

Die Akustik neuer Antriebskonzepte im Rahmen der Mobilitätswende

Fabian Duvigneau, Sebastian Schneider, Florian Doleschal, Tommy Luft, Hermann Rottengruber, Jesko L. Verhey

Die Antriebskonzepte werden sich im Rahmen der Mobilitätswende wandeln und vielseitiger werden. Dennoch sind viele der Methoden, die für die fossilen Verbrennungsmotoren entwickelt wurden, auf die neuen Antriebskonzepte übertragbar. Dies wird im Beitrag insbesondere bezüglich der wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren dargelegt. Es wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die die Synergie aus Simulation und Experiment nutzt und dabei insbesondere die menschliche Hörwahrnehmung miteinbezieht. Im Rahmen elektrifizierter Antriebe kommt der Tonhaltigkeit als Wahrnehmung der tonalen Komponenten im Geräusch eine besondere Bedeutung zu, welche aus diesem Grund im vorliegenden Beitrag gesondert betrachtet wird. Der wesentliche Vorteil des vorgestellten ganzheitlichen Simulationsansatzes besteht darin, dass bis auf optionale Validierungszwecke keine realen Prototypen des Motors oder einzelner Komponenten benötigt werden.

Vorwort

Die zukünftigen Herausforderungen in der Mobilität sind vor allem gekennzeichnet von der Forderung nach Klimaneutralität und Nachhaltigkeit. Gleichzeitig weisen realistische Analysen darauf hin, dass weltweit ein massiver Anstieg von persönlicher Mobilität und vor allem des Waren- und Güterverkehrs eintreten wird. Um diese komplexe Situation zukünftig weltweit meistern zu können, wird die globale Gemeinschaft vielfältige Mobilitätslösungen, jeweils angepasst an die regionalen sowie globalen Randbedingungen, in Anspruch nehmen müssen. Das bedeutet auch, dass es eine global derart dominierende Antriebstechnologie, wie es zum Beispiel der Verbrennungsmotor in den vergangenen 100 Jahren gewesen ist, im 21. Jahrhundert nicht mehr geben wird. Vielmehr müssen auf unterschiedliche Märkte und Gegebenheiten angepasste Antriebslösungen gefunden und angewendet werden. Die europäischen Märkte und größtenteils auch der chinesische Markt werden stark von elektrifizierten Systemen wie dem BEV (Battery Electric Vehicle), insbesondere im PKW-Segment, geprägt sein.

Allerdings sind für große Transportleistungen, hohe Reichweitenanforderungen und größere Fahrzeuge

Acoustics of new drive concepts in the light of sustainable mobility

Sustainable mobility will change the drive concepts and will result in a greater variability. Despite of these changes, the methods that were developed for the fossil combustion engine will still be applicable for the new drive concepts. This is shown particularly for the hydrogen combustion engine. An approach is presented that uses the synergies of simulations and experiments and specifically includes auditory perception. In the light of electric drives, the sensation associated with the perception of tones is of special importance; hence, it is discussed in a separate section. The advantage of the holistic simulation approach presented here is that, apart from optional validation purposes, there is no need of real prototypes of the engines or single components.

nach wie vor Hybridantriebe sowie zukünftig auch wasserstoffbasierte Antriebssysteme unverzichtbar. Diese sind meist auch im Hinblick auf die Life-Cycle-Emissionen und auf die infrastrukturellen Randbedingungen eine bessere und nachhaltigere Lösung als BEV mit übergroßen Batteriekapazitäten. Zu Bedenken ist hierbei, dass annähernd zwei Drittel der Verkehrsemissionen vom Lastverkehr, hier vor allem schwere Nutzfahrzeuge ab 40 t, verursacht werden. Ein solches Nutzfahrzeug benötigt, um eine in der Logistikbranche tagesübliche Kilometerleistung bewältigen zu können, nach dem aktuellen Stand der Technik eine bis zu 20 t schwere Batterie. Dies würde zu einer enormen Reduzierung der Transportmasse eines jeden einzelnen Nutzfahrzeugs führen. Entsprechend stellt es im Augenblick keine ernstzunehmende Lösung dar, auch diese Verkehrsteilnehmer mit batterieelektrischen Antrieben auszustatten. Eine mögliche Lösung für schwere Nutzfahrzeuge könnte der wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotor sein, insbesondere wenn dieser mit grünem Wasserstoff (CO_2 -frei produzierter Wasserstoff) betrieben wird. Alternativ wäre hierbei auch der Einsatz von Brennstoffzellen im Nutzfahrzeug denkbar. Vor diesem Hintergrund erscheint es fragwürdig, dass von Seiten der

Tab. 1: Möglicher zukünftiger Antriebsmix

Antriebsort	Fahrzeugtyp	Gewicht	Reichweite
Elektromotor mit Batterie (BEV)	PKW, LKW	leicht	Kurzstrecke (urban)
Elektromotor mit Brennstoffzelle	PKW, LKW	schwer	Langstrecke
Verbrennungsmotor mit grünem Wasserstoff	LKW	schwer	Langstrecke
Hybridfahrzeuge (Verbrennungsmotor und E-Motor)	PKW, LKW	schwer	Langstrecke
Verbrennungsmotor mit flüssigen synthetischen Kraftstoffen regenerativen Ursprungs (ausgenommen ist hier grüner Wasserstoff)	PKW, LKW	leicht	Langstrecke

deutschen und europäischen Gesetzgebung die Technologieoffenheit bezüglich des Fahrzeugantriebs zugunsten der batterieelektrischen Systeme behindert, oftmals ignoriert oder sogar ausgeschlossen wird. In den weiteren Weltmärkten ist davon auszugehen, dass sich bis Mitte der 2030er Jahre im Pkw-Segment ein Mix aus alternativen Antriebskonzepten (hybride und wasserstoffbasierte Antriebe) und etwa 30–40 % BEV einstellen wird. Da in vielen Regionen der Erde die Versorgung mit regenerativ bereitgestellter elektrischer Energie bis dahin nicht sichergestellt werden kann, ist in diesen Regionen damit zu rechnen, dass konventionelle Antriebe weiterhin den Hauptanteil der Transportleistung erbringen werden. In diesen Regionen könnte der Einsatz von synthetisch hergestellten Kraftstoffen regenerativen Ursprungs im Verbrennungsmotor zielführend sein. Durch die Defossilisierung des Verbrennungsmotors ließen sich die CO₂-Emissionen kurz- und mittelfristig signifikant reduzieren, auch durch die Nutzung innerhalb der bestehenden Fahrzeugflotte. Aus den genannten Gründen ist es wahrscheinlich, dass im Verkehr zukünftig eine Mischung verschiedener Antriebe vorliegen wird. Ein aus heutiger Sicht sinnvoller Antriebsmix könnte, wie in Tabelle 1 skizziert, aussehen.

Die neuen Antriebsformen beeinflussen zweifelsohne auch die Akustik der Fahrzeuge, welcher in der Automobilentwicklung eine zunehmende Bedeutung zukommt. Sonstige Anforderungen der Kunden z. B. an die funktionalen und quantitativen Merkmale des Produkts werden immer schneller und präziser erfüllt. Deshalb treten zunehmend subjektive Eigenschaften wie der akustische Eindruck eines Fahrzeugs in den Vordergrund, die nicht direkt messbar sind, aber mit der Erwartungshaltung der Kunden an die Produktqualität übereinstimmen müssen. Durch das wahrgenommene Klangbild kann ein positiver Qualitätseindruck beim Kunden hervorgerufen und somit dessen Kaufentscheidung beeinflusst werden. Daher muss bei der Automobilentwicklung auch die Akustik von Fahrzeugen und deren Einzelkompo-

nenten im sogenannten NVH-Design berücksichtigt werden (NVH – Noise Vibration Harshness). Zusätzlicher Druck auf die Automobilindustrie wird durch die gesetzlichen Grenzwerte für Lärmemissionen generiert, die in den kommenden Jahren weiter herabgesetzt werden.

Bei batterieelektrischen und brennstoffzellen-elektrischen Fahrzeugen einschließlich ihrer Peripherie besteht akustischer Forschungsbedarf, da sich das akustische Verhalten zum Teil deutlich von dem bisherigen Standard der Verbrennungsmotoren unterscheidet. Fahrzeuge mit elektrischen Antriebsaggregaten können Probleme bezüglich der Klangqualität aufweisen, die sich in Dröhnen, Zischen, wahrnehmbare tonale Anteile aber auch generell in einer deutlich verstärkten Wahrnehmung von Subsystemen (notwendige Peripherie) äußern kann. Ein detailliertes Verständnis der Anregungsmechanismen der Komponenten sowie der damit verbundenen Hörwahrnehmung ist bisher nicht vorhanden. Die Herausforderungen für die akustische Auslegung müssen herausgearbeitet werden, um anschließend generelle Lösungen für das NVH-Design zu entwickeln. NVH-relevante und zu optimierende Einzelkomponenten von Kfz-Brennstoffzellen sind zum Beispiel der elektrische Kompressor beim Luftmanagement, die Umwälzpumpe des Wasserstoffmanagements, die Kühlung des Batteriemanagementsystems (Pumpen und Lüfter) sowie aktive Luftbefeuchter. Grundsätzlich müssen auftretende Strömungsgeräusche erfasst und notfalls reduziert werden. Der Elektromotor selbst ist vor allem durch das Auftreten tonaler Anteile auffällig. Auch die Aufhängungspunkte der Brennstoffzelle und des Elektromotors haben eine akustische Relevanz; sie sollten optimal ausgelegt sein, um Körperschalltransferpfade in die Karosserie bestmöglich zu unterdrücken.

Generell hat jede Antriebstechnik ihre ganz eigenen akustischen Herausforderungen. So unterscheidet sich z. B. die typische Geräuschcharakteristik eines Dieselmotors, welche im Allgemeinen als Dieselnageln bekannt ist, grundlegend von der eines Ottomo-

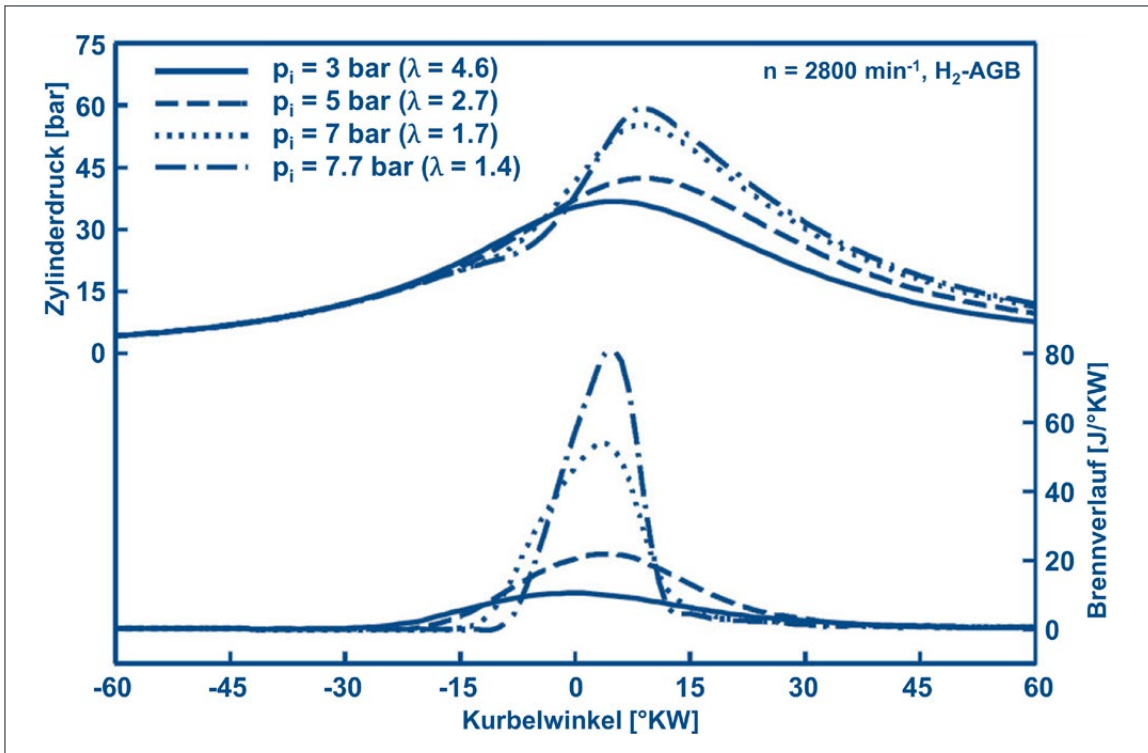


Abb. 1: Einfluss des Kraftstoff-Luft-Gemisches eines Wasserstoffverbrennungsmotors auf den Zylinderdruck- und Brennverlauf [1]

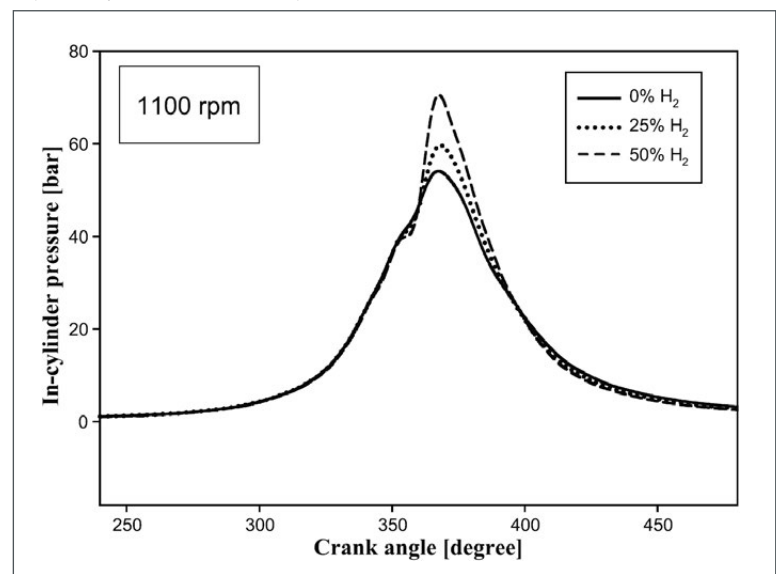
tors. Das eigentliche Verbrennungsgeräusch sowohl bei Saug-Ottomotoren als auch bei direkteinspritzenden Ottomotoren ist relativ leise, wodurch bei dieser Antriebsart die Nebenaggregate vermehrt akustisch auffallen. Beim Dieselmotor ist das impulsartige Verbrennungsgeräusch aufgrund des hohen Zylinderdruckgradienten kurz nach der Zündung des Gemisches im Brennraum gegenüber den Nebengeräuschen dominant. Aktuelle Forschungen zum Wasserstoffverbrennungsmotor deuten darauf hin, dass sich die Erkenntnisse von den klassischen Verbrennungsmotoren auch auf zukünftige Antriebs-techniken übertragen lassen. So weist nach EIFLER [1] vor allem der Motorbetrieb mit niedrigerem Verbrennungsluftverhältnis λ einen höheren Zylinderdruckanstieg auf, was sich auch im Brennverlauf widerspiegelt, siehe Abbildung 1.

Ähnliche Erkenntnisse hinsichtlich des Zylinderdrucks lieferten die Untersuchungen von KARAGÖZ ET AL. [2], bei welchen einem Dieselmotor zusätzlich Wasserstoff als Kraftstoff zugeführt wurde, siehe Abbildung 2. Hierbei führt eine prozentual zunehmende Beimischung von Wasserstoff, aufgrund des steigenden Zündverzugs, sowohl zu einem höheren Zylinderdruckmaximum als auch zu einem schnelleren Anstieg des Drucks.

Daraus lässt sich ableiten, dass auch der Wasserstoffverbrennungsmotor einen nagelnden Geräuschcharakter besitzt, welcher vermutlich wie beim Dieselmotor als eher unangenehm wahrgenommen wird.

In den, u.a. an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg durchgeführten, Projekten „Geräuschge-
regelter Dieselmotor“ [3] und „Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung“ [4] wurde untersucht, wie die sogenannte Dieselnote (als Maß für das nagelnde Geräusch des Dieselmotors) mit Hilfe akustischer Sensoren bestimmt sowie in die aktive Motorregelungsstrategie integriert werden kann. Aufgrund der akustischen Ähnlichkeit des Dieselmotors zum Wasserstoffverbrennungsmotor ist anzunehmen, dass

Abb. 2: Einfluss von Wasserstoff als Kraftstoffzusatz zur Dieselerverbrennung auf den Zylinderdruckverlauf [2]



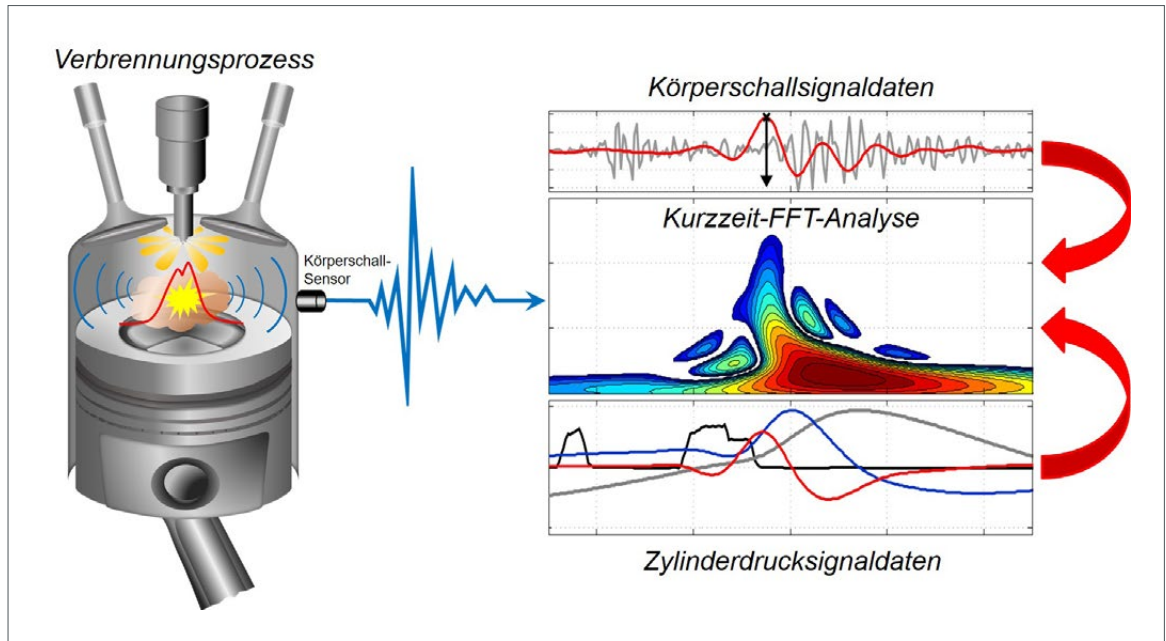


Abb. 3: Schema zur Methodik der Zylinderdruck- und Geräuschregelung auf Basis von Körperschallsignalen [5]

der entwickelte Ansatz auf diese Antriebsart übertragbar ist.

Darüber hinaus sind wir an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg überzeugt, dass es für die akustische Bewertung von Komponenten, Aggregaten und Fahrzeugen sinnvoll ist, einerseits die Synergie aus Simulation und Experiment zu nutzen und andererseits nicht ausschließlich physikalische Ergebnisgrößen zu analysieren, sondern stattdessen idealerweise immer die menschliche Hörwahrnehmung miteinzubeziehen. Letztendlich ist es schließlich die auditive Wahrnehmung der Nutzer und Passanten, die deren Bewertungsurteil über das Produkt maßgeblich dominiert (zumindest hinsichtlich der Akustik).

Was wir vom klassischen Verbrenner lernen können

Heutige Dieselmotoren für Pkw zeichnen sich infolge optimierter Abgasnachbehandlungssysteme durch relativ niedrige Abgasemissionen und einen geringen Kraftstoffverbrauch aus. Im unteren Last- und Drehzahlbereich entstehen insbesondere in der Start- und Warmlaufphase des Motors jedoch durch den erhöhten Verbrennungsverzug die besagten dominierenden Verbrennungsgeräusche. Zur Reduzierung dieser Geräusche werden derzeit mehrfache Voreinspritzungen eingesetzt, jedoch besteht bei dieser Maßnahme ein direkter Konflikt zu den Abgasemissionen, welchen im Rahmen der Bestrebungen zur CO_2 -Reduktion eine besondere Bedeutung zukommt.

Im Forschungsprojekt „Geräuscheregelter Dieselmotor“ [3] wurde daher ein anderer Ansatz gewählt, welcher das Geräuschverhalten durch die Veränderung der Haupteinspritzung auf vorgegebene Werte

der Dieselnote einregelt. Die weiterführende Idee des Forschungsprojektes „Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung“ [4] war es, Körperschallsignale zu nutzen, um einerseits die Emissionsreduzierung einer zylinderdruckbasierten Motorregelung zu erzielen und gleichzeitig die Verbrennungsgeräusche zu bewerten (ohne die Nutzung kostspieliger Zylinderdrucksensoren), siehe Abbildung 3. Dabei wurde zunächst eine geeignete Position für die Aufnahme des Körperschalls am Motorblock ermittelt, um anschließend die Daten mittels Kurzzeit-FFT-Analyse für die Extraktion der benötigten Merkmale zur Angleichung des realen Zylinderdrucks zu verwenden. Für ein zylinderselektives, geräuscheregeltes Motormanagement wurde eine arbeitsspielsynchrone Regelung des indizierten Mitteldrucks sowie der Verbrennungsschwerpunktlage entwickelt, siehe Abbildung 4. Hierzu wurden die Regelgrößen (indizierter Mitteldruck, Verbrennungsschwerpunktlage, Dieselnote) über die Körperschallsignale und Steuergerätedaten mit Hilfe von Regressionsmodellen erfolgreich geschätzt; anschließend kommen dem Steuergerät die aktualisierten Einspritzparameter als neue Istwerte zu. Durch Sprungantworten der Regelkreise wurde nachgewiesen, dass die Modelle eine ausreichende Güte aufweisen, um den physikalisch tatsächlichen Wert darzustellen und sich somit für die Regelung eignen. Dies lieferte die Grundlage, um die Verbrennung bei einer Variation der Voreinspritzungsparameter in definierten Arbeitspunkten nachzuführen. Im Anschluss wurde mit Hilfe der Regressionsmodelle zusätzlich die Dieselnote aus den Körperschallsignalen berechnet. Ziel war es, die Dieselnote durch die Voreinspritzungsparameter zu

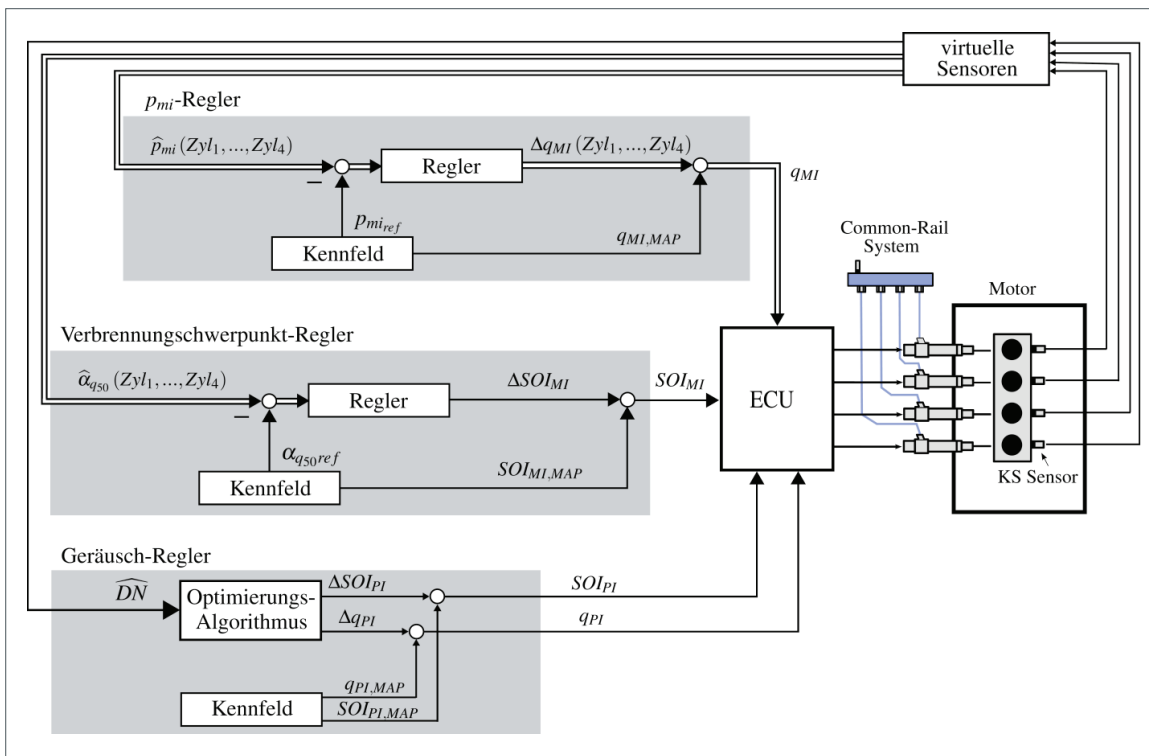


Abb. 4: Prinzipdarstellung der Regelstruktur zur in Abbildung 3 dargestellten Methodik [4]

variieren und letztendlich zu optimieren.

Durch Prinzipuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich insbesondere die Voreinspritzmenge sensitiv auf die Dieselnote auswirkt. Ferner lagen die maximalen Dieselnotenwerte in einem relativ engen Voreinspritzwinkelbereich, welcher abhängig vom Betriebspunkt des Motors ist. Zur Erreichung des Ziels, die Dieselnote zu optimieren, wurde ein heuristischer Algorithmus angewendet, welcher auf einem Gradientenverfahren beruht. Ferner wurden die Emissionswerte der Stickoxide und Kohlenwasserstoffe sowie der spezifische Kraftstoffverbrauch in dem durch den Optimierungsalgorithmus gefundenen Arbeitspunkt reduziert. Grundsätzlich zeigten die umgesetzten Regelkonzepte das Potential der Reduzierung der akustischen Lästigkeit der Verbrennungsgeräusche bei gleichzeitiger Verbesserung bzw. Stagnierung der Abgasemissionswerte auf [4]. Wie oben bereits erwähnt, ist anzunehmen, dass dieser Ansatz auch für mit Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotoren angewendet werden kann. Darüber hinaus ist dies ein

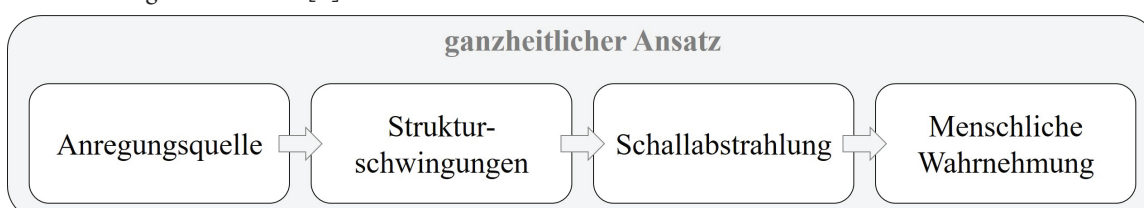
gutes Beispiel unserer Philosophie, die menschliche Wahrnehmung, wenn möglich, in unsere experimentellen und numerischen Analysen einzubeziehen. Im nachfolgenden Abschnitt wird demonstriert, wie eine solche Berücksichtigung im Rahmen einer ganzheitlichen Simulationsmethodik erfolgen kann.

Ganzheitlicher Simulationsansatz

Um den akustischen Herausforderungen, die neue Antriebskonzepte mit sich bringen, zu begegnen, sollte ein ganzheitlicher Simulationsansatz verfolgt werden. Hier wird zunächst kurz die allgemeine Strategie der ganzheitlichen Methodik erläutert, bevor in den nachfolgenden Abschnitten auf die Anwendungsmöglichkeiten dieser Vorgehensweise auf elektrische und verbrennungsmotorische Antriebe eingegangen wird.

Grundsätzlich besteht der hier vorgestellte Ansatz, unabhängig vom konkreten Anwendungsfall, immer aus vier verschiedenen Bausteinen (siehe Abb. 5). Dabei sollen alle vier Bausteine mit Hilfe virtueller

Abb. 5: Ganzheitliche Simulationsmethodik zur Bewertung von automobilen Antrieben hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen [6]



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. Folglich sind die vorgestellten Ansätze auch für computergestützte Optimierungen geeignet. Zuerst erfolgt 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.

Sollten bereits reale Prototypen verfügbar sein, können natürlich Teile der Simulationskette durch experimentelle Untersuchungen ersetzt werden. Solche hybriden Ansätze, wie in [7], bieten sich insbesondere dort an, wo die Berechnungszeiten der Simulationsmodelle aufgrund der Größe und Komplexität des Gesamtsystems nicht mehr handhabbar sind oder die numerische Abbildung der Realität an sich extrem herausfordernd ist. Ein Beispiel für den letzt-

genannten Aspekt ist die Berechnung akustischer Dämm- und Dämpfungsmaterialien. Wie eingangs erwähnt, möchten wir die Synergie aus Experiment und Simulation ausnutzen und jeweils die Methoden einsetzen, die am vorteilhaftesten sind. Darüber hinaus sind experimentelle Validierungsdaten zum Nachweis der Prognosegenauigkeit der Simulationsmodelle stets das angestrebte Ideal, sofern diese zur Verfügung stehen oder mit vertretbarem Aufwand gewonnen werden können.

Simulationsbasierte Bewertung von Verbrennungsmotoren

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie der ganzheitliche Simulationsansatz gewinnbringend eingesetzt werden kann, um das akustische Verhalten einzelner Bauteile oder ganzer Aggregate für diese Antriebsart zu bewerten. Die Zielstellung ist dabei, nicht nur die klassischen akustischen Parameter wie Schalldruck und Schalleistung auszuwerten, sondern die Wirkung auf den Menschen zu berücksichtigen. Die Methodik ermöglicht daher auch eine Bewertung hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen, wie beispielsweise der empfundenen Geräuschqualität. Die nachfolgend dargestellten Entwicklungen beziehen sich auf die Akustik von Verbrennungsmotoren, lassen



Norsonic

Schallpegelmesser Nor145

Schallimmissionsschutz

- Internes GPS, WLAN und 4G-Modem
- Steuerung über das Webportal NorCloud (Monitoring)
- Anschluss des NoiseCompass Nor1297 (Richtungserkennung)

Bauakustik / Raumakustik

- Interne Berechnung von $R'w$, $L'n,w$, etc. nach ISO 16283
- Interne Mittelung der Nachhallzeiten nach ISO 3382

Tippkemper norsonic

www.norsonic.de
tippkemper@norsonic.de
Tel. 02529 9301-0

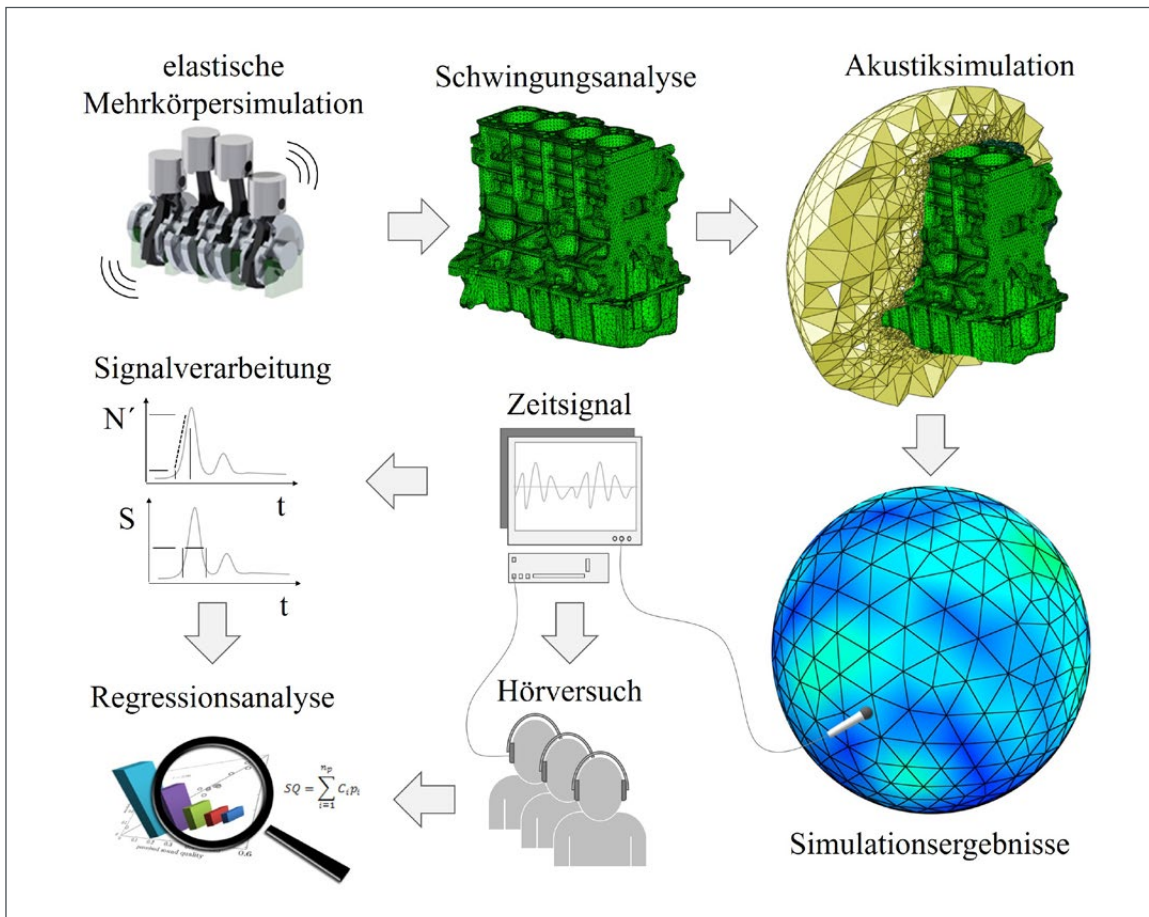


Abb. 6: Ganzheitliche Methodik zur Bewertung von Geräuschen hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen

sich aber auch für Elektromotoren anwenden.

Das Besondere des erstmals in [8] präsentierten Ansatzes besteht darin, Prognosemodelle für die auditive Wahrnehmung des Menschen unter Nutzung von numerischen Simulationsmodellen zu generieren. Üblicherweise werden aufgezeichnete Geräusche realer Fahrzeuge, Komponenten oder Prototypen genutzt, um Probandenversuche durchzuführen und auf Basis von deren Ergebnissen psychoakustische Vorhersagemodelle zu entwickeln. Die in [8] 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 Iterationsschleifen, um der akustischen Zielsetzung schrittweise näher zu kommen.

In Abbildung 6 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 [9] 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 Kollenfeingeometrie (Ovalität, Balligkeit), Desachsierungen und Schränkungen zu berechnen.

Zusätzlich können die tribologischen Kenngrößen analysiert werden, die durchaus Zielkonflikte aufweisen können. Zusammen mit dem aus dem Verbrennungsprozess resultierenden Zylinderdruck 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 realer Prototypen. 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 zwingend erforderlich, um eine realistische Schwingungserregung des Motors berücksichtigen zu können.

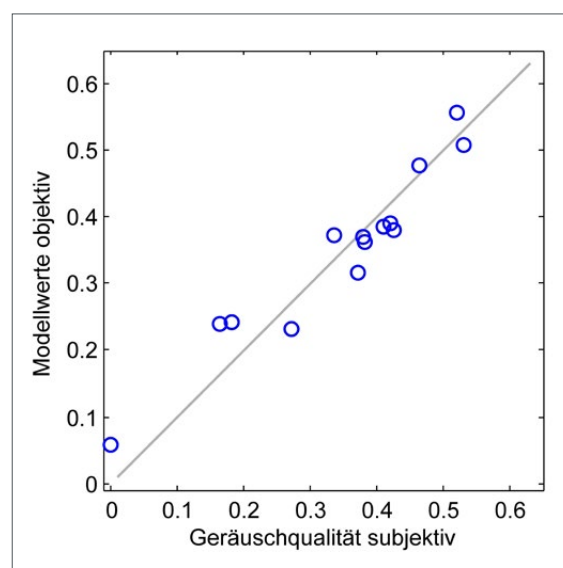
Über den Zylindergasdruckverlauf als Eingangsgröße ist es auch möglich, Modifikationen im Verbrennungsprozess selbst, wie beispielsweise zusätzliche Einspritzungen oder geänderte Zündzeitpunkte, hinsichtlich der akustischen Auswirkungen zu analysieren. Modifikationen am Ansaug- und Abgastrakt sowie auch 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 Simulationstheorie wird ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell des Zylinderkurbelgehäuses (ZKG) einschließlich der wichtigsten Anbauteile benötigt (siehe Abbildung 6). Die Anregung des ZKGs erfolgt mit den im ersten Schritt ermittelten zeitlich veränderlichen Kräften. Das Ergebnis dieser 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 Finite-Elemente-Modell des Luftvolumens erzeugt, das den Motor umschließt. Selbstverständlich kann in diesem Schritt der Simulationsskette anstelle der Finite-Elemente-Methode (FEM) jede gängige Simulationsmethode zur Berechnung der Schallabstrahlung, so wie bspw. auch die Randelementemethode (BEM), eingesetzt werden. Die im vorherigen 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 [8]. Die so gewonnenen Zeitsignale werden einem Signalverarbeitungsprozess unterzogen und bilden die Grundlage für die Berechnung der psychoakustischen Empfindungsgrößen, 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 verwendet werden. Im Allgemeinen werden aber Parameter mit einer interpretierbaren Bedeutung bevorzugt. Nähere Details zur psychoakustischen Modellbildung sind in [6; 8] zu finden.

Der vorgestellte Ansatz generiert nur dann einen Mehrwert, 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 [8] gezeigt, dass die psychoakustischen Modelle in der Lage sind, auch sogenannte Testdaten zu bewerten, die nicht Teil des Trainingsdatensatzes waren. In Abbildung 7 ist für 14 numerisch erzeugte Motorgeräusche der Vergleich zwischen ei-

Abb. 7: Korrelation der ermittelten Geräuschqualität des psychoakustischen Vorhersagemodells und des Versuchs für 14 unabhängige Motorgeräusche [10]



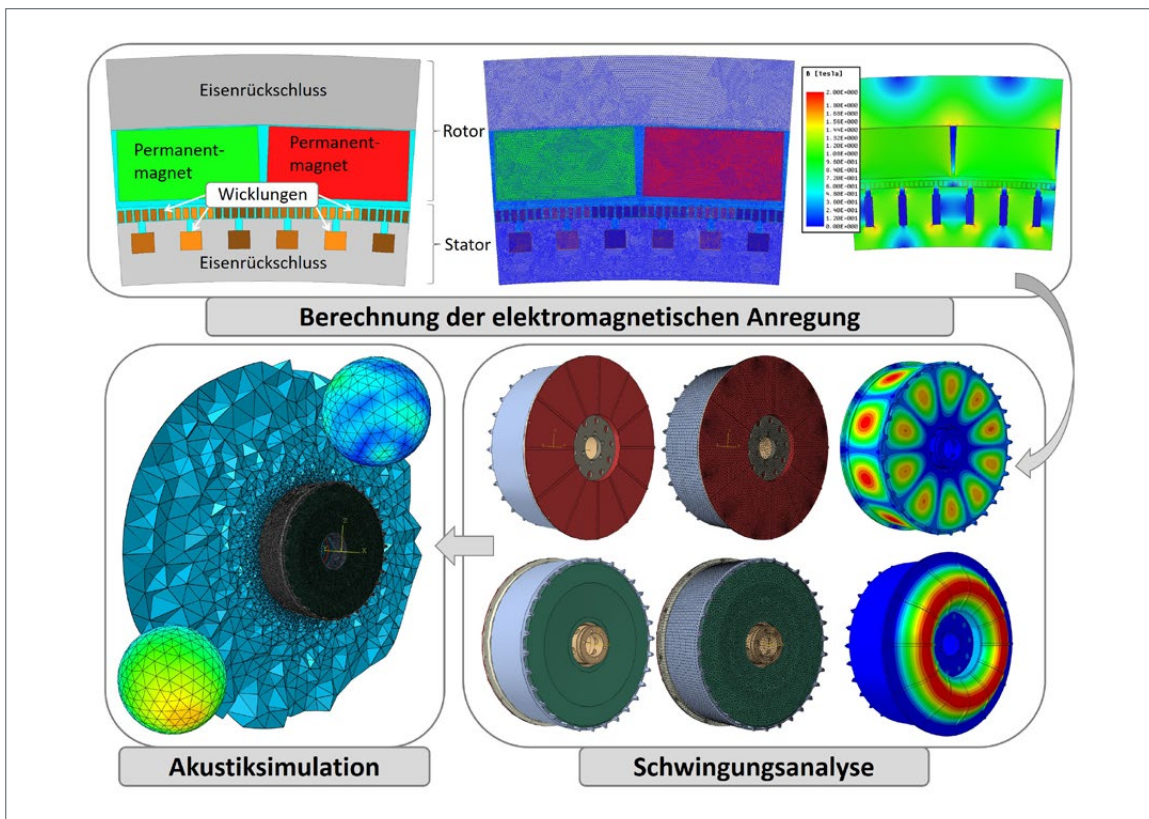


Abb. 8: Ganzheitliche Simulationsmethodik am Beispiel eines Elektromotors

nem zweiten Hörversuch und den Berechnungsergebnissen des psychoakustischen Modells dargestellt. Das entwickelte psychoakustische Modell approximiert auch für die Testdaten die empfundene Geräuschqualität sehr gut, was durch den Korrelationskoeffizienten der Trainings- und Testdaten von 0,96 bestätigt wird. Die Verwendung eines Prognosemodells ermöglicht eine Reduktion zeit- und kostenintensiver Hörversuche, insbesondere bei Variantenvergleichen und Optimierungsprozessen. Außerdem ist es möglich, Vorhersagemodelle durch eine entsprechende Auswahl der Probanden für verschiedene Zielgruppen zu erstellen. In [11] 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.

Simulationsbasierte Bewertung von Elektromotoren

Ein weiterer Anwendungsfall des beschriebenen ganzheitlichen Ansatzes sind elektrische Maschinen im Allgemeinen und Elektromotoren im Speziellen. Abbildung 8 zeigt einen ganzheitlichen Simulationsansatz für die Berechnung der Schallabstrahlung einer elektrischen Maschine am Beispiel eines Radnabenmotors.

Der ganzheitliche Ansatz (siehe Abbildung 8) beginnt gemäß Abbildung 5 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. 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. Darüber hinaus wird dadurch ein zeitlich unveränderlicher Luftspalt vorausgesetzt, der in der Realität nicht auftritt.

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. Analog zum vorheri-

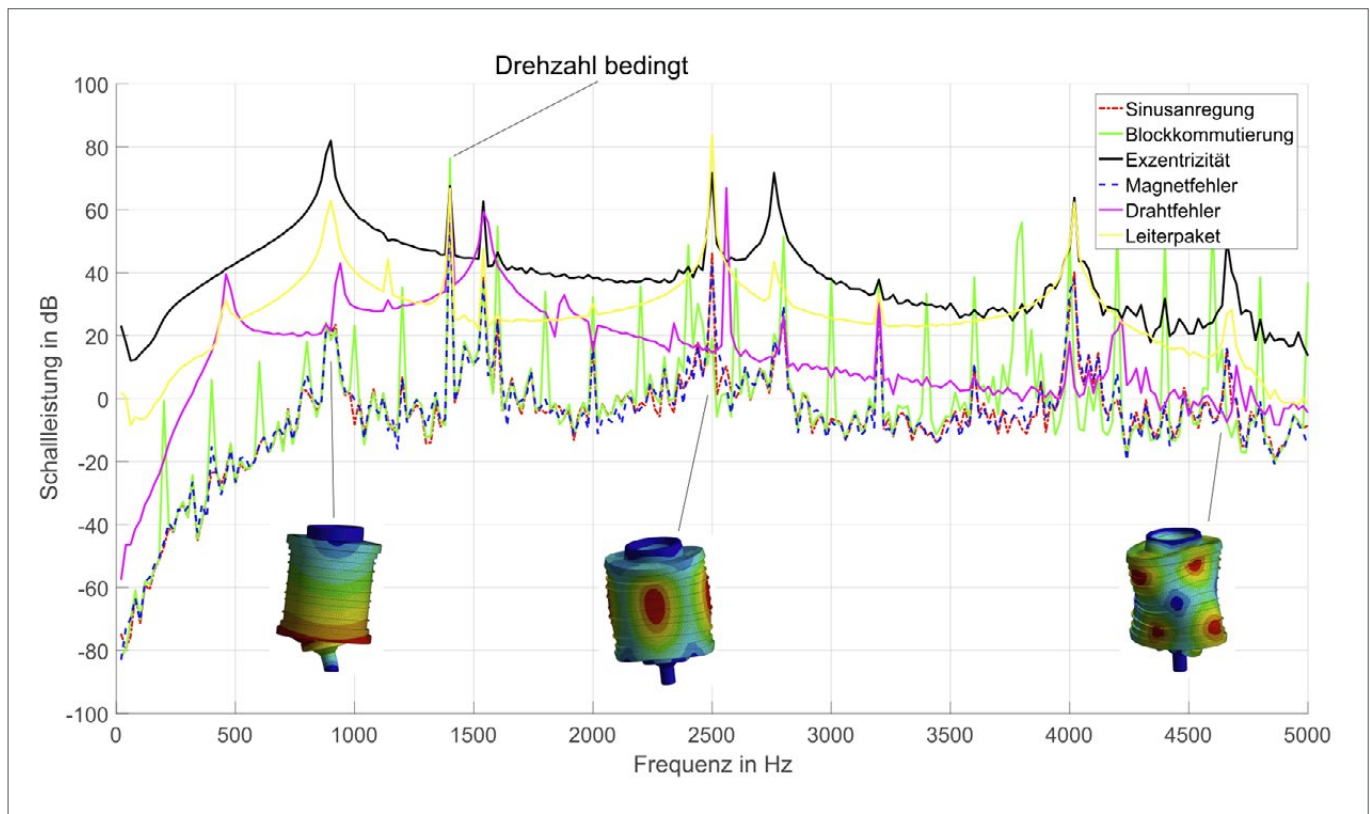


Abb. 9: Simulationsstudie zur Auswirkung virtuell eingebrachter Modifikationen im Magnetkreis

gen Beispiel kann auch hier wieder problemlos eine psychoakustische Bewertung angeschlossen werden. Der soeben beschriebene ganzheitliche Ansatz für die akustische Bewertung von elektrischen Maschinen wurde kürzlich durch eine rückwirkungsbehaftete Kopplung zur Rotordynamik weiterentwickelt [12]. Dies ist insbesondere bezüglich möglicher Änderungen des Luftspaltes aufgrund der Rotordynamik von hoher Bedeutung. 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. Aus dem zeitlich veränderten Luftspalt im Rahmen der gekoppelten Betrachtung ergibt sich, dass das in Abbildung 8 gezeigte Minimalmodell nicht mehr angewendet werden kann, da die Periodizitätsbedingungen nicht mehr erfüllt sind. Zur Abbildung der Rotordynamik wird eine Mehrkörpersimulation eingesetzt, welche folglich mit der FE-Berechnung des Magnetkreises gekoppelt werden muss. Im Rahmen der Mehrkörpersimulation können elastische Körper berücksichtigt werden, was sich bspw. für die Welle des Antriebsstranges anbietet. Alle Lager des Antriebsstranges sind als Federelemente modelliert, deren nichtlineare Federkennlinien vorab über FE-Kontaktsimulationen bestimmt werden. Zur Validierung der Simulationswerkzeuge wurden verschiedene Prüfstandsmessungen durch-

geführt (sowohl bezüglich der elektrischen Größen und auftretenden Drehmomente als auch der resultierenden Schwingungen sowie der Schallabstrahlung). Nähere Informationen zu den Validierungsexperimenten sind in [12] zu finden.

Der validierte ganzheitliche Ansatz wurde für die Optimierung des Antriebsstranges eines elektrischen Gleitbootes eingesetzt [13]. Abbildung 9 demonstriert das Potential numerischer Simulationsmodelle ohne die Notwendigkeit realer Prototypen. Darin sind die resultierenden Schallleistungsspektren für diverse Modifikationen des Magnetkreises gegenübergestellt. Außerdem sind einige exemplarische Schwingformen des Motors dargestellt. Die Modifikationen reichen von virtuellen Montagefehlern über Exzentrizitäten bis hin zu Regelungsstrategien. Diese beispielhafte Studie zeigt, dass mit Hilfe des Ansatzes Zielkonflikte (bspw. Leistung vs. Lärmemission) analysiert und behandelt werden können. Darüber hinaus können Varianten früh im Produktentwicklungsprozess bewertet und wichtige Designentscheidungen getroffen werden. Aus akustischer Sicht sollte die Bewertung idealerweise unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung erfolgen. Im Kontext elektrischer Antriebsstränge spielt die Wahrnehmung tonaler Komponenten dabei eine entscheidende Rolle. Daher wird im nachfolgenden Abschnitt im Detail auf diese spezielle Empfindungsgröße eingegangen.

Tonale Komponenten: Die besondere Herausforderung von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antrieben

Die im letzten Abschnitt vorgestellten Simulationsergebnisse (siehe Abb. 9) zeigen beispielhaft, dass elektrische Antriebe deutliche tonale Komponenten abstrahlen können. Tonale Anteile in Umweltgeräuschen werden häufig als störend wahrgenommen, ein Umstand, der auch in einer Reihe von Normen zur Lärmbeurteilung berücksichtigt wird [14–17]. So wird z. B. in der DIN 45681 bestimmt, welche Intensität eine tonale Komponente relativ zu der Intensität des sie umgebenden Rauschens (also das Signal-Rausch-Verhältnis) hat. Unter Berücksichtigung der Hörschwelle, das heißt der minimalen Intensität des Tons, ab dem dieser gerade im Rauschen hörbar ist, wird dann dem gemessenen Schalldruckpegel ein sogenannter Tonzuschlag hinzuaddiert, der die höhere Störwirkung von Geräuschen mit hörbaren tonalen Komponenten berücksichtigt.

Auffällige tonale Komponenten haben auch in Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben eine Bedeutung. Hier sei nur exemplarisch das Surren des Fensterhebers oder des Elektromotors, der die Außenspiegel einklappst, genannt. Ein weiteres Beispiel ist das Pfeifen des Turboladers. Auch Reifen können tonale Geräusche abstrahlen, z. B. durch ein starkes geländegängiges Profil (etwas, das auch von Mountainbikereifen bekannt ist) oder durch Reifentorusresonanzen.

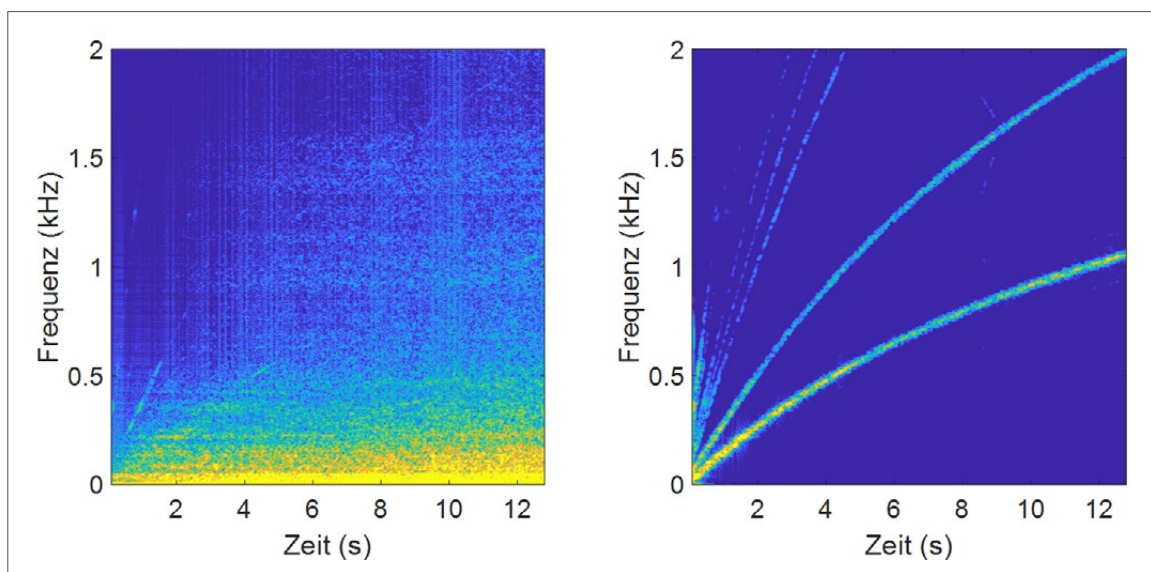
Bei Fahrzeugen mit elektrifizierten Antrieben treten tonale Anteile noch stärker in den Vordergrund, zum einen, da der Elektromotor und das Getriebe selbst tonale Geräusche abstrahlen, zum anderen da der

Antrieb deutlich leiser ist als ein klassischer Verbrennungsmotor. Ein Beispiel für ein Fahrzeuggeräusch, bei dem viele tonale Komponenten auftreten, ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Abbildung zeigt im linken Teilbild das Spektrogramm eines Innenraumgeräusches eines Fahrzeugs mit einem elektrischen Antrieb beim Hochlauf. Das rechte Teilbild zeigt die mit Hilfe einer Software extrahierten tonalen Komponenten. Diese Software wurde im Rahmen eines FVV-Projektes zur Wahrnehmung von Fahrzeuginnerengeräuschen mit (teil)elektrifizierten Antrieben entwickelt, dass die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg zusammen mit dem Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme der RWTH Aachen erarbeitet hat [18].

Gerade bei dynamischen Fahrsituationen wie dem in Abbildung 10 dargestellten Hochlauf sind die tonalen Geräusche im Fahrzeuginnenen beim Fahrer präsent. Solche dynamischen Geräusche liegen jedoch außerhalb des Anwendungsbereichs der Normen wie der DIN 45681, die ausschließlich für stationäre oder sich nur sehr langsam ändernde Schalle anwendbar ist. Eine direkte Abschätzung der Wahrnehmung der tonalen Anteile und die dadurch bedingte geringere Angenehmheit der Geräusche ist somit auf Basis der Normen nicht möglich.

Zunächst einmal muss für diese dynamischen Geräusche geklärt werden, ob die tonalen Anteile überhaupt hörbar sind. Das Spektrogramm des realen Geräusches in Abbildung 10 (linkes Teilbild) deutet schon an, dass nicht alle der im rechten Teilbild gezeigten extrahierten tonalen Komponenten gleich gut hörbar sein werden und einige eventuell auch nicht hörbar sind.

Abb. 10: Spektrogramm eines Innengeräusches in einem Fahrzeug mit elektrifiziertem Antrieb beim Hochlauf. Das linke Teilbild zeigt das Spektrogramm des Originalgeräusches, das rechte das der extrahierten tonalen Komponenten von Motor und Getriebe.



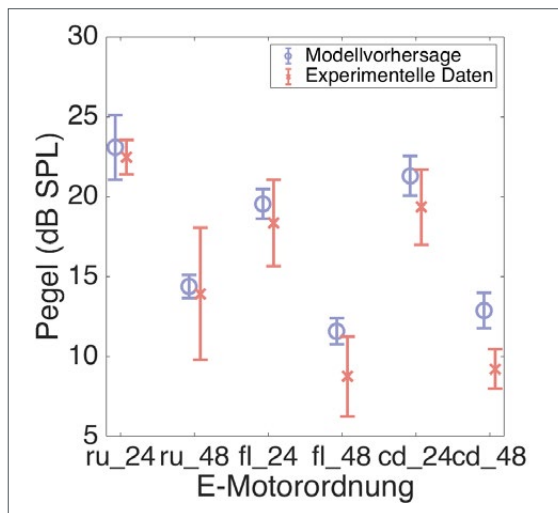


Abb. 11: Schwellen für verschiedene synthetisch erzeugte Fahrzeuginnengeräusche (ru: run-up, fl: full-load run-up, cd: coast-down). Die Zahlen (24 oder 48) geben die Motorordnung an. Die Messdaten mit Standardabweichung sind in rosa, die Modellvorhersagen in violett dargestellt. Die Messdaten sind [19] entnommen.

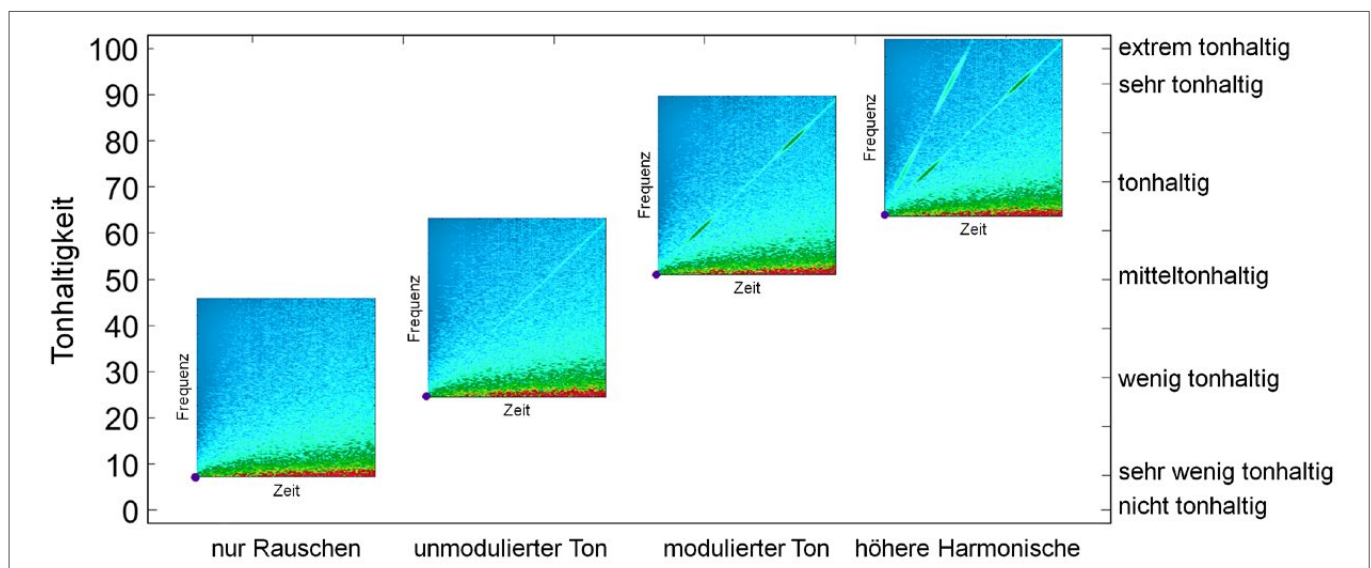
Hier bietet es sich an, nicht den direkten Weg über den oben beschriebenen ganzheitlichen Ansatz zu gehen, sondern stattdessen mit prototypischen synthetischen Signalen zu arbeiten, die wesentliche Aspekte der realen Signale enthalten. Mit dem Ziel einen ersten Zugang zur Hörbarkeit von tonalen Anteilen in dynamischen Fahrsituationen zu erhalten, können wesentliche Charakteristika der Signale in synthetischen Geräuschen abgebildet werden, um diese anschließend mit Hilfe von Hörversuchen zu untersuchen.

Abbildung 11 zeigt die mittleren Schwellen für das simulierte Fahrzeuginnengeräusch für drei typische Fahrsituationen: Teillasthochlauf (run-up), Voll-

lasthochlauf (full-load run-up, fl) und Schubbetrieb (coast-down, cd). Die Zahl steht dabei für die Motorordnung. Ändert sich zum Beispiel die Frequenz der 24sten Motorordnung bei einem Teillasthochlauf von 0 bis 1.000 Hz, ist die Endfrequenz für die 48ste Motorordnung dementsprechend 2.000 Hz. Die Messergebnisse sind [19] entnommen. Mit entsprechender Modifikation für dynamische Signale können die gemessenen Schwellen mit einem etablierten Hörmodell zur Verdeckungswirkung [20] vorhergesagt werden (Kreise in Abbildung 11).

Neben der reinen Hörbarkeit ist es auch wichtig, die überschwellige Wahrnehmung gehörgerecht zu beschreiben. Hierzu bietet es sich an, die Tonalität zu betrachten. Die Tonalität bezeichnet hier die Empfindung, wie stark der tonale Anteil im Gesamtgeräusch ist, also wie stark sich dieser vom rauschhaften Hintergrund abhebt [21]. Studien deuten darauf hin, dass diese Empfindung weitestgehend der (durch den Rauschanteil im Geräusch) gedrosselten Lautheit des tonalen Anteils entspricht [22; 23]. Abbildung 12 zeigt exemplarisch Ergebnisse einer Messung zur Tonalität eines simulierten Fahrzeuginnengeräusches für einen Hochlauf [19]. Die untere linke Ecke eines Spektrogramms zeigt hierbei die jeweilige Tonalität an, die für das Signal mit diesem Spektrogramm gemessen wurde. Bei der Messung wurden zwei Aspekte untersucht, die sich in realen Fahrzeuginnengeräuschen von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antrieben zeigen. Zum einen ist manchmal nicht nur eine Komponente hörbar. In der Messung wurden daher auch Signale verwendet, in denen neben der 24sten auch die 48ste Motorordnung dargeboten wurde. Zum anderen können Strukturresonanzen dazu führen, dass die tonalen

Abb. 12: Tonalität für simulierte Hochläufe. Die untere linke Ecke jedes Spektrogramms zeigt die gemessene Tonalität eines Geräusches, welche das jeweilige Spektrogramm hat. Die Daten sind [19] entnommen.



Komponenten im Pegel zeitlich variieren. Beide Aspekte führen zu einer Erhöhung der Tonhaltigkeit. Eine erhöhte Tonhaltigkeit führt in der Regel zu einer erhöhten Lästigkeit der Signale. Also ist davon auszugehen, dass das Hinzufügen der 48sten Motorordnung nicht nur die Tonhaltigkeit erhöht (wie in Abbildung 12 gezeigt), sondern auch die Angenehmheit reduziert. Allerdings ist das nicht zwangsläufig immer der Fall. In [24] wurde bspw. gezeigt, dass das Hinzufügen von Subharmonischen wie erwartet zu einer Erhöhung der Tonhaltigkeit, jedoch nicht zur einer Reduktion der Angenehmheit führt, sondern im Gegenteil, diese erhöht (Daten dazu sind hier nicht gezeigt). Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass noch Forschungsbedarf besteht, um die Wahrnehmung der tonalen Komponenten im Rahmen von Fahrzeuggeräuschen bezüglich ihrer Tonhaltigkeit und Lästigkeit genauer zu charakterisieren.

Zusammenfassung

Es ist unbestritten, dass die Antriebskonzepte sich wandeln und vielseitiger werden. Dennoch sind wir überzeugt, dass viele der Methoden, die für die klassischen Verbrennungsmotoren entwickelt wurden, auf die neuen Antriebskonzepte übertragbar sind. Dies wurde insbesondere bezüglich der wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren dargelegt. Darüber hinaus sind wir der Ansicht, dass es sinnvoll ist, sowohl die Synergie aus Simulation und Experiment zu nutzen als auch die menschliche Hörwahrnehmung miteinzubeziehen, welche letztlich das Bewertungsurteil hinsichtlich der Akustik eines Produktes maßgeblich dominiert. Im Rahmen elektrifizierter Antriebe kommt der Tonhaltigkeit eine besondere Bedeutung zu. Bestehende Normen sind dabei gerade für die akustisch besonders auffälligen dynamischen Fahrsituationen nicht direkt anwendbar.

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Ansatz präsentiert, der die simulationsbasierte Bewertung von automobilen Antrieben hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen ermöglicht und sowohl für elektrische als auch verbrennungsmotorische Antriebe anwendbar ist. Der wesentliche Vorteil 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. In manchen Fällen müssen auch zunächst generelle Aspekte der Wahrnehmung mit vereinfachten synthetischen Geräuschen untersucht werden, bevor man sich mit Hilfe des ganzheitlichen Ansatzes konkreten realen Situationen annähert.

Fazit

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methodik und erste Ergebnisse dar, wie den akustischen Herausforderungen neuer Antriebskonzepte begegnet werden kann. Ein Teil der Ergebnisse für klassische Verbrennungsmotoren kann wahrscheinlich direkt übernommen werden, wie z. B. im Fall des wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotors. Ein Teil der Ergebnisse ist aber auch charakteristisch für die neuen Antriebssysteme, wie bspw. der stärkere Anteil tonaler Komponenten bei elektrifizierten Antrieben. Für diesen Teil gilt: Neue Antriebskonzepte bedingen eine neue Akustik.

Literatur

- [1] Eifler, W.: Vorlesungsunterlagen „Alternative Kfz-Antriebe (AKfzA)“, Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren, Ruhr-Universität Bochum, 2015.
- [2] Karagöz, Y.; Sandalci, T.; Yükses, L.; Dalkilic, A. S.; Wongwises, S.: Effect of hydrogen-diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016.
- [3] Decker, M.; Lucas, S.; Hintz, K.; Nobis, J.: Geräuschregelter Dieselmotor I & II (FVV-Nr. 1003). FVV Abschlussbericht, 2013.

Dr.-Ing. Fabian Duvigneau

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mechanik

Dr.-Ing. Sebastian Schneider

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mobile Systeme

M.Sc. Florian Doleschal

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Abteilung Experimentelle Audiologie

Dr.-Ing. Tommy Luft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mobile Systeme

Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mobile Systeme

Prof. Dr. rer. nat. Jesko L. Verhey

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Leiter der Abteilung Experimentelle Audiologie (EXA)

- [4] Carstens, J.-H.; Gühmann, C.; Schneider, S.; Rottengruber, H.; Nobis, J.; Neumann, E.: Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung – Optimierung und Adaption der Parameter – Abschlussbericht (FVV-Nr. 1075). FVV, 2017.
- [5] Schneider, S.: Psychoakustische Bewertung verbrennungsmotorischer Geräusche. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2021.
- [6] Duvigneau, F.: Ganzheitliche simulationsbasierte Bewertung der Akustik von automobilen Antrieben. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nummer 467, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 2017, ISBN 978-3-18-346720-4.
- [7] Gavila-Lloret, M.; Duvigneau, F.; Gabbert, U.; Rottengruber, H.: Prediction of the airborne sound transmission through the front end of a vehicle. Automotive and Engine Technology (AAET), Volume 4, pp. 169–178, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41104-019-00051-z>
- [8] Duvigneau, F.; Liefold, S.; Höchstetter, M.; Verhey, J. L.; Gabbert, U.: Analysis of simulated engine sounds using a psychoacoustic model. Journal of Sound and Vibration, Volume 366, pp. 544–555, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.11.034>
- [9] Duvigneau, F.; Nitzschke, S.; Woschke, E.; Gabbert, U.: A holistic approach for the vibration and acoustic analysis of combustion engines including hydrodynamic interactions. Archive of Applied Mechanics, Volume 86, Issue 11, pp. 1.887–1.900, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00419-016-1153-5>
- [10] Duvigneau, F.; Liefold, S.; Höchstetter, M.; Verhey, J. L.; Gabbert, U.: Psychoakustische Bewertung von Motorge-räuschen unter Nutzung auralisierter numerischer Simulationsergebnisse. Fortschritte der Akustik – DAGA 2015, 41. Jahrestagung für Akustik, Nürnberg, S. 924–927. ISBN 978-3-939296-08-9.
- [11] Duvigneau, F.; Höchstetter, M.; Gabbert, U.: Objektivierung der auditiven Wahrnehmung von Fahrzeuggeräuschen. Lärmbekämpfung, Bd. 11, Nr. 3 – Mai, pp. 99–104, 2016.
- [12] Duvigneau, F.; Koch, S.; Daniel, C.; Woschke, E.; Juhre, D.: Acoustic analysis of an electric engine complementing to a coupled rotor- and electrodynamic simulation of an electric drive train. Topic Keynote Lecture, 38th FISITA World Congress, 2021, Prague.
- [13] Duvigneau, F.; Koch, S.; Daniel, C.; Woschke, E.; Juhre, D.: Rückwirkungsbehaftete gekoppelte Analyse der Elektrodynamik, vibroakustischen Strukturschwingungen und Rotordynamik des elektrischen Antriebsstranges eines Gleitbootes. Fortschritte der Akustik – DAGA 2021, 47. Jahrestagung für Akustik, Wien, S. 425–428. ISBN 978-3-939296-18-8.
- [14] ISO 1996-2:2017 Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels, Genf: International Organization of Standardization. 2017.
- [15] ANSI S1.13 Measurement of Sound Pressure Levels in Air, Acoust. Soc. Am., 2005.
- [16] IEC TS 61400-14:2005. – Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values, International Electrotechnical Commission, VDE Verlag, Berlin. 2005.
- [17] DIN 45681:2005 Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth. 2005.
- [18] Fröhlingdorf, K.; Pischinger, S.: Automatisierte Analyse des Innengeräuschs von Elektrofahrzeugen. DAGA 2022 – 48. Jahrestagung für Akustik, Stuttgart, 2022.
- [19] Doleschal, F.; Rottengruber, H.; Verhey, J. L.: Influence parameters on the perceived magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds. Applied Acoustics 181, p. 108155, 2021.
- [20] Dau, T.; Püschel, D.; Kohlrausch, A.: A quantitative model of the “effective” signal processing in the auditory system. I. Model structure. The Journal of the Acoustical Society of America 99.6 (1996): 3615–3622.
- [21] Hansen, H.; Verhey, J. L.; Weber, R.: The Magnitude of Tonal Content. A Review. Acta Acustica united with Acustica 97 (3), pp. 355–363, 2011.
- [22] Hansen, H.; Weber, R.: Partial loudness as a measure of the magnitude of tonal content. Acoustical Science and Technology 32 (3), pp. 111–114, 2011.
- [23] Verhey, J. L.; Heise, S. J.: Suprathreshold Perception of Tonal Components in Noise Under Conditions of Masking Release. Acta Acustica united with Acustica 98 (3), pp. 451–460, 2012.
- [24] Doleschal, F.; Verhey, J. L.: Pleasantness and magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds containing subharmonics. Applied Acoustics 185, p. 108442, 2022. ■