

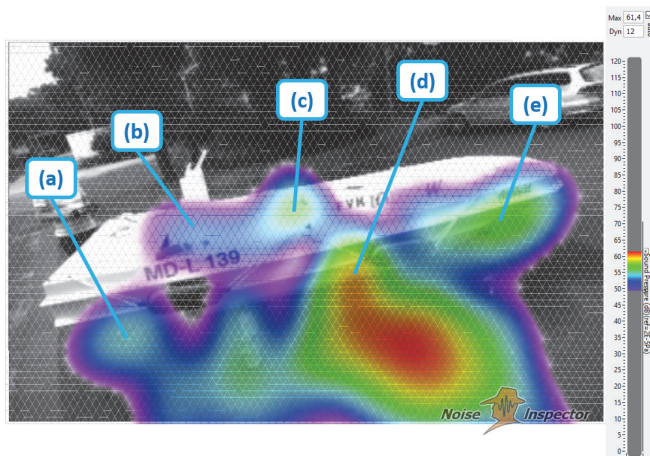
# Rückwirkungsbehaftete gekoppelte Analyse der Elektrodynamik, vibroakustischen Strukturschwingungen und Rotordynamik des elektrischen Antriebsstranges eines Gleitbootes

Fabian Duwigneau, Sebastian Koch, Christian Daniel, Elmar Woschke, Daniel Juhre

Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland, Email: fabian.duwigneau@ovgu.de

## Einleitung

Im Kontext der aktuellen Mobilitätswende steht das Verhalten von Elektromotoren und ganzen Elektroantriebssträngen zunehmend im Fokus. In diesem Beitrag wird ein ganzheitlicher Simulationsansatz vorgestellt, der in der Lage ist, die Elektrodynamik, Vibroakustik und Rotordynamik gekoppelt zu betrachten. Dabei ist es möglich, Wechselwirkungen rückwirkungsbehaftet zu berücksichtigen, was insbesondere bezüglich möglicher Änderungen des Luftspaltes aufgrund der Rotordynamik und vibroakustischer Schwingungen von hoher Bedeutung ist. Solche Luftspaltänderungen können in der Folge wiederum eine signifikante Beeinflussung der Anregung (also der resultierenden elektrodynamischen Kräfte) bewirken, welche das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems maßgeblich bestimmen. Im Rahmen der ganzheitlichen Simulationsmethodik werden sowohl die Finite-Elemente-Methode (FEM) als auch Mehrkörpersimulationen (MKS) eingesetzt, um für die zugeordneten Teilprobleme die Verwendung vorteilhafter Lösungsmethoden zu ermöglichen.



**Abbildung 1:** Mikrofonarraymessung des elektrischen Gleitbootes an Land. Mittels Beamforming ermittelte Schalldruckamplituden im Frequenzbereich 2-3 kHz.

Im vorliegenden Beitrag wird der entwickelte Workflow für die Analyse eines elektrischen Gleitbootes eingesetzt, das mit zwei identischen Antriebssträngen ausgestattet ist. Ziel ist neben der Validierung der Simulationsansätze und der detaillierten Analyse auch die Verbesserung des elektrischen Antriebsstranges hinsichtlich seines Schwingungsverhaltens sowie der Schallemissionen.

In Abbildung 1 ist ein beispielhaftes Messergebnis des Gleitboot-Prototypen dargestellt. Die Schalldruckamplituden wurden mit einem Mikrofonarray unter Anwendung eines Beamforming-Algorithmus ermittelt. Die Messung erfolgte an Land sequentiell von allen Seiten, außerdem wurden potentielle Quellen sowohl einzeln als auch zusammen betrieben (die beiden Elektromotoren und die Kühlwasserpumpe). Im dargestellten Frequenzbereich von 2-3 kHz sind fünf auffällige Quellen für Schallemissionen markiert: (a) der Propeller, (b) die Kühlwasserpumpe, (c) der Elektromotor des linken Antriebsstranges, (d) der Elektromotor des rechten Antriebsstranges (sowie deutliche Reflexionen am schallharten Boden), (e) der Bugbereich des Schiffsrumpfes. Es ist klar zu erkennen, dass die Elektromotoren einen wesentlichen Beitrag zur Schallabstrahlung liefern. Auch die an den Schiffsrumpf übertragenen Strukturschwingungen, die zur Abstrahlung im Bugbereich führen, werden augenscheinlich durch den Antriebsstrang verursacht. Zur vibroakustischen Verbesserung des Gleitbootes wurden deshalb Untersuchungen des elektrischen Antriebsstrangs durchgeführt. Die im nächsten Abschnitt vorgestellten Simulationsmethoden wurden nachfolgend eingesetzt, um einen hinsichtlich der Akustik verbesserten Antriebsstrang zu entwickeln.

## Simulationsmethodik

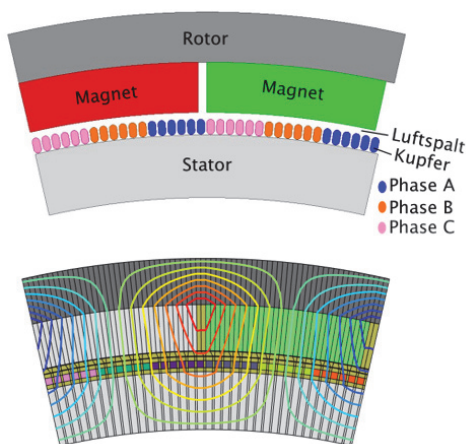
Die Elemente der Simulationskette, die hier kurz vorgestellt werden, sind nicht auf diesen Anwendungsfall beschränkt sondern auf elektrische Maschinen im Allgemeinen anwendbar. In Abbildung 2 ist der Antriebsstrang im Sinne einer Mehrkörpersimulation schematisch dargestellt, wobei die Welle als elastischer Körper ausgeführt ist. Alle Lager sind als Federelemente modelliert, deren nichtlineare Federkennlinien vorab über FE-Kontaktsimulationen bestimmt werden. Der Elektromotor (links) und der Schiffspropeller (rechts) sind im Rahmen der MKS als Starrkörper modelliert.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Antriebsstranges mit Motor, Welle, Lagern und Propeller.

Wie bereits erwähnt, sind im Gleitboot zwei identische Antriebsstränge verbaut. Bei den Elektromotoren han-

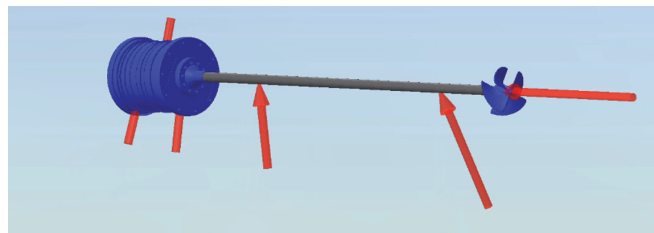
delt es sich um Außenläufer mit Luftspaltwicklung, die den in vorangegangenen Arbeiten [1] untersuchten elektrischen Radnabenmotoren im Grunddesign sehr ähnlich sind. In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau des Magnetkreises dargestellt. Zur Lösung der Differentialgleichungen der Elektrodynamik wird die FEM eingesetzt, dabei werden aus Effizienzgründen ausschließlich zweidimensionale Modelle genutzt. Demzufolge werden Änderungen in Höhenrichtung der zylinderförmigen elektrischen Maschine vernachlässigt. Vorstudien haben durch den Vergleich von 2D- und 3D-Modellen verschiedener Höhe gezeigt, dass diese Vereinfachung lediglich in den Randbereichen (unteres und oberes Ende) zu signifikanten Abweichungen führt, die aber angesichts des enormen Rechenzeitunterschiedes akzeptabel sind.



**Abbildung 3:** Oben: Aufbau des Motorsegmentes (Minimalausschnitt). Unten: exemplarisches Ergebnis des A-Feldes der eigenen Umsetzung mit höherwertigen Elementen.

Um die gekoppelte Simulation bestehend aus Rotordynamik und Elektrodynamik effizienter zu gestalten, wurden beide Teilgebiete im Rahmen einer Inhouse-Software umgesetzt. Die Kommunikation zwischen den Programmen erfolgt dabei nicht dateibasiert sondern durch gemeinsamen Arbeitsspeicherzugriff. Durch die eigene Umsetzung der Elektrodynamik konnten zusätzlich auch höhere FE-Ansatzfunktionen implementiert werden, die in kommerziellen Softwarepaketen nicht verfügbar sind. Darüber hinaus stellt die Kopplung von Rotordynamik und Elektrodynamik an sich einen Neuheitswert dar, insbesondere wenn sie, wie im vorliegenden Fall, rückwirkungsbehaftet umgesetzt ist. Nähere Details zur Kopplung von Elektrodynamik und Rotordynamik sind in [2] und [3] zu finden. In Abbildung 3 ist der Minimalausschnitt des Magnetkreises dargestellt, der sich periodisch wiederholt. Folglich können reine elektrodynamische Analysen auf Basis dieses Minimalmodells mit periodischen Randbedingungen durchgeführt werden. Sobald allerdings eine gekoppelte Analyse durchgeführt werden soll, muss der gesamte Magnetkreis als FE-Modell berücksichtigt werden. Dies resultiert daraus, dass sich dann Rotor und Stator nicht mehr in perfekter Position zueinander befinden und Verschiebungen des Rotormittelpunktes auftreten, wodurch die Periodizitätsannahme nicht mehr zulässig ist. Somit

ergibt sich überall im Magnetkreis ein unterschiedlicher Luftspalt zwischen Stator und Rotor, der zudem auch noch zeitlich veränderlich ist. Dadurch ergibt sich wiederum winkel- und zeitabhängig eine andere elektrodynamische Situation bzw. aus mechanischer Sicht: lokal verschiedene resultierende Kräfte und Momente.



**Abbildung 4:** Exemplarisches Ergebnis der Mehrkörpersimulation.

Die Lösung der Rotor- und Elektrodynamik erfolgt in einem gemeinsamen Zeitintegrationsschema. In jedem Zeitschritt wird die elektrodynamische FE-Analyse im Rahmen der Mehrkörpersimulation aufgerufen. Als Ergebnis der gekoppelten Simulation liegen alle Kräfte und Momente vor, die den Antriebstrang zu akustisch relevanten Strukturschwingungen anregen: die elektrodynamischen Kräfte und Momente, die auf die Magnete des Rotors wirken und die aus der Rotordynamik stammenden Kräfte, die insbesondere als Lagerkräfte an das vibroakustisch schwingfähige System weitergegeben werden. In Abbildung 4 sind solche Kraftvektoren (rote Pfeile) als Ergebnis einer Mehrkörpersimulation exemplarisch dargestellt. Aktuell ist die Kopplung der Rotor- und Elektrodynamik so umgesetzt, dass eine Schiefstellung des Rotors nicht berücksichtigt wird. Es wird also angenommen, dass Rotor und Stator immer parallel zueinander sind. Die Berücksichtigung von Schiefstellungen kann aber durch mehrere 2D-Querschnitte in unterschiedlichen Ebenen realisiert werden.

Die Anregungssignale aus Elektro- und Rotordynamik liegen im Zeitbereich vor und werden anschließend einer Fast-Fourier-Transformation unterzogen, da die nachfolgende Schwingungsanalyse im Frequenzbereich durchgeführt wird. Für die Schwingungsanalyse wird die FEM eingesetzt. Im vorliegenden Beitrag wird ausschließlich die Schallabstrahlung des Elektromotors analysiert und zur Effizienzsteigerung der Schwingungsanalyse eine modale Reduktion eingesetzt. Die resultierenden Oberflächenschnellen der Struktur werden in einer nachfolgenden Analyse genutzt, um die Schallabstrahlung in die Umgebungsluft unter Freifeldbedingungen zu berechnen. Aktuell wird dazu die FEM unter Nutzung eines kugelförmigen Luftvolumens mit absorbierenden Randbedingungen an der Peripherie eingesetzt. Die Simulationskette ist in diesem Punkt allerdings modular, so dass natürlich auch die Randelementemethode genutzt werden könnte. Bezüglich der FE-Diskretisierungen der Struktur und des Fluids ist, wie üblich, auf den interessierenden Frequenzbereich zu achten. Aufgrund der Modularität ist es im Bereich der Modal- und Schwingungsanalyse sowie der Akustiksimu-

lation möglich, auch kommerziell verfügbare Softwarepakete zur Berechnung zu nutzen. Die Akustikanalyse bildet den Abschluss der ganzheitlichen Simulationsmethodik. Zur Validierung der Simulationswerkzeuge wurden verschiedene Prüfstandsmessungen durchgeführt (sowohl bezüglich der elektrischen Größen und auftretenden Drehmomente als auch der resultierenden Schwingungen sowie der Schallabstrahlung). Nähere Informationen zu den Validierungsexperimenten sind in [4] zu finden. Darüber hinaus wurden alle Bestandteile der modularen Gesamtmethodik vorab einzeln mittels analytischer und numerischer Referenzergebnisse verifiziert.

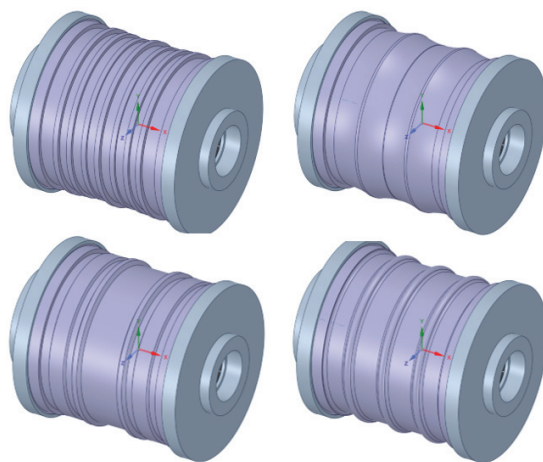
Als Ergebnis der Akustiksimulation können neben der Schalleistung als skalare Größe, wie gewöhnlich, Schalldruckverteilungen bei bestimmten Frequenzen oder Schalldruckspektren an definierten Positionen analysiert werden. Zukünftig soll die Simulationsmethodik analog zu einer früheren Arbeit [5] erweitert werden. Dabei geht es um die Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung über psychoakustische Analysen. Der aktuelle Workflow ermöglicht bereits die Auralisierung der Simulationsergebnisse an virtuellen Mikrofonpositionen. Demzufolge können mit Hilfe dieser Geräuschsignale auch weiterführende psychoakustische Analysen und Hörversuche durchgeführt werden.

## Optimierung der Rotorgeometrie

Nach erfolgreicher Validierung der ganzheitlichen Simulationsmethodik wurden Variantenrechnungen durchgeführt, um ein akustisch verbessertes Motordesign zu erzielen. Designfreiheiten standen dabei ausschließlich bezüglich der Außenkontur, also der Rotorstruktur, zur Verfügung. Alle anderen Bauräume sind bereits durch andere Gruppen vereinnahmt, da die gewünschte Leistung und funktionsrelevante Kühlbarkeit in jedem Fall gewährleistet bleiben sollten. Neben der Reduktion der Schallabstrahlung stand eine minimale Zusatzmasse im Fokus. Der Aufbau der äußeren Rotorstruktur ist simpel und besteht aus einem Stahlzylinder, an dessen Innenseite die Permanentmagnete appliziert sind, und zwei Seitendeckeln aus Aluminium. In Abbildung 5 sind einige der untersuchten Varianten dargestellt. Zusätzlich zur Wirksamkeit und Zusatzmasse spielten Fertigbarkeit und Preis ebenfalls eine Rolle.

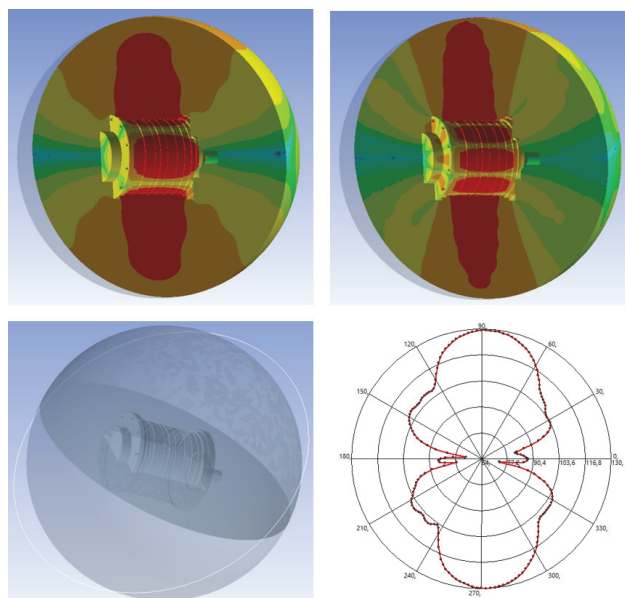
Im Rahmen des vorliegenden Beitrages erfolgt die akustische Bewertung der verschiedenen Varianten auf Basis klassischer physikalischer Größen. Beispielhafte Ergebnisse sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Bei auffälligen Frequenzen wird die Schalldruckverteilung und Richtcharakteristik analysiert, wie in Abbildung 6 zu sehen. Frequenzen mit deutlich erhöhten Amplituden sind nicht ausschließlich die Eigenfrequenzen des Elektromotors sondern auch diejenigen, die durch die Anregung des aktuellen Betriebszustandes verursacht werden (drehzahlsynchrone Anteile). Diese wesentlichen Frequenzanteile fehlen, wenn die Anregungsquellen aus Rotor- und Elektrodynamik nicht berücksichtigt werden. Die Schallemission von elektrischen Maschinen ist bekanntermaßen

sehr tonal, folglich ist ein Ergebnis, dem wesentliche tonale Anteile fehlen, unzureichend. Dies ist insbesondere der Fall, wenn es sich um fehlende tonale Anteile mit Bezug zum aktuellen Betriebszustand, also der aktuellen Drehzahl und Last, handelt. Aus diesem Grund ist eine ganzheitliche Simulationsmethodik unter Berücksichtigung aller wesentlichen Anregungsquellen, wie sie in diesem Beitrag vorgestellt wurde, für eine realistische akustische Bewertung des Gesamtsystems zwingend erforderlich.



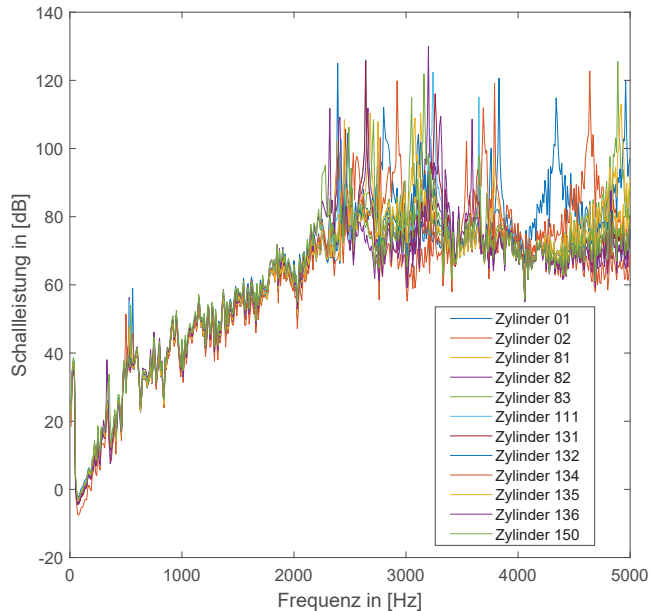
**Abbildung 5:** Einige der numerisch untersuchten Varianten des Stahlzylinders des Rotors.

Für eine globale Bewertung verschiedener Varianten werden zudem die Spektren der Schalleistungspegel herangezogen. Auf eine A-Bewertung wurde verzichtet. Außerdem werden auch die Summenpegel der Schalleistungen verglichen.



**Abbildung 6:** Oben: Schalldruckverteilung im Mittelschnitt des kugelförmigen Fluidgebietes bei zwei beispielhaften Frequenzen mit hohen Amplituden (links 2390 Hz, rechts 4640 Hz). Links unten: Visualisierung der Mittelschnitte. Rechts unten: Richtcharakteristik (Schalldruckamplitude in 0,3 m Abstand) im Mittelschnitt senkrecht zu rechts oben (siehe weißer Kreis links).

In Abbildung 7 sind die unbewerteten Schalleistungsspektren einiger Varianten dargestellt. Insgesamt wurden etwa 40 Varianten verglichen. Zur leichteren Vergleichbarkeit wurden neben den Schmalbandbetrachtungen (wie in Abbildung 7) auch Terzpegeldarstellungen genutzt.



**Abbildung 7:** Mit Hilfe der vorgestellten Simulationsmethodik berechnete Schalleistungsspektren einiger Rotorvarianten.

Nach Abschluss der Analysen unter Nutzung der ganzheitlichen Simulationsmethodik wurden drei Designvarianten festgelegt, die nun hergestellt und anschließend experimentellen Analysen unterzogen werden. Darüber hinaus wurden analog zu den Zylinderuntersuchungen weitere Variantenrechnungen zu den Seitendeckeln aus Aluminium durchgeführt. Einige Deckelvarianten sind in [4] zu sehen. Diese sind nun ebenfalls abgeschlossen und die Favoriten befinden sich in der Herstellung.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Analyse der Antriebsstränge eines elektrischen Gleitbootes vorgestellt. Den Kern bildet dabei eine ganzheitliche Simulationsmethodik, die es ermöglicht, allein auf Basis des CAD-Designs sowie der definierten Betriebsparameter ohne Notwendigkeit realer Prototypen detaillierte Analysen bezüglich der Rotordynamik, Elektrodynamik, Strukturschwingungen und Schallabstrahlung durchzuführen. Die Analysen der genannten Teildisziplinen sind dabei sowohl einzeln als auch gekoppelt durchführbar. Im Fall der Kopplung von Rotor- und Elektrodynamik ist dies bereits als vollständig rückwirkungsbehaftetes Vorgehen umgesetzt. Das Ziel der Simulationskette ist die Berücksichtigung aller wesentlichen Anregungsquellen für die abschließende akustische Bewertung. Als Resultat der Simulationen können die Ergebnisse auch hörbar gemacht werden.

Zukünftig sollen auf dieser Basis psychoakustische Bewertungen und Untersuchungen folgen. Ziel ist die Bewertung elektrischer Maschinen hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen allein auf Basis der virtuell existierenden Konstruktion. Aktuell ist die ganzheitliche Betrachtungsweise noch sehr rechenzeitintensiv. Folglich ist es das Ziel weiterführender Arbeiten, die Effizienz maßgeblich zu steigern. Parallel dazu ist die Berücksichtigung weiterer Effekte geplant, um die Simulationsergebnisse noch realistischer zu machen. Ein Beispiel dafür wäre die Implementierung des Einflusses der vibroakustischen Strukturschwingungen auf die Elektrodynamik.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes „Kompetenzzentrum eMobility (KeM)“, das mit Geldern des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und des Landes Sachsen-Anhalt gefördert wird (ZS/2018/09/94461). Darüber hinaus möchten wir Dr.-Ing. Andreas Zörnig sowie allen weiteren Projektpartnern der anderen Arbeitsgruppen für die sehr gute Zusammenarbeit sowie die vielseitige Unterstützung im Verbundprojekt danken.

## Literatur

- [1] F. Duvinneau, S. Koch, C. Daniel, E. Woschke, U. Gabbert. Vibration Analysis of an Electric Wheel Hub Motor at Stationary Operating Points. In: Cavalca K., Weber H. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics - IFToMM. IFToMM 2018. Mechanisms and Machine Science, vol 63. Springer, Cham, pp.51-64, 2019, Online ISBN: 978-3-319-99272-3, Print ISBN: 978-3-319-99271-6, DOI: 10.1007/978-3-319-99272-3\_4.
- [2] S. Koch, F. Duvinneau, E. Woschke. A coupled rotor dynamic simulation of an electric drive train to investigate the acoustic behavior. eForum Acusticum 2020, Dec 2020, Lyon, France. pp.2945-2950, ff10.48465/fa.2020.0371ff. fhal-03229461f
- [3] S. Koch, F. Duvinneau, E. Woschke. A simulation of an electric machine considering the coupling of rotor- and electrodynamic. PAMM - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, Volume 20, Issue 1, 2021, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1002/pamm.202000080>
- [4] F. Duvinneau, S. Koch, C. Daniel, E. Woschke, D. Juhre. Acoustic analysis of an electric engine complementing to a coupled rotor- and electrodynamic simulation of an electric drive train. Proceedings of the FISITA 2021 World Congress, Prague, 13–17 September 2021.
- [5] F. Duvinneau, 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.