

GANZHEITLICHE VIRTUAL ENGINEERING ANSÄTZE FÜR DIE AKUSTISCHE OPTIMIERUNG VON ELEKTRO- UND VERBRENNUNGSMOTOREN

Fabian Duvigneau, Steffen Liefold, Ulrich Gabbert

1 Motivation

In der Automobilentwicklung werden die Anforderungen der Kunden an die funktionalen und quantitativen Merkmale des Produkts immer schneller und präziser erfüllt. Deshalb treten zunehmend subjektive Eigenschaften in den Vordergrund, die nicht direkt messbar sind, aber mit der Erwartungshaltung der Kunden an die Produktqualität übereinstimmen müssen. Der akustische Eindruck eines Fahrzeugs zählt zu dieser Kategorie. Durch das wahrgenommene Klangbild kann ein positiver Qualitätseindruck beim Kunden hervorgerufen und somit dessen Kaufentscheidung beeinflusst werden. Aus diesem Grund gewinnt die Akustik von Fahrzeugen und deren Einzelkomponenten stark an Bedeutung. Zusätzlicher Druck auf die Automobilindustrie wird durch die gesetzlich erlaubten Grenzwerte für Lärmemissionen generiert, die in den kommenden Jahren weiter herabgesetzt werden.

Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, wie ganzheitliche Virtual Engineering Ansätze gewinnbringend eingesetzt werden können, um das akustische Verhalten einzelner Bauteile oder ganzer Aggregate zu bewerten. Die vorgestellten Ansätze sind für computergestützte Optimierungen geeignet und benötigen keinerlei reale Prototypen. Zudem ist es möglich, nicht nur die klassischen akustischen Parameter wie Schalldruck und Schallleistung auszuwerten, sondern die Wirkung auf den Menschen zu berücksichtigen. Die Methodik ermöglicht daher auch eine Bewertung hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen,

wie beispielsweise die empfundene Geräuschqualität. Im Beitrag werden exemplarisch zwei ganzheitliche Virtual Engineering Ansätze für die akustische Bewertung automobiler Antriebe vorgestellt: eine Simulationskette für einen elektrischen Radnabenmotor und eine Methodik für einen klassischen Vierzylinder-Dieselmotor. Für die numerischen Analysen kommen die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die elastische Mehrkörpersimulation (MKS) zum Einsatz.

2 Ganzheitliche Methodik

Zunächst wird kurz die allgemeine Philosophie der ganzheitlichen Methodik erläutert, bevor in den nachfolgenden Abschnitten auf die Anwendungsmöglichkeiten für elektrische und verbrennungsmotorische Antriebe eingegangen wird.

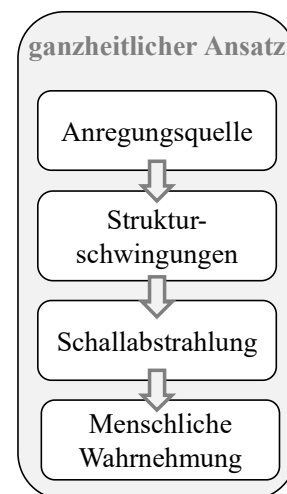


Abb. 1: Ganzheitliche Simulationsmethodik zur Bewertung von automobilen Antrieben hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen

Grundsätzlich besteht die hier vorgestellte Methodik, unabhängig vom konkreten Anwendungsfall, immer aus vier verschiedenen Bausteinen (siehe Abb. 1). Dabei sollen alle vier Bausteine mit Hilfe virtueller Modelle und ohne die Notwendigkeit realer Prototypen analysiert werden können, um bereits im Entwicklungsprozess eine zuverlässige Aussage über das akustische Verhalten des untersuchten Bauteils zu erhalten. Zuerst erfolgt stets die Modellierung der Anregungsquellen, um die resultierenden Anregungskräfte zu berechnen. Im Anschluss daran werden die sich daraus ergebenden Strukturschwingungen ermittelt. Damit stehen auch die Oberflächenschnellen der Struktur zur Verfügung, die genutzt werden, um die resultierende Schalldruckverteilung im umgebenden Luftvolumen zu berechnen. Den Abschluss bildet die psychoakustische Analyse der berechneten Schalldruckverläufe, um die Wirkung des Geräusches auf den Menschen zu prognostizieren.

Es wird angenommen, dass Rückwirkungen eines nachfolgenden Bausteins auf einen vorherigen, wie beispielsweise die Rückwirkung der Luftschwingungen auf die Strukturschwingungen der kompakten Motorbauteile, vernachlässigt werden können [1].

3 Simulationsbasierte Bewertung von Elektromotoren

Ein Anwendungsfall der soeben beschriebenen ganzheitlichen Methodik sind elektrische Maschinen im Allgemeinen und Elektromotoren im Speziellen. Die Elektrifizierung hält aufgrund stetig schärfer werdender Emissionsnormen immer mehr Einzug in die moderne Automobilindustrie. Demzufolge rückt auch die akustische Auslegung dieser Motoren zunehmend in den Fokus der Automobilhersteller. Die Abb. 2 zeigt einen ganzheitlichen Simulationsansatz für die Berechnung der Schallabstrahlung einer elektrischen Maschine am Beispiel eines innovativen Radnabenmotors.

Der in einer vorangegangenen Veröffentlichung [2] beschriebene ganzheitliche Ansatz (siehe Abb. 2) beginnt gemäß Abb. 1 mit der Berechnung der Anregungskräfte. Dazu wird der Magnetkreis unter Ausnutzung der Sektorsymmetrie mit Hilfe eines zweidimensionalen FE-Modells analysiert, um die resultierenden Anregungskräfte zu berechnen.

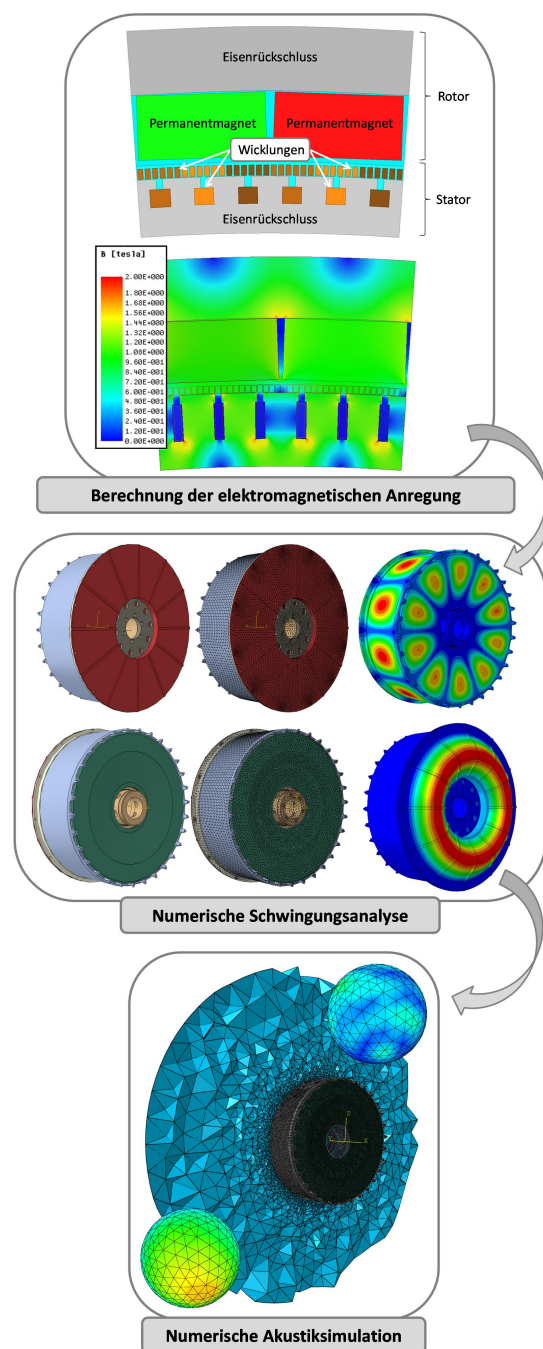


Abb. 2: Ganzheitliche Methodik zur Bewertung von Motorgeräuschen eines Elektromotors

Die zweidimensionale Modellierung hat zur Folge, dass die Magnetkräfte in Richtung der Rotationsachse vernachlässigt werden. Das ist eine übliche Annahme, da diese nichtlinearen Kräfte nur einen geringen Einfluss haben. Des Weiteren werden durch die zweidimensionale Modellierung Änderungen der tangentialen und radialen Magnetkräfte in Richtung der Rotationsachse vernachlässigt. Auch diese Vereinfachung ist gängige Praxis, da der Randeinfluss der Struktur auf die tangentialen und radialen Magnetkräfte gering und zudem lokal begrenzt ist.

Die berechneten Anregungskräfte werden im zweiten Teil der Simulationskette genutzt, um die Strukturschwingungen des Radnabenmotors zu berechnen. Die Rückwirkung der Strukturschwingungen auf den Magnetkreis wird dabei üblicherweise nicht berücksichtigt. Im Anschluss daran werden die berechneten Oberflächenschnellen der Struktur zur Berechnung der resultierenden Schallabstrahlung verwendet. Als Ergebnis liegt der komplexe Schalldruck im gesamten umgebenden Luftvolumen vor. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann das akustische Verhalten bewertet und eine computergestützte Optimierung durchgeführt werden.

4 Simulationsbasierte Bewertung von Verbrennungsmotoren

Die nachfolgend dargestellten Entwicklungen beziehen sich auf die Akustik von Verbrennungsmotoren, lassen sich aber auch für Elektromotoren anwenden [1]. Das Hauptziel ist es, durch eine adäquate Modellierung die Wirkung der Motorgeräusche auf den Menschen zu berücksichtigen und nicht nur die physikalischen Parameter der resultierenden Schallabstrahlung zu berechnen.

Das Besondere des erstmals in [3] präsentierten Ansatzes besteht darin, Prognosemodelle für die auditive Wahrnehmung des Menschen unter Nutzung von virtuellen Modellen zu gewinnen. Üblicherweise wer-

den psychoakustische Modelle auf Basis von Ergebnissen aus Probandenversuchen entwickelt, die mit Hilfe von aufgezeichneten Geräuschen realer Fahrzeuge, Komponenten oder Prototypen durchgeführt werden. Die in [3] vorgestellte Nutzung numerischer Ergebnisse bietet den großen Vorteil, bereits zu einem frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses eines Fahrzeugs, zu dem noch kein realer Prototyp existiert, erste Informationen über die zukünftige Geräuschqualität zu erhalten und in Abstimmung mit den Entwicklergruppen anderer Themenbereiche konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der akustischen Qualität realisieren zu können. Mit Hilfe von CAD-Daten lassen sich geeignete Modelle für akustische Berechnungen und die daran anschließende psychoakustische Bewertung generieren. Mit diesem neuen Ansatz wird der gängigen Praxis entgegengewirkt, akustische Untersuchungen und die sich daraus typischerweise ergebende Forderung nach akustischen Verbesserungen erst nach Fertigstellung eines Fahrzeugprototyps durchzuführen. Diese stark auf Experimenten basierende Vorgehensweise erfordert zeit- und kostenintensive Iterations Schleifen, um der akustischen Wunschvorstellung schrittweise näher zu kommen.

In Abb. 3 ist die ganzheitliche Simulationsmethodik in einer Übersichtsgrafik dargestellt. Der Ansatz besteht aus zwei Hauptbestandteilen, den numerischen und den psychoakustischen Analysen. Der für die numerische Berechnung der Schallabstrahlung von Verbrennungsmotoren entwickelte Teil der Simulationsmethodik ist in [4] detailliert erläutert. Die Berechnung beginnt im ersten Schritt mit einer elastischen Mehrkörpersimulation des Kurbeltriebs des Motors unter Berücksichtigung der elasto-hydrodynamischen Kontakte. Dadurch ist es auch möglich, die akustischen Auswirkungen von modifizierten Kurbeltriebdesigns, wie beispielsweise Variationen der Kolbenfeingeometrie (Ovalität, Balligkeit), Desachsierungen, Schränkungen und ähnliches, zu berechnen.

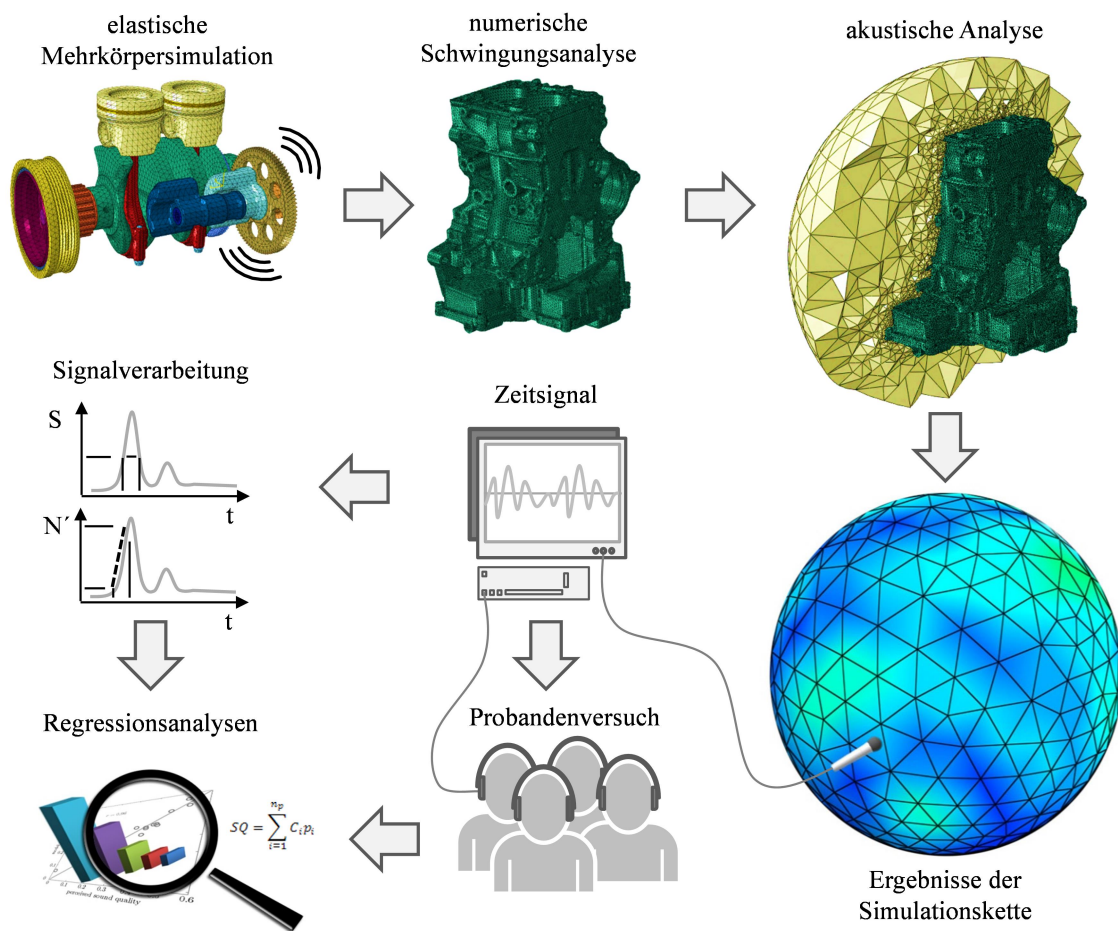


Abb. 3: Ganzheitliche Methodik zur Bewertung von Geräuschen hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen

Zusätzlich können die tribologischen Kenngrößen analysiert werden, die durchaus Zielkonflikte aufweisen können. Zusammen mit dem aus dem Verbrennungsprozess resultierenden Zylindergasdruck bilden die Grundlagerkräfte und die Aufschlagimpulse auf die Zylinderwände die wesentlichen akustischen Anregungsquellen. Ohne eine derartige numerische Analyse muss für die nachfolgende Schwingungsanalyse auf experimentell bestimmte Anregungssignale zurückgegriffen werden. Dies bedeutet einen sehr großen Aufwand sowie die Notwendigkeit, reale Prototypen zur Verfügung zu haben. Außerdem können einige Anregungsmechanismen, wie die Aufschlagimpulse auf die Zylinderwände durch Kolbenquer- und Kolbenkippbewegungen sowie die Deformationen der Zylinderwände aufgrund der Zündexplosionen, nur sehr schwer

bzw. gar nicht messtechnisch erfasst werden. Die elastische Mehrkörpersimulation ist also unbedingt erforderlich, um eine realistische Schwingungserregung des Motors berücksichtigen zu können. Über den Zylindergasdruckverlauf als Eingangsgröße ist es auch möglich, Modifikationen im Verbrennungsprozess selbst, wie beispielsweise zusätzliche Einspritzungen oder geänderte Zündzeitpunkte, hinsichtlich der akustischen Auswirkungen zu analysieren. Modifikationen am Ansaug- und Abgastrakt sowie auch am Turbolader, die zu Änderungen des Ladeluftvolumens, der Strömungsverhältnisse, der Luftzu- und -abfuhr und somit zu Änderungen des Gasdruckverlaufes führen, können ebenfalls hinsichtlich der Schwingungserregung des Rumpfmotors berücksichtigt werden.

Als nächster Schritt in der ganzheitlichen Simulationemethodik wird ein dreidimensionales FE-Modell des Zylinderkurbelgehäuses (ZKG) einschließlich der wichtigsten Anbauteile benötigt (siehe Abb. 3). Die Anregung des ZKGs erfolgt mit den im ersten Schritt ermittelten zeitlich veränderlichen Kräften. Das Ergebnis dieser sehr zeitaufwendigen dynamischen Berechnung beinhaltet unter anderem die Schwinggeschwindigkeiten (Schnelle) an der Oberfläche des ZKGs. Im dritten Schritt folgt eine akustische Berechnung. Dazu wird ein akustisches FE-Modell des Luftvolumens erzeugt, das den Motor umschließt. Die im zweiten Schritt berechneten Schwinggeschwindigkeiten an der Oberfläche des ZKGs werden auf das Luftvolumen übertragen und regen es an. Die dadurch erzeugten Schallwellen breiten sich aus und lassen sich als Druckschwankungen an jedem Punkt des Luftvolumens berechnen. Als Ergebnis stehen die klassischen physikalischen Größen der Akustik im gesamten umgebenden Luftvolumen zur Verfügung. Diese Ergebnisse können für die psychoakustische Modellbildung hörbar gemacht und für repräsentative virtuelle Mikrofonpositionen analysiert werden [3]. Die so gewonnenen Zeitsignale werden einem Signalverarbeitungsprozess unterzogen und bilden die Grundlage für die Berechnung der psychoakustischen Grundparameter, wie beispielsweise Lautheit, Rauigkeit und Schärfe. Die simulierten Motorgeräusche können nach der Auralisierung auch durch Probanden in Hörversuchen individuell bewertet werden. Abschließend werden die Ergebnisse der Signalanalyse und der Hörversuche anhand von Regressions- und Korrelationsanalysen miteinander verglichen. Für das Prognosemodell werden die objektiven Parameter verwendet, die die beste Korrelation mit der subjektiven Empfindung der Geräuschqualität aufweisen. Dabei muss es sich bei den am besten geeigneten objektiven Parametern nicht um psychoakustische Grundgrößen handeln; es können beispielsweise auch deren zeitliche Ableitungen genutzt

werden. Prinzipiell kann jeglicher aus dem Zeitsignal mit Hilfe von mathematischen Vorschriften berechenbarer Parameter genutzt werden. Im Allgemeinen werden aber Parameter mit einer interpretierbaren Bedeutung bevorzugt. Nähere Details zur psychoakustischen Modellbildung sind in [1] zu finden.

Der vorgestellte Virtual Engineering Ansatz ist nur dann für eine computergestützte akustische Optimierung geeignet, wenn auch die empfundene Geräuschqualität von Motorgeräuschen sehr gut vorhergesagt werden kann, die nicht Bestandteil des Entwicklungsprozesses des Vorhersagemodells waren. Aus diesem Grund wurde in [3] gezeigt, dass die psychoakustischen Modelle in der Lage sind, auch alternative Geräusche zuverlässig zu bewerten.

Die aufwendigen Hörversuche als einzige experimentelle Komponente der hier vorgestellten Methodik sind nicht mehr notwendig, wenn das Prognosemodell einmal geeignet generiert und verifiziert wurde. Variantenvergleiche und Optimierungen können dann ohne erneuten experimentellen Aufwand durchgeführt werden. Außerdem ist es möglich, die Vorhersagemodelle durch eine entsprechende Auswahl der Probanden an die gewünschte Zielgruppe anzupassen. In [5] wurden beispielsweise für impulshafte Fahrzeuggeräusche durch entsprechende Probandenselektion verschiedene Modelle für China, die USA und Europa generiert und miteinander verglichen. Es kann aber auch hinsichtlich alternativer Kriterien, wie Altersgruppen oder Markenzugehörigkeit, selektiert werden.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Methodik präsentiert, die die simulationsbasierte Bewertung von automobilen Antrieben hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen ermöglicht und sowohl für elektrische als auch verbrennungsmotorische Antriebe anwendbar ist. Der entwickelte ganzheitliche Ansatz

sowie dessen einzelne Komponenten wurden in [1, 3, 4] mit Hilfe von Messungen am Motorprüfstand und mittels Probandenbefragungen validiert, um deren Prognosefähigkeit und Zuverlässigkeit nachzuweisen.

Der wesentliche Vorteil des vorgestellten Virtual Engineering Ansatzes besteht darin, dass bis auf optionale Validierungszwecke keine realen Prototypen des Motors oder einzelner Komponenten benötigt werden. Der einzige experimentelle Aufwand der ganzheitlichen Methodik ist ein Hörversuch, falls nicht bereits ein geeignetes psychoakustisches Modell vorliegt. Der Hörversuch kann mit Hilfe auralisierter Simulationsergebnisse durchgeführt werden und ist demzufolge bereits früh im Entwicklungsprozess durchführbar. Somit eröffnet der entwickelte ganzheitliche Ansatz die Möglichkeit, die Motorakustik kostengünstig und sehr früh bewerten zu können. Auf diesem Wege kann der heute noch üblichen Praxis entgegengewirkt werden, die Akustik erst an dem nahezu fertigen Produkt zu bewerten und zu verbessern. Da zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess der Handlungsspielraum nur noch gering ist, lassen sich kaum noch optimale Lösungen erreichen. Mit Hilfe der vorgestellten Methodik ist es möglich, sowohl konstruktive Maßnahmen, beispielsweise das Einbringen von Rippen oder Modifikationen am Kurbeltrieb bzw. Magnetkreis, als auch Einflüsse des Verbrennungsprozesses hinsichtlich des resultierenden akustischen Verhaltens zu bewerten. Gleichzeitig löst der präsentierte Ansatz das Problem, dass akustische Optimierungen üblicherweise immer noch bezüglich klassischer akustischer Größen, wie dem Schalldruck oder der Schallleistung, durchgeführt werden und die Wirkung auf den Menschen sowie der Einfluss der menschlichen Wahrnehmung nur unzureichend Berücksichtigung finden. Dies widerspricht der Kategorisierung der Akustik als Komfortproblem, da Komfort untrennbar mit der Empfindung des Menschen verknüpft ist. Der ganzheitliche Ansatz bietet die

Möglichkeit, sowohl einfache Grundparameter der Psychoakustik (Lautheit, Schärfe usw.) als auch komplexere Größen, wie beispielsweise die empfundene Geräuschqualität, zu berechnen.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes "Competence in MObility - COMO III", das mit Geldern des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und des Landes Sachsen-Anhalt gefördert wird.

7 Literatur

- [1] F. Duvigneau, "Ganzheitliche simulationsbasierte Bewertung der Akustik von automobilen Antrieben", Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2017.
- [2] F. Duvigneau, S. Perekopskiy, R. Kasper, U. Gabbert, "A holistic simulation workflow to design an acoustically optimized electric wheel hub motor", Design, Modelling and Experiments of Advanced Structures and Smart Systems – DeMEASS VIII, Moskau, 2017
- [3] F. Duvigneau, S. Liefold, M. Höchstetter, J. L. Verhey, U. Gabbert, "Analysis of simulated engine sounds using a psychoacoustic model", Journal of Sound and Vibration, Volume 366, 2016, pp. 544-555. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.11.034
- [4] F. Duvigneau, S. Nitzschke, E. Woschke, U. Gabbert, "A holistic approach for the vibration and acoustic analysis of combustion engines including hydrodynamic interactions", Archive of Applied Mechanics, Volume 86, Issue 11, 2016, pp. 1887-1900. DOI: 10.1007/s00419-016-1153-5
- [5] F. Duvigneau, M. Höchstetter, U. Gabbert, "Objektivierung der auditiven Wahrnehmung von Fahrzeuggeräuschen", Lärmbekämpfung, Bd. 11 (2016) Nr.3 – Mai, pp. 99-104