

Entwicklung einer empirischen Formel zur Bewertung der Tickergeräuschanteile von Motorgeräuschen

Sebastian Schneider¹, Jan Hots², Tommy Luft¹, Hermann Rottengruber¹, Jesko L. Verhey², Hans-Peter Rabl³

¹ Otto-von-Guericke-Universität, Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen, 39106 Magdeburg, E-Mail: sebastian.schneider@ovgu.de

² Otto-von-Guericke-Universität, Abteilung für Experimentelle Audiologie, 39120 Magdeburg

³ CHP Messtechnik, Franz-Mayer-Str. 1, TechBase Regensburg

Einleitung

Der akustische Qualitätseindruck eines Fahrzeugantriebsstrangs wird beim Kauf eines Pkw stetig relevanter. Dabei nimmt die wahrgenommene Geräuschqualität des Motoraggregates eine Schlüsselrolle ein. Durch das Auftreten von störenden Geräuschanteilen kann die Gesamtgeräuschqualität negativ beeinflusst werden. Diese Störgeräusche gilt es daher im Rahmen der Fahrzeugentwicklung weiter zu optimieren, wobei die Identifikation und Bewertung störender Geräuschanteile am Motorgesamtgeräusch Voraussetzungen für eine effektive Akustikoptimierung sind. Ferner können diese Geräuschaspekte anschließend den zu verursachenden Bauteilen zugeordnet werden (bspw. Geräusche von Injektoren und Hochdruckpumpe). Vor allem die impulshaftigen Geräuschkomponenten, speziell das "Tickern", werden als besonders lästig eingestuft.

Geräuschbewertungsmodelle können helfen, diesen Einfluss zu quantifizieren. Sie werden stetig wichtiger für den Entwicklungsprozess neuartiger Verbrennungsmotoren und sollten an den jeweils aktuellen Stand der Motorentechnologie und -entwicklung angepasst und fortlaufend optimiert werden. Mit geeigneten Bewertungsmethoden sind schnelle und objektive Bewertungen von verschiedenen Störgeräuschen, auch getrennt voneinander, möglich. Aktuelle Motoren, unabhängig vom Betriebsverfahren, stellen immer höhere spezifische Leistungen dar und sind somit höher belastet. Aufgrund von modernen Reduzierungsmaßnahmen des Gesamtgeräuschniveaus eines Motors, besonders durch den Einsatz von komplexen Strukturen, Werkstoffen und intelligenter Applikation, treten einzelne Störgeräusche stärker in den Vordergrund. Diese Störgeräusche, darunter das Injektortickern, beeinträchtigen den Komfort des Gesamtfahrzeuges und beeinflussen zusätzlich den akustischen Emissionsgrad. Weiterhin besteht die Gefahr, dass ein zu stark hörbares Tickern vom Verbraucher als technischer Fehler betrachtet wird.

Dieser Beitrag zielt daher darauf ab, die tickenden Geräuschanteile aus dem Gesamtgeräusch zu analysieren und zu bewerten. Dazu werden vorab am Beispiel eines Dieselmotors jene psychoakustischen Größen im Rahmen einer Signalanalyse, bspw. Kurzzeit-FFT, untersucht, welche das Tickergeräusch in ihrer Gesamtheit am ehesten beschreiben können. Es stellte sich heraus, dass die Impulshaftigkeit, die Lautheit sowie die Schärfe den subjektiven Eindruck am besten wiedergeben können.

Mithilfe dieser drei Größen ist es möglich eine empirische Formel zu entwickeln, welche die tickenden Geräuschanteile in ihrer Intensität einstuft. Wie auch bei anderen psychoakustischen Bewertungsskalen wird die Benotung von 1 (sehr tickend) bis 10 (nicht tickend) vorgenommen.

Prüfstands Aufbau und Messtechnik

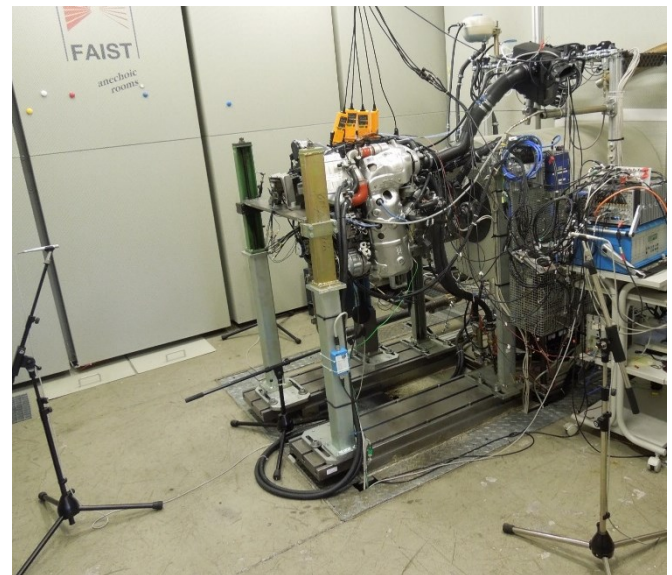


Abbildung 1: Versuchsaufbau am Akustikprüfstand der Universität Magdeburg [1]

Die Prüfstandskammer ist mit schallabsorbierenden Wänden ausgekleidet, wobei das zentral platzierte Versuchsobjekt ausreichend Abstand zu den jeweiligen Wandflächen hat, um Schalldruckmessungen im Nah- bzw. Fernfeld durchführen zu können. Ferner wird eine E-Maschine sowohl als Anlasser als auch als Bremse zur Erzeugung der Motorlast verwendet. Diese ist über eine anderthalb Meter lange, schwingungsgedämpfte Welle mit der Kurbelwelle des Motors verbunden und kann dauerhafte Lasten von bis zu 250 Nm bzw. kurzzeitige Lasten von bis zu 310 Nm zur Verfügung stellen. Die E-Maschine befindet sich aus akustischen Gründen im angrenzenden Raum, was wiederum die Länge der Prüfstandswelle erklärt.

Für die Vermessung der Luftschallemissionen wurden drei ½" Fernfeld-Mikrofone in einem Meter Abstand zum Motor aufgestellt, jeweils an der Kalt, Heiß- und Stirnseite.

Entstehung des Tickergeräusches

Das Tickergeräusch stammt aus dem Hochdruckeinspritzsystem und kann demnach sowohl bei Dieselmotoren als auch bei modernen Ottomotoren auftreten.

Sowohl die Hochdruckpumpe, die Injektoren als auch der Ventiltrieb haben dabei maßgeblichen Anteil. Vorwiegend entsteht das Geräusch durch das Öffnen und Schließen von unterschiedlichen Ventilen, wobei es zu einem Ventilstoß kommt, welcher akustisch als Tickern wahrgenommen wird. Der größte Anteil des Geräusches ist hierbei auf das Zurückfallen der Injektordüsenadel in den Ventilsitz zurückzuführen. Abbildung 2 zeigt einen beispielhaften Verlauf des Injektorstroms.

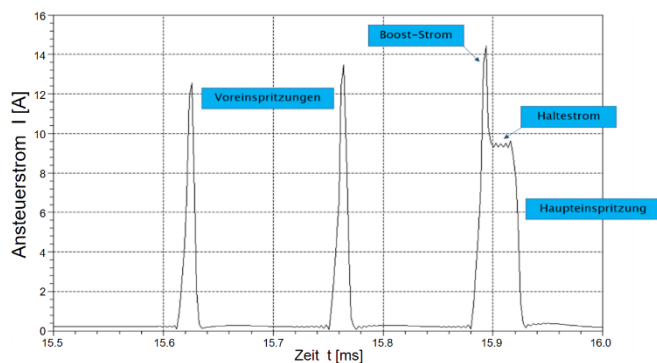


Abbildung 2: Ansteuerstromverlauf eines Einspritzbildes mit zwei Voreinspritzungen und einer Haupteinspritzung

Beim Injektor erfolgt die Kraftstoffeinspritzung mithilfe der Düsenadel, welche durch einen Magneten oder einen Piezokristall angesteuert wird. Bei einem Einspritzvorgang wird der Injektor bestromt, woraufhin die Spule ein Magnetfeld aufbaut und der Anker die Nadel anzieht, welche im Nadelsitz sitzt. Das typische Injektortickern entsteht durch das harte Aufsetzen der Düsenadel in den Nadelsitz. Die Aufsetzgeschwindigkeit der Nadel liegt für magnetventilgesteuerte Injektoren bei rund 0,5 m/s und für piezoaktuierte Injektoren bei rund 1 m/s [3]. Bei schnell aufeinanderfolgenden Mehrfacheinspritzungen setzt sich das Geräusch in der Regel aus mehreren Einzelimpulsen zusammen. Dabei kommt es zu einer Impulsanregung, die zum einen direkt vom Injektor als Geräusch abgestrahlt wird und sich zum anderen über Körperschalltransferpfade auf die Motorstruktur ausbreitet. Bei einer Voreinspritzung fällt die beschriebene Impulsanregung am stärksten aus, da dort die Düsenadel lediglich vom Anker angezogen und nicht länger gehalten wird. Weiterhin erfolgt eine Übertragung des Schalls über den Kraftstoff und wird von den Kraftstoffleitungen abgestrahlt. Allgemein ist anzumerken, dass höhere Einspritzdrücke zu einer verstärkten Geräuschregung führt. [2,3]

In modernen Einspritzsystemen wird in manchen Anwendungen zur Reduzierung des Tickergeräusches ein Bremsstrom appliziert, welcher die Düsenadel kurz vor dem Auftreffen auf den Ventilsitz abbremst und dadurch die kinetische Energie der Düsenadel verringert, siehe Abbildung 3. Dies wird als Softlanding bezeichnet. [4]

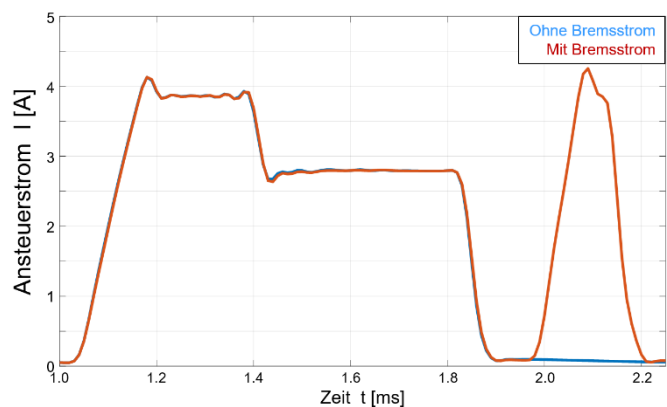


Abbildung 3: Ansteuerverlauf eines Einspritzbildes mit und ohne Bremsstrom (Softlanding der Düsenadel) [4]

Weiterhin kann der Einsatz von Magnetaktuatoren zu einer Minderung der Geräuschbelastung durch das Injektortickern führen. Grund dafür ist, dass durch schneller agierende Aktuatoren, wie Piezoaktuatoren, die Struktur des Zylinderkopfes stärker zu Schwingungen angeregt wird. Eine weitere in der Praxis etablierte Möglichkeit der Tickergeräuschminderung ist der Einsatz von Topcovers, welche das entstandene Tickergeräusch dämpfen. [2]

Geräuschbewertungsmethoden

Für die Einschätzung der Lästigkeit von verbrennungsmotorischen Geräuschen können einerseits Expertenmeinungen auf Basis von Hörversuchen und andererseits empirisch entwickelte Bewertungsformeln herangezogen werden. Eine in der Praxis etablierte Bewertungsformel für die Lästigkeit von Motorengeräuschen stellt der AVL Annoyance Engine Index dar. Dabei wird der von einem Verbrennungsmotor abgestrahlte Luftschall mit einem Kunstkopf oder einem Mikrofon aufgenommen und zunächst die psychoakustischen Kenngrößen Lautheit, Schärfe, Impulshaftigkeit sowie der physikalischen Größe Periodizität berechnet. Diese berechneten Grundgrößen werden zu einem einzahligen Bewertungsindex zusammengefasst. Je höher der Index bewertet wird, desto unangenehmer wird das Geräusch empfunden. [5] Ein weiterer praktikabler Bewertungsindex ist der von Ford entwickelte Diesel Knocking Index, welcher das typische Dieselnageln bewertet. Dabei werden die Impulshaftigkeit und der Lautstärkepegel miteinander zu einem Einzahlwert kombiniert. [6]

Zur Bewertung der Geräuschqualität im Entwicklungsprozess von Motoren und Fahrzeugen werden traditionell Subjektivbewertungen durch Experten- und Laienjurys durchgeführt. Diese haben den Nachteil, dass sie sehr zeitintensiv und durch den subjektiven Eindruck der bewertenden Personen gefärbt sind. Weiterhin können geringe Änderungen im tonalen Anteil nur schwer erfasst werden, da das menschliche Gehör in bestimmten Frequenzbereichen und Tonhöhen seine physikalischen Grenzen erreicht. [2]

Neben den subjektiven Geräuschbewertungsmethoden werden stetig objektive akustische Bewertungsmodelle entwickelt. Zur objektiven Benotung können dafür Verfahren auf Basis akustischer Analysen und Berechnungen genutzt

werden. Schwierig hierbei ist die Differenzierung von mehreren gleichzeitig auftretenden impulsartigen Geräuschtypen. Typische impulsartige Geräuschtypen für einen Verbrennungsmotor sind Nageln, Tickern und Rasseln. Der Grund dafür liegt in der Querempfindlichkeit durch die sehr ähnliche Charakteristik der einzelnen Geräusche. Mithilfe moderner signalanalytischer Methoden und akustischen Berechnungsalgorithmen sind eine Trennung der Störgeräusche und eine darauffolgende Bewertung der Einzelgeräusche möglich. Der größte Vorteil der subjektiven Geräuschbewertung durch Hinzunahme von Berechnungsverfahren ist die Verkürzung und Vereinfachung des gesamten Geräuschbewertungsprozesses in der Entwicklung und Analyse des Motors.

Entwicklung der empirischen Formel zur Bewertung der Tickergeräusche

Im FVV-Projekt „Objektivierung subjektiver Beurteilungen“ (kurz: OSB, FVV-Nr. 841) wurden mitunter zwei neue Bewertungsformeln entwickelt, eine Nagelnote, zur Bewertung des Dieselnagelgeräusches, sowie eine Tickernote, zur Bewertung des Tickergeräusches. Bei letzterer wurde dabei zwischen einer Tickergeräuschbenotung für Otto bzw. für Diesel unterschieden [7]. Die Basis dieser Benotungsmethoden unterscheidet sich hierbei stark zu der in dieser Arbeit entwickelten Methoden. So basiert die Nagelnote (DN) nach OSB allein auf Lautheit (N) und Modulation (M) des Eingangsgeräusches,

$$DN_{stationär} = a + b * N + c * M \quad (1)$$

wobei die Tickernote (TN) nach OSB auf der Kurtosis (Otto)

$$TN_{Otto} = 1.02 + 116.96 * e^{\left(\frac{-I_{Kurtosis}}{0.216}\right)} + 5.18 * 10^{15} * e^{\left(\frac{-I_{Kurtosis}}{0.0184}\right)} \quad (2)$$

bzw. auf der Kurtosis und der Lautheit (Diesel)

$$TN_{Diesel} = 3.23 - 8.28 * N + 0.78 * (-2.6 + 22.3 * e^{\left(\frac{-I_{Kurtosis}}{1.08}\right)}) \quad (3)$$

beruht. a, b und c sind hierbei experimentell ermittelte Konstanten. [7]

Dem in dieser Arbeit entwickelten empirischen Ansatz unterliegt hingegen ein Impulsstärkemodell (I), welches in der Abteilung für Experimentelle Audiologie entwickelt und per Matlab in die PAK-Arithmetik von Müller-BBM integriert wurde. Da ein typisches Dieselnageln eher rau als scharf beschrieben werden kann, wurden die psychoakustischen Kenngrößen Rauigkeit (R) und auch Lautheit in die Formel integriert, sodass folgende Gleichung zur Berechnung der Dieselnote entstand:

$$DN = a * (R * 100) + b * (I * 100) + c * N \quad (4)$$

Da die Benotungsskala der Bewertungsformeln von OSB übernommen werden sollte, (1-10, 1 = starkes Nageln, 10 = kaum Nageln) wurde zunächst eine Skalierung der Dieselnotenformel in Form eines Polynoms dritter Ordnung vorgenommen:

$$DN_{skaliert} = -0.0002442 * DN^3 + 0.0053 * DN^2 - 0.445 * DN + 18.76 \quad (5)$$

Hiernach wurde ein linearer Ansatz gewählt, welcher die signifikanten Unterschiede der einzelnen Notenschritte besser wiedergibt als die skalierte Variante.

$$DN_{linear} = 0.11 * [a * (R * 100) + b * (I * 100) + c * N] - 12.89 \quad (6)$$

Auf Basis dessen wurde die Berechnungsformel durch Hörversuche [8] validiert sowie weiter angepasst, sodass sich eine finale empirische Formel zur Bewertung des Dieselnagelns ergab:

$$DN = -(a * R * 5.395 + b * I * 0.36775 + c * N * 0.253) + 14.2 \quad (7)$$

a, b und c sind hierbei Wichtungsfaktoren (0.0 – 1.0, $\Delta = 0.1$, $a+b+c=1.0$), welche Aussage darüber geben zu wieviel Prozent die psychoakustischen Kenngrößen Einfluss auf die Benotung haben.

Jene empirische Formel zur Berechnung der Dieselnote (7) war letztendlich die Grundlage für eine Bewertungsformel zur Benotung des Tickergeräusches. Dafür wurde zunächst untersucht, welche psychoakustischen Größen zur Charakterisierung eines tickenden Geräusches am meisten beitragen. Da es eine klare Abgrenzung zur Dieselnote geben muss, wurde die Rauigkeit hierbei nicht mehr betrachtet, sondern vielmehr der Einfluss der Schärfe (S) untersucht. Weiterhin unterscheiden sich das Nageln und das Tickern bzgl. des Frequenzbereiches deutlich, da das Dieselnageln etwa bei 1 – 3.5 kHz auftritt, wohingegen sich das Tickern ab etwa 4 kHz stärker ausprägt, als in den unteren Spektren. Aus diesem Grund werden hinsichtlich der Tickernote die Zeitrohdaten der gemessenen Betriebspunkte bei 4 kHz hochpassgefiltert, um das dominante Verbrennungsgeräusch nicht mit in die Benotung einfließen zu lassen.

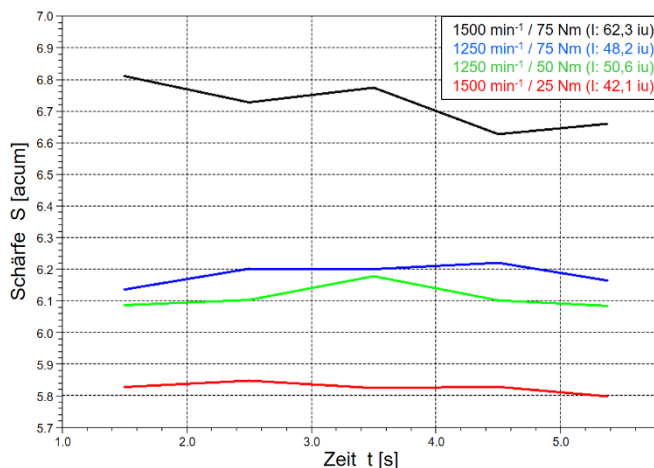


Abbildung 4: Einfluss des Tickerns auf die Schärfe des Geräusches

Abbildung 4 zeigt vier Arbeitspunkte (AP1-4) des mittleren Teillastbereiches, welche sich in Ihrer Impulshaftigkeit stark unterscheiden. (schwarze Kurve: stark impulshaftig, rote Kurve: wenig impulshaftig) Es ist zu sehen, dass sich ebenfalls die Schärfegrade der Punkte nicht nur stark voneinander unterscheiden, sondern dass sich eine gewisse Assoziation zur Impulshaftigkeit beobachten lässt. So weist Arbeitspunkt 1 sowohl die höchste Schärfe, als auch die stärkste Impulshaftigkeit auf, wobei es sich bei Arbeitspunkt 4 genau umgekehrt verhält. Daraus lässt sich ableiten, dass das Tickergeräusch zu einem bestimmten Maße auch vom Schärfegrad des Geräusches abhängt. Demzufolge fließt dieser mit in die Bewertung ein, sodass sich folgende empirische Formel ergibt:

$$TN = -(a * S * 0.4983 + b * I * 0.20894 + c * N * 0.154) + 14.5 \quad (8)$$

Mit dieser, in die PAK-Arithmetik inkludierten Berechnungsformel wurden die gemessenen Arbeitspunkte bewertet, sodass folgendes Diagramm entstand.

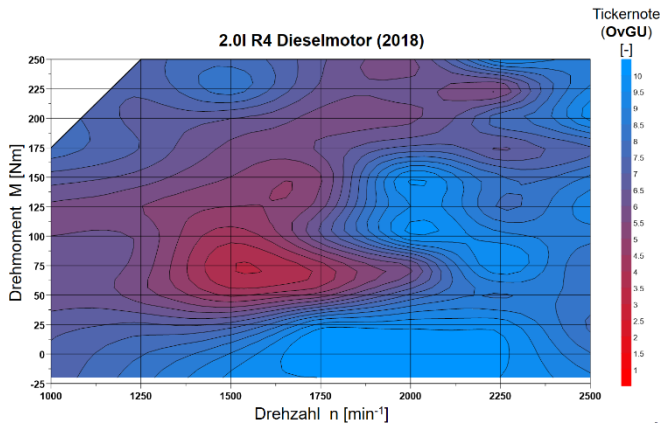


Abbildung 5: Tickernotenverteilung über stationär gemessene Arbeitspunkte

Hierbei wurde vom Schleppbetrieb (negativer Drehmomentbereich) bis zur Volllast des Motors über einen akustisch relevanten Drehzahlbereich gemessen, welcher 2500 min^{-1} hierbei nicht überschreitet, da sonst die mechanischen Geräusche sowie auch das indirekte Verbrennungsgeräusch zu dominant werden. Es ist zu sehen, dass im Schleppbetrieb lediglich bei niedriger Drehzahl ein erhöhtes Tickernote detektiert wird, wohingegen mit steigender Last auch höhere Drehzahlen angesprochen werden. Eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Drehzahl-Last-Verlauf und der Tickernote ist jedoch, im Gegensatz zur Dieselnote, nicht festzustellen. Das stärkste Tickernote wurde im Betriebspunkt 1750 min^{-1} bei 75 Nm lokalisiert, also im mittleren Teillastbereich. Dies konnte durch erste Hörversuche mit wenigen Experten auch bestätigt werden, was allerdings noch umfangreicher validiert werden muss.

Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen an einem 4-Zylinder Dieselmotor durchgeführt, mit dem Ziel eines rein empfindungsbasierten Ansatzes zur Erstellung einer Berechnungsformel für das Tickengeräusch, ausgehend von psychoakustischen Kenngrößen. Dafür wurden akustische Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen und dem vom Einspritzsystem verursachten Tickengeräusch, insbesondere das Injektortickern, analysiert. Besonders die Impulshaftigkeit spielt bei der Bestimmung der Tickernote eine tragende Rolle. Zusätzlich konnte mit den erstellten statischen Kennfeldern herausgestellt werden, dass das Injektortickern vorwiegend im unteren Drehzahl- und Lastbereich auftritt. Anhand von ersten Hörversuchen konnte dieses ermittelte Ergebnis bestätigt werden.

Neben der Untersuchung des Tickengeräusches konnte eine Berechnungsformel für die Tickernote mit Hilfe der Arithmetik in die PAK-Umgebung integriert werden, was eine schnelle Bewertung der aufgenommenen Arbeitspunkte ermöglicht. Dafür wurde die bereits vorhandene Gleichung für die Dieselnote unter Berücksichtigung des Charakters des Tickengeräusches modifiziert. Diesbezüglich wurde im Rahmen der Arbeit untersucht, welche psychoakustischen

Größen die Tickernote hinreichend beschreiben. In folgenden Arbeiten besteht die Aufgabe darin die Tickernote auf einen Ottomotor zu adaptieren und dahingehend unabhängig von der Art des Verbrennungsmotors anzupassen. Hierbei stehen umfangreichere Hörversuche noch aus, um die Ergebnisse der entwickelten Formeln zu validieren.

Literatur

- [1] Schneider, S.; Carstens, J.-H.; Nobis, J.; et.al.: Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung, Abschlussbericht, FVV Vorhaben Nr. 1175, 2016.
- [2] Atzler, M.: Objektivierung subjektiver Beurteilungen II, Abschlussbericht, FVV Vorhaben Nr. 951, 2011.
- [3] Schumann, C.: Motorgeräuschkomponenten II, Abschlussbericht FVV Vorhaben Nr. 1207, 2018.
- [4] Mühlbauer, C.; Rabl, H.-P.; Rottengruber, H.: Akustische Analyse und Optimierung von mechatronischen Kraftstoffeinspritzsystemen, DAGA Rostock, 2019.
- [5] Pflüger, M.; Brandl, F.; et.al.: Fahrzeugakustik, Springer-Verlag Wien New York, 2009.
- [6] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg Verlag Wiesbaden, 3. Auflage, 2017.
- [7] Hoppermanns, J.: Objektivierung subjektiver Beurteilungen, Abschlussbericht, FVV Vorhaben Nr. 841, 2006.
- [8] Zieglarski, R.; Hots, J.; et.al.: Verifikation eines psychoakustischen Modells zur Dieselnagelnote mittels Hörversuchen, Masterprojektarbeit, 2016.