieten daher, neben dem Übertragungsverhalten der Motorstruktur, ein großes Potential zur Optimierung des Motorgeräusches.

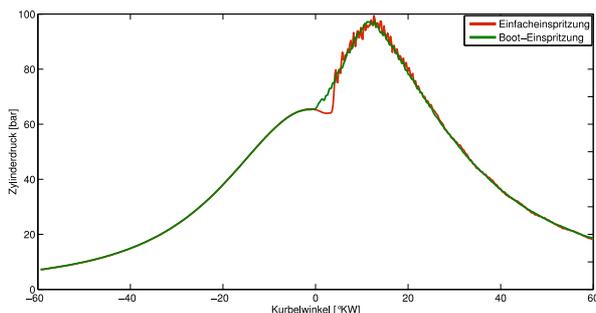


Abbildung 1: Vergleich der Zylinderdruckverläufe ohne Voreinspritzung (rot) und mit Boot-Einspritzung (grün)

## Einspritzparameter

Zur Optimierung der Verbrennung – vor allem mit Blick auf verbrennungs- und abgastechnische Gesichtspunkte – wurde die Voreinspritzung eingeführt. Dabei wird bereits vor dem Oberen Totpunkt (OT) eine geringe Kraftstoffmenge in die Brennkammer eingespritzt. Dies führt neben einer Brennraumvorwärmung vor allem dazu, dass der Druckanstieg bei der Haupteinspritzung weicher ausfällt: Der maximale Druckgradient wird niedriger (Abbildung 1). Das wirkt sich positiv auf die Lautstärke und den Klang des Motorgeräusches aus. Durch Variation der Stärke und des zeitlichen Verlaufs der Voreinspritzung und der Haupteinspritzung kann so das Motorgeräusch verändert werden. Mit moderner Einspritztechnik ist es heute möglich, den Verlauf der Einspritzung sowohl zeitlich als auch quantitativ genau zu steuern. So können moderne Injektoren bei konstant hohem Common-Rail-Druck auch mittlere Einspritzstärken über einen längeren Zeitraum realisieren. Dies ermöglicht die Nutzung der „Boot-Einspritzung“, bei welcher über einen längeren Zeitraum eine schwache Kraftstoffeinspritzung vorgenommen wird (Abbildung 2).

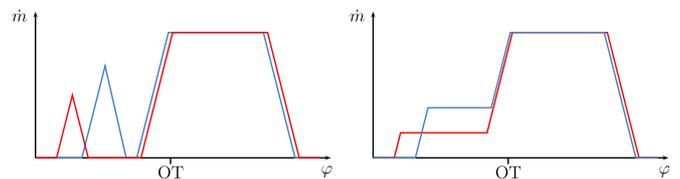


Abbildung 2: vereinfachte Beispiele für unterschiedliche Einspritzverläufe der Einzelvoreinspritzung (links) und der Boot-Einspritzung (rechts)

## Prüfstandsmessungen

Zur Erfassung der Anregungssignale wurden an einem Motorenprüfstand der TU Dresden vibroakustische Messungen durchgeführt. Hierbei wurden die folgenden Messgrößen erfasst:

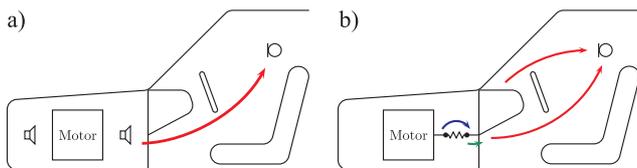
- Zylinderdruckverlauf
- Motorbeschleunigungen x/y/z
- Schalldruckpegel im Prüfraum

Es wurden insgesamt Messreihen mit 30 verschiedene Einspritzvariationen der Einzel-Voreinspritzung (Variation der Stärke und des Zeitpunkts der Voreinspritzung) und 37 Varianten der Boot-Einspritzung (unterschiedliche Länge und Höhe des Vor-Plateaus) bei einem typischen Lastfall untersucht. Neben Vergleichsmessungen ohne Voreinspritzung wurden zusätzlich Messungen im passiven „Schleppbetrieb“ des Motors durchgeführt, um die rein mechanische Anregung zu erfassen.

## Transferpfadanalyse

Um das tatsächlich vom Fahrzeugführer im Innenraum wahrnehmbare Geräusch beurteilen zu können, müssen die Schallübertragungswege vom Motor bis zum Fahrerohr quantifiziert werden.

Daher wurden mittels einer Transferpfadanalyse schrittweise die Luftschall- und Körperschall-Übertragungswege an einem realen Serien-PKW bestimmt. So wurden u. a. mittels Kunstkopf auf dem Fahrersitz die binauralen Empfangssignale, bei Lautsprecheranregung um den Motorblock (Abbildung 3a) bzw. mechanischer Anregung der Motorlager (Abbildung 3b), aufgezeichnet.



**Abbildung 3:** Messung der Luftschall- und Körperschall-Übertragungspfade vom Motor zum Innenraum

## Geräuschsynthese

In Matlab wurde ein Transferpfadsynthese-Programm erstellt, welches aus den am Prüfstand gewonnenen Anregungssignalen und den gemessenen Übertragungspfad synthetische Fahrzeuginnenraumgeräusche erzeugt. Dieses fasst die Luftschall- und Körperschall-Übertragungswege der unterschiedlichen Anregungspositionen zusammen, ergänzt die mechanischen Motorgeräusche und erzeugt aus den am 1-Zylinder-Prüfstandsmotor gewonnenen Anregungssignalen ein synthetisches 4-Zylinder-Geräusch.

## Wahrnehmungsuntersuchungen

Um die tatsächliche Beurteilung des Motorgeräusches bewerten zu können, wurde in einem letzten Schritt mit den synthetisierten Innenraumgeräuschen ein Pilot-Hörversuch durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden aus allen betrachteten Einspritzkonfigurationen insgesamt 13 charakteristische Fälle für die beiden Einspritzkonzepte ausgewählt. Diese wurden einer Gruppe von 15 Probanden dargeboten, welche die Stimuli nach den folgenden Parametern beurteilten:

- Lautheit
- Tonhöhe
- Dieselhaftigkeit
- Lästigkeit

Der Versuch wurde mittels Random Access durchgeführt. Die Bewertung erfolgt auf einer kontinuierlichen Beurteilungsskala mit einer 7-stufigen verbalen Beschreibung.

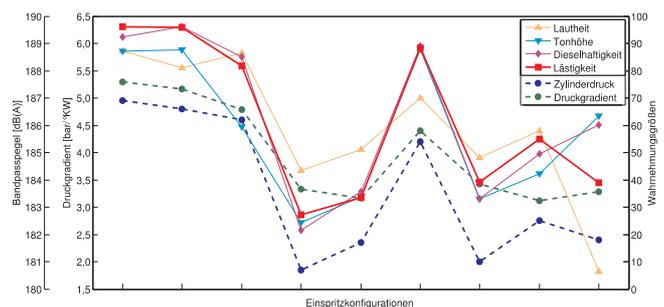
Zur Auswertung wurden zuerst die Korrelationen der psychoakustischen Parameter untereinander, und im Anschluss zu den physikalischen Signalparametern des Innenraumpegels und des Zylinderdrucks, ermittelt.

Es zeigte sich, dass die Lästigkeit eine deutlich höhere Korrelation zur Dieselhaftigkeit als zur wahrgenommenen Lautheit aufweist. Zudem besteht zwar eine deutliche Korrelation des A-bewerteten Schalldruckpegels zur Lautheit, aber nur eine sehr geringe zur Lästigkeit. Dies zeigt, dass die Bestimmung der Lautstärke, also des A-Pegels, nicht geeignet ist, die Lästigkeit des Dieselmotorgeräusches abzuschätzen.

Das Frequenzspektrum des Zylinderdrucks und damit auch des Innenraumgeräusches wird durch die Voreinspritzung vor allem im kHz-Bereich beeinflusst. Die entsprechenden Oktavpegel zeigen eine starke Korrelation zur Lästigkeit, während bei tiefen Frequenzen eher eine negative Korrelation besteht.

## Ergebnisse

Durch die Auswertung der Hörversuche mit den synthetisierten Signalen konnten Optimalbereiche der Einspritzparameter für die Boot-Einspritzung und die Einzel-Voreinspritzung ermittelt werden. Außerdem konnte gezeigt werden, welche Frequenzbereiche für das impulshaltige Geräusch verantwortlich sind, wie diese die Wahrnehmung beeinflussen und durch die Einspritzkonfiguration gesteuert werden.



**Abbildung 4:** Wahrnehmungsgrößen und physikalische Kenngrößen verschiedener Einspritz-Variationen

Zur einfachen Beurteilung wurde zusätzlich zum bekannten Druckgradienten [3] ein Bandpasspegel des A-bewerteten Zylinderdrucks (1–16 kHz) als Kenngröße eingeführt. Dieser zeigt eine stärkere Korrelation zur subjektiv beurteilten Lästigkeit (Abbildung 4). Diese Kenngrößen sollten eine TPA-Synthese und Hörversuche nicht ersetzen, können aber als einfaches Beurteilungsmaß für den direkt gemessenen Zylinderdruck-Verlauf dienen.

## Literatur

- [1] Patsouras, Ch.: Geräuschqualität von Fahrzeugen – Beurteilung, Gestaltung und multimodale Einflüsse. Doktorarbeit, TU München, 2003.
- [2] Skoda, S.: Parametrisierung und Synthese von Dieselmotorgeräuschen. Diplomarbeit, FH Düsseldorf, 2009
- [3] Finger, K.: Untersuchungen zur Kraftanregung durch die Verbrennung beim direkteinspritzenden Common-Rail Dieselmotor unter Berücksichtigung des Körperschallübertragungsverhaltens. Doktorarbeit, TU Darmstadt, 2001.