Nutzung elektrischer Antriebe zur aktiven Geräuscherzeugung

MdynamiX, An-Institut der Hochschule München, erforscht die Geräuscherzeugung durch elektrische Antriebe, um dies als akustische Funktionsmehrung zukünftig nutzbar zu machen. Der Elektromotor wird quasi zum Lautsprecher und kann somit als sogenanntes Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) dienen. Ohne Zusatzhardware lassen sich mit den entwickelten Applikationen nicht nur die geforderten Warnsignale bei Elektrofahrzeugen erzeugen, sondern auch markeneigene Sounds designen. Die Basisfunktion der elektrischen Antriebe wird dabei nicht beeinflusst oder gar gestört.

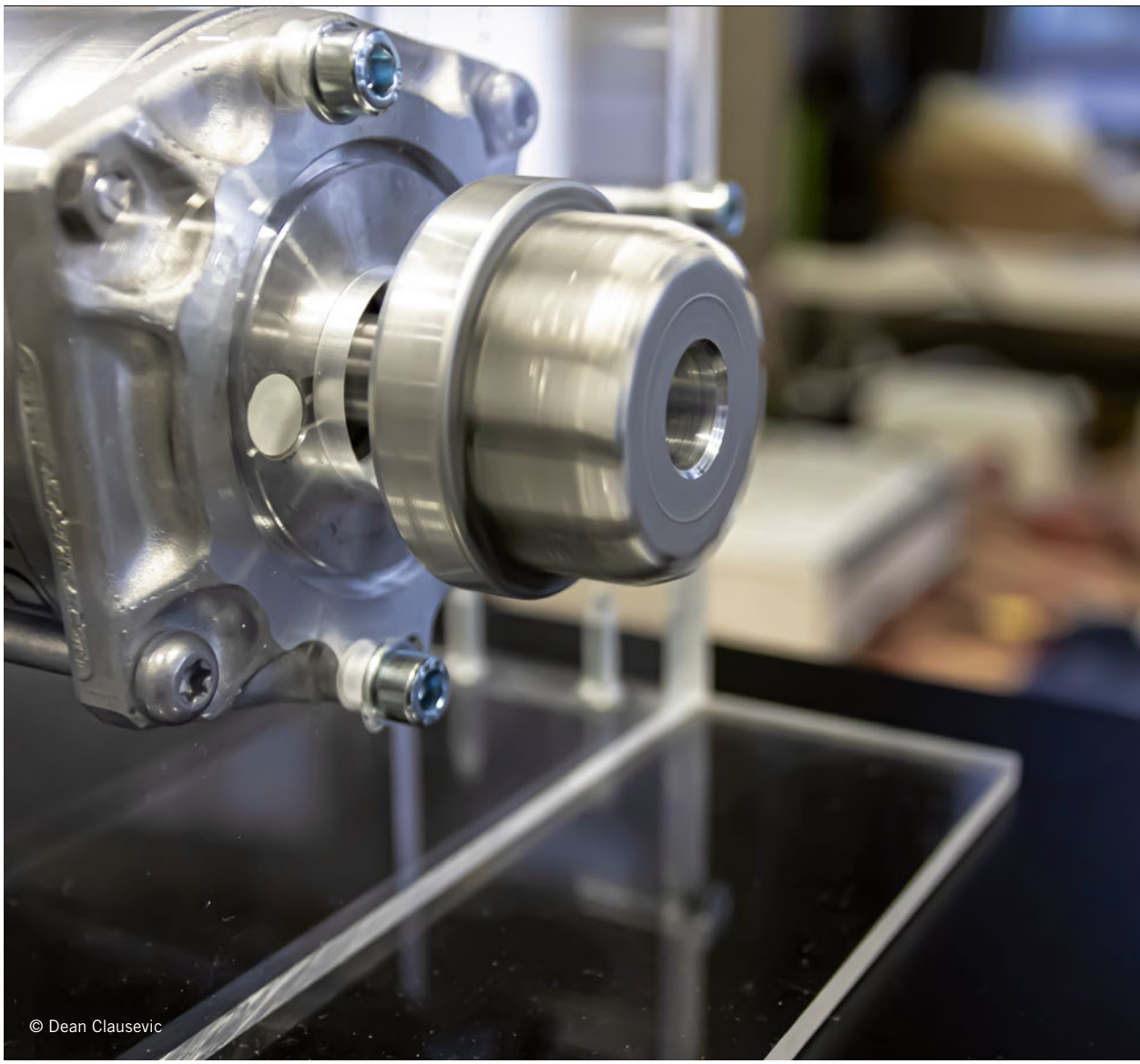
AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali
ist Professor für Akustik und Fahrzeugtechnik an der Hochschule München und Mitbegründer und Aufsichtsrat des An-Instituts MdynamiX AG in München.

Fabian Ebner, M. Sc.
ist Akustikingenieur bei der MdynamiX AG in München, dem An-Institut der Hochschule München.

Dominik Schubert, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Maschinenbau und Fahrzeugtechnik der Hochschule München und Regelungstechnikingenieur bei der MdynamiX AG, dem An-Institut der Hochschule München.

Leonhard Angerpointner, M. Sc.
ist Regelungstechnikingenieur bei der MdynamiX AG in München, dem An-Institut der Hochschule München.



© Dean Clausevic

1 EINLEITUNG
2 FUNKTIONSWEISE DES VERFAHRENS
3 ANWENDUNGSBEISPIELE
4 ANALYTISCHES DESIGNWERKZEUG
5 ANWENDUNGSFALL AUSSENGERÄUSCHERZEUGUNG
6 EINSATZ AUF SERIENHARDWARE
7 POTENZIAL ZUR ACTIVE NOISE CANCELLATION
8 ZUSAMMENFASSUNG

1 EINLEITUNG

Mit elektrischen Antrieben können aktiv Geräusche und Klänge erzeugt werden. Für diese sogenannte Active Sound Generation (ASG) gibt es nach fünf Jahren Forschung erste Anwendungsmöglichkeiten für Entwickler von Fahrzeugen und Fahrzeugsystemen, insbesondere elektrischer Antriebe und Komponenten. In diesem Beitrag wird die prinzipielle Methode und Funktionsweise erläutert und die Wirksamkeit an zwei Beispielen möglicher Serienanwendungen gezeigt. Im ersten Beispiel werden mittels des Elektroantriebs eines Lenksystems Warnsignale erzeugt, sodass anfahrende sehr leise Elektrofahrzeuge von Passanten erkannt werden können. Damit können die gesetzlichen Vorgaben für akustische Warnsignale bei Elektrofahrzeugen (AVAS) erfüllt werden. Das zweite Beispiel zeigt die Möglichkeit, Antriebsgeräusche zu emotionalisieren, um markentypische Klänge zu erzeugen. Durch die ASG können Kosten und Gewicht eingespart werden, da zusätzliche Luftschalllautsprecher entfallen können. Qualitativ hochwertige Reintöne, die durch als akustische Aktoren dienende Elektromotoren erzeugt werden, können zur aktiven Geräuschkompensation analog den bei Lautsprechern einsetzbaren Active-Noise-Cancellation-Systemen (ANC) genutzt werden. Hier sind ebenfalls erste Erfolge sichtbar.

2 FUNKTIONSWEISE DES VERFAHRENS

Elektromotorregelungen, die direkt die elektrischen flussbildenden und drehmomentbildenden Motorkomponenten steuern, sind weit verbreitet und oft bereits mit der benötigten Hardware implementiert. Eine solche zweidimensionale (rotorfeste) Motorregelung, wie sie bei Gleichstrommotoren (Ankerkreis) und Drehfeldmaschinen (feldorientierte Regelung) etabliert ist, bildet die Grundlage der ASG-Technologie [1]. Daher ist sie auf Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und Gleichstrommaschinen anwendbar. Die direkte Stimulation dieser Motorregelungskomponenten in radiale und tangentiale Richtung (flussbildende und drehmomentbildende Stromkomponenten) ermöglicht die Anregung von radialen und tangentialen inneren Kräften, die wiederum direkt durch die mechanischen Impedanzen von Stator und Rotor in fühlbare Vibrationen oder Körperschall gewandelt werden können. Je nach Anwendung und Übertragungsverhalten der Anbindungsstrukturen des Motors werden die erzeugten Schwingungen und der Luftschall abgestrahlt, **BILD 1**. Eine speziell vorgesteuerte Aufschaltung der Sollgrößen vor und hinter dem Motorstromregler ermöglicht die gewünschte Klangerzeugung mit elektrischen Antrieben. Dieser Eingriff erlaubt die regelungstechnische Unabhängigkeit von der Motorstromreglertopologie und vermeidet, schützenswerte Regelungstechnologie des OEM oder Subsystemherstellers offenlegen zu müssen. Das Patent von MdynamiX und der Hochschule München [2] beschreibt das Konzept genauer.

3 ANWENDUNGSBEISPIELE

Unter Anwendung des vorgestellten Verfahrens können eine Vielzahl akustischer und taktiler Funktionen in Fahrzeugen oder deren Subsystemen ohne Zusatzhardware realisiert werden. Am Lenkhilfeantrieb lassen sich typische Sounddesign-Aufgaben wie die Erzeugung oder Emotionalisierung von Motorgeräuschen im Innenraum authentisch umsetzen, da zum Antriebsmotor ähnliche Schallpfade genutzt werden. Auch Zusatzfunktionen wie ein haptisches Feedback am Lenkrad zur Warnung (Lane Keeping) oder zur zusätzlichen haptischen Wiedergabe des Elektromotorzustands können umgesetzt werden. Die Bandbreite möglicher Signale erstreckt sich von einfachen Test- oder Warntönen über technische Klänge, wie zum Beispiel Frequenzhochläufe, bis hin zu komplexen Klängen wie Musik oder Sprache. Je nach Anwendungsfall und Einsatzort stellt die zur Schallabstrahlung genutzte Struktur einen wesentlichen Einflussfaktor auf die erzielbare Klangqualität dar. Wird zum Beispiel der Lenkhilfeantrieb als Schallquelle ertüchtigt, erfolgt der Schalleintrag in den Innenraum über den für Verbrennungsmotorgeräusche dominanten Körperschallpfad, das heißt, über den Vorderachsträger hin zur Karosserie und dann hin zum Innenraum. Hierdurch kann ein authentischer Höreindruck beispielsweise für Motorgeräusche erzeugt werden. Etwaige Herausforderungen im Übertragungspfad, wie Resonanzstellen oder schlechtes Abstrahlverhalten, lassen sich im jeweiligen Anwendungsfall durch die Anpassung des Vorgabesignals kompensieren.

Da sich die ASG-Funktionalität auf nahezu jedem elektrischen Antrieb implementieren lässt, ist der Einsatz auch bei anderen Mobilitätskonzepten umsetzbar. Unter Anwendung mit der Traktionsmaschine wird es beispielsweise möglich, auch den Sound von Elektro-Scootern aktiv zu beeinflussen. Hierdurch lässt sich eine Emotionalisierung des Fahrerlebnisses erreichen. In [3] erfolgte eine Darstellung der Leistungsfähigkeit der Funktionalität bei Anwendung an einem Elektro-Maxi-Scooter.

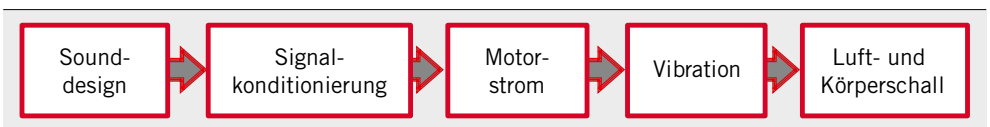


BILD 1 Wirkkette vom Sounddesign bis zum Klang (© MdynamiX)

4 ANALYTISCHES DESIGNWERKZEUG

Zur detaillierten Parametrierung eines technischen Sounds ausgehend von Betriebszuständen wurde als Schnittstelle zur ASG-Funktion die Software MXsounddesigner entwickelt. Bei der Wahl der Designparameter wurde Wert auf die technische Nähe zur Akustikentwicklung (Noise, Vibration, Harshness, NVH-Engineering) gelegt. Die Software wird ausschließlich auf Basis von NVH-Signalparametern ausgeführt. Das resultierende analytische Modell des designten Klangs mit einer freien Parametrisierung ist somit der Kern des MXsounddesigners. Der Funktionsumfang reicht von ordnungsbasierten Frequenzen mit optionaler Amplitudenmodulation (AM), Frequenzmodulation (FM) und Phasenrausch-Modulation bis zu konfigurierbaren Abstrahlcharakteristiken von typischen Quellgeometrien mit einstellbaren Eigenfrequenzen. Zusätzliche Geräuschquellen, wie das Umrichtergeräusch einer Leistungselektronik, Ton- oder Rauschquellen sind ebenfalls einstellbar, **BILD 2**. Da kein Detailwissen über die mechanischen Eigenschaften des Zielsystems nötig ist, kann das Werkzeug von Akustikingenieuren und auch von Sounddesignern ohne Spezialwissen verwendet werden. Die Software kann offline genutzt und mit Übertragungspfadmodellen oder Simulationen verknüpft werden [4].

5 ANWENDUNGSFALL AUSSENGERÄUSCHERZEUGUNG

Elektrofahrzeuge müssen laut Verordnung (EU) Nr. 540/2014 mit einem AVAS ausgestattet werden. **BILD 3** zeigt das Potenzial der ASG-Funktion zur Außengeräuscherzeugung am Beispiel der maximalen Außengeräuschpegel, die mit einem Lenkhilfeantrieb an einem Prototypenfahrzeug erzeugt wurden. Die Ermittlung dieser Pegel fand in Anlehnung an die Normvorgaben (stehendes Fahrzeug) statt und erfolgte in einem Abstand von 2 m senkrecht zur Fahrzeuglängsachse in einer Höhe von 1,2 m über schallhartem Boden (Asphalt) [5]. Als Testsignale wurden mit dem Lenkunterstützungsmotor Einzeltöne mit der jeweiligen Terzmittenfrequenz erzeugt. Das Fahrzeug befand sich in einem für diesen Anwendungsfall unabgestimmten Zustand. Im dargestellten Terzspektrum ist zu erkennen, dass die erreichten Schalldruckpegel (Sound Pressure Level, SPL) nach Frequenzanpassung für das menschliche Gehör (A-Bewertung) bis zu 66,7 dB betragen und im relevanten Frequenzbereich zwischen 160 und 2500 Hz die rechtlich geforderten Mindestschalldruckpegel (EU und USA) im Wesentlichen erreichen beziehungsweise überschreiten. Im Frequenzbereich von 3150 bis 5000 Hz konnten die geforderten Pegel nicht erreicht werden. Die ASG-Technologie in Verbindung mit dem Lenkunterstützungsmotor ist somit grundsätzlich in der Lage, einen zusätzlichen Außenlautsprecher zu ersetzen und die Pegelanforderungen an ein AVAS (EU und USA) zu erfüllen. Es ist zu beachten, dass in Abhängigkeit des genutzten Aktors auch ein relevanter Schalleintrag in den Fahrzeuginnenraum erfolgen kann. Das Potenzial der ASG-Funktionalität mit einem spezifischen Fahrzeug ist im jeweiligen Einzelfall zu prüfen.

6 EINSATZ AUF SERIENHARDWARE

Die ASG-Technologie konnte auch nachträglich auf ein Seriensteuergerät appliziert werden. Zur aktiven Geräuscherzeugung wurde der Lenkungsunterstützungsmotor mit dem Steuergerät eines Serienlenksystems genutzt. Der Funktionsumfang wurde speziell an die akustischen Anforderungen und hardwaretechnischen Möglichkeiten angepasst. Es konnten deutlich hörbare Klänge bestehend aus tonaler Anregung bis hin zu breitbandigen Motorensounds erzeugt werden, wobei die Primärfunktion der Lenkungsunterstützung durch diese Zusatzfunktionalität nicht beeinträchtigt wurde [5].

7 POTENZIAL ZUR ACTIVE NOISE CANCELLATION

Durch adaptive Algorithmen ist es ebenfalls möglich, den erzeugten Luft- und Körperschall derart anzupassen, dass störende Geräusche aktiv reduziert werden. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde in [7] und [8] gezeigt. Dabei wurde ein synthetisch erzeugtes Störgeräusch mithilfe des elektrischen Lenkunterstützungsmotors am Fahrerohr aktiv reduziert, **BILD 4**. Ein entscheidender Vorteil dieser Methode gegenüber den sonst verwendeten Luftschall-ANC-Systemen mit Lautsprechern ist die gezielte Erzeugung von Körperschall. Da in modernen Kraftfahrzeugen eine Vielzahl von elektrischen Antrieben vorhanden ist und diese direkt an mechanischen Strukturen befestigt sind, ist es möglich, deren Schwingungsverhalten zu beeinflussen. Beispielsweise lassen sich Resonanzschwingungen aktiv reduzieren; somit kann direkt in den Körperschallpfad von Störgeräuschen eingegriffen werden. Im Gegensatz zu Luftschall-ANC-Systemen wird in diesem Fall die Ursache des Störgeräuschs beseitigt, wobei dies zu einer globalen Verbesserung des akustischen Verhaltens und der fühlbaren Schwingungen führt.

Einen weiteren Anwendungsfall stellt die Reduktion von Motorordnungen von elektrischen Antrieben dar. Hier kann der drehmomentbildende Stromanteil mit aktiv angepassten harmonischen

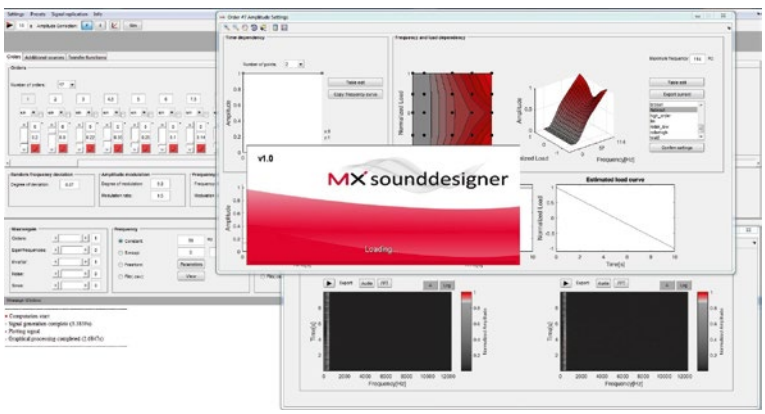


BILD 2 Bedienoberfläche des MXsounddesigners (© MdynamiX)

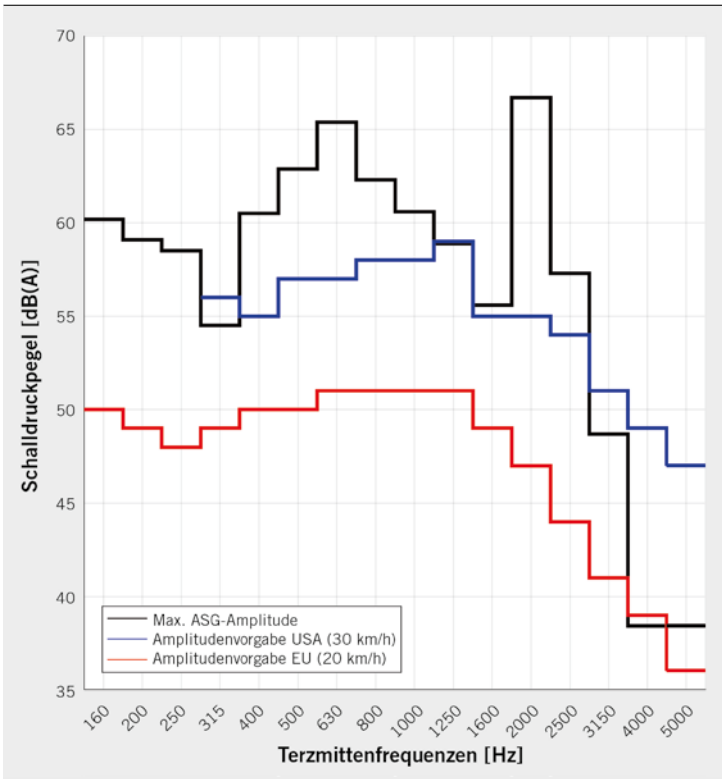


BILD 3 Maximalwerte an verschiedenen Messpunkten um das Fahrzeug im Vergleich zu den Anforderungen der EU und den USA (© MdynamiX)

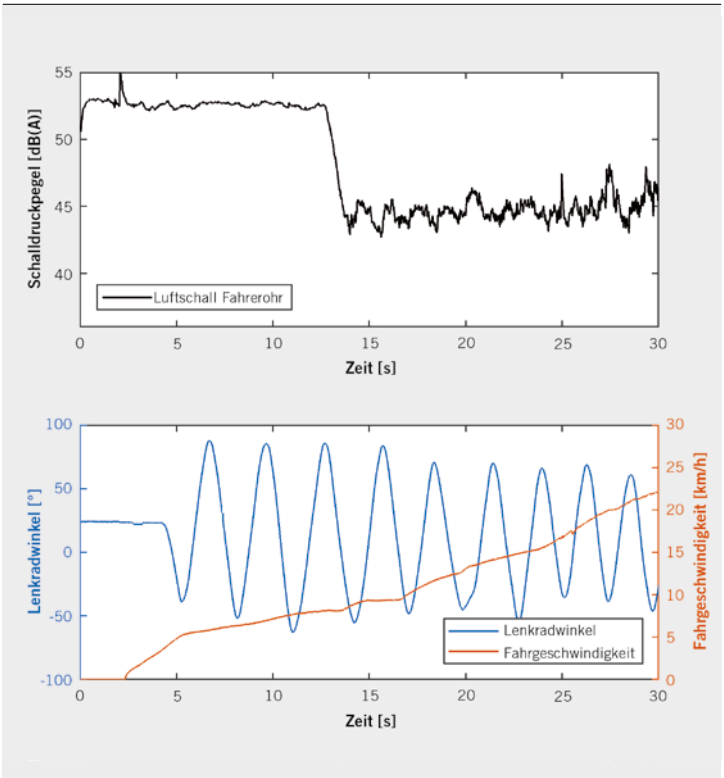


BILD 4 Schalldruckpegel (A-bewertet) am Fahrerohr während einer beschleunigten Fahrt mit sinusförmigen Lenkbewegungen (© MdynamiX)

SOLUTIONS FOR VIRTUAL TEST DRIVING
ipg-automotive.com

IPG AUTOMOTIVE

THE BEST FOR YOUR TEAM. THE WORLD'S LEADING AUTOMOTIVE MAGAZINES IN ONE PACKAGE.

YOU GET:

- Access to the online specialist articles archives
- Keyword Search in the e-magazines
- Interactive animations and editorial videos

WATCH OUR VIDEO AND GET TO LEARN MORE:
www.atz-magazine.com/automotive-package

OEMs · Suppliers · Service providers · Universities

Schwingungen überlagert werden, um den störenden abgestrahlten Luftschall aktiv zu minimieren. So werden elektrische Antriebe buchstäblich mit sich selbst leiser gemacht.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Bei einer Vielzahl von elektrischen Antrieben kann die vorgestellte Active Sound Generation MX-ASG von MdynamiX auf die flussbildenden und drehmomentbildenden Stromkomponenten aktiv Einfluss nehmen, um eine geforderte Geräusch- oder Klangerzeugung und auch eine gewünschte Geräuschminderung zu ermöglichen. Durch die Funktionsmehrung bestehender Hardware werden keine zusätzlichen Komponenten benötigt, und Gewicht sowie zusätzlicher Bauraum werden eingespart. Typische Sounddesign-Aufgaben zur Emotionalisierung von Motorgeräuschen im Innenraum können authentisch umgesetzt werden. Die Anwendung unterstützt die gesetzlich geforderte AVAS-Funktion zur Erkennung anfahrender Elektrofahrzeuge. Durch die Nutzung bereits verbauter elektrischer Antriebe als Schallaktoren können zusätzliche Außenlautsprecher eingespart werden oder komplett entfallen. Durch adaptive Algorithmen konnten bereits Luft- und Körperschall derart angepasst werden, dass störende Geräusche aktiv gemindert wurden. Dies birgt die Möglichkeit einer aktiven Geräuschkompensation analog den ANC-Systemen mit Luftschalllautsprechern. Die neue Technologie der MX-ASG ist eine Basisinnovation und wird zukünftig noch viele neue Fahrzeugfunktionen ermöglichen.

LITERATURHINWEISE

[1] Schröder, D.: Regelung von Antriebssystemen. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 494, S. 814f

[2] Ebner, F.; Angerpointner, L.; Gärner, F.; Sentpali, S.; Schubert, D.; Hecker, S.; Henneberger, R.: Verfahren zur Erzeugung und/oder Kompensation von Schwingungen mittels eines Elektromotors. Patent DE 10 2018 115 148.9, Deutsches Patent- und Markenamt, 2020

[3] Schreiber, M.; Henneberger, R.; Schubert, D.; Hecker, S.; Sentpali, S.: Active Sound Generation Using Electrical Drives. 40. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2019

[4] MXsounddesigner: MdynamiX. Online: https://mdynamix.de/mx-products/mxsounddesigner/, aufgerufen: 8. Mai 2020

[5] Chang, K.-J.; Angerpointner, L.; Schubert, D.; Niegl, M.; Orehek, M.; Pfeffer, P.: Development of the Active Sound Generation Technology using Motor Driven Power Steering System. In: SAE Technical Paper (2020), Nr. 2020-01-1536 (unveröffentlicht)

[6] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): Proposal for a new Regulation concerning the approval of quiet road transport vehicles (QRTV). Online: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/wp29/ECE-TRANS-WP29-2016-026e.pdf, aufgerufen: 25. Mai 2020

[7] Schubert, D.; Henneberger, R.; Hecker, S.; Sentpali, S.; Marburg, S.: Active noise cancellation in passenger cars using the electrical power steering motor. IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Mauna Lani, 2017, S. 255-260, https://doi.org/10.1109/ccta.2017.8062472

[8] Schubert, D.; Henneberger, R.; Hecker, S.; Sentpali, S.: Aktive Geräusch- und Vibrationsreduktion mit Hilfe elektrischer Antriebe. 44. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2018), München, 2018

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
Test now for 30 days free of charge: www.atz-worldwide.com