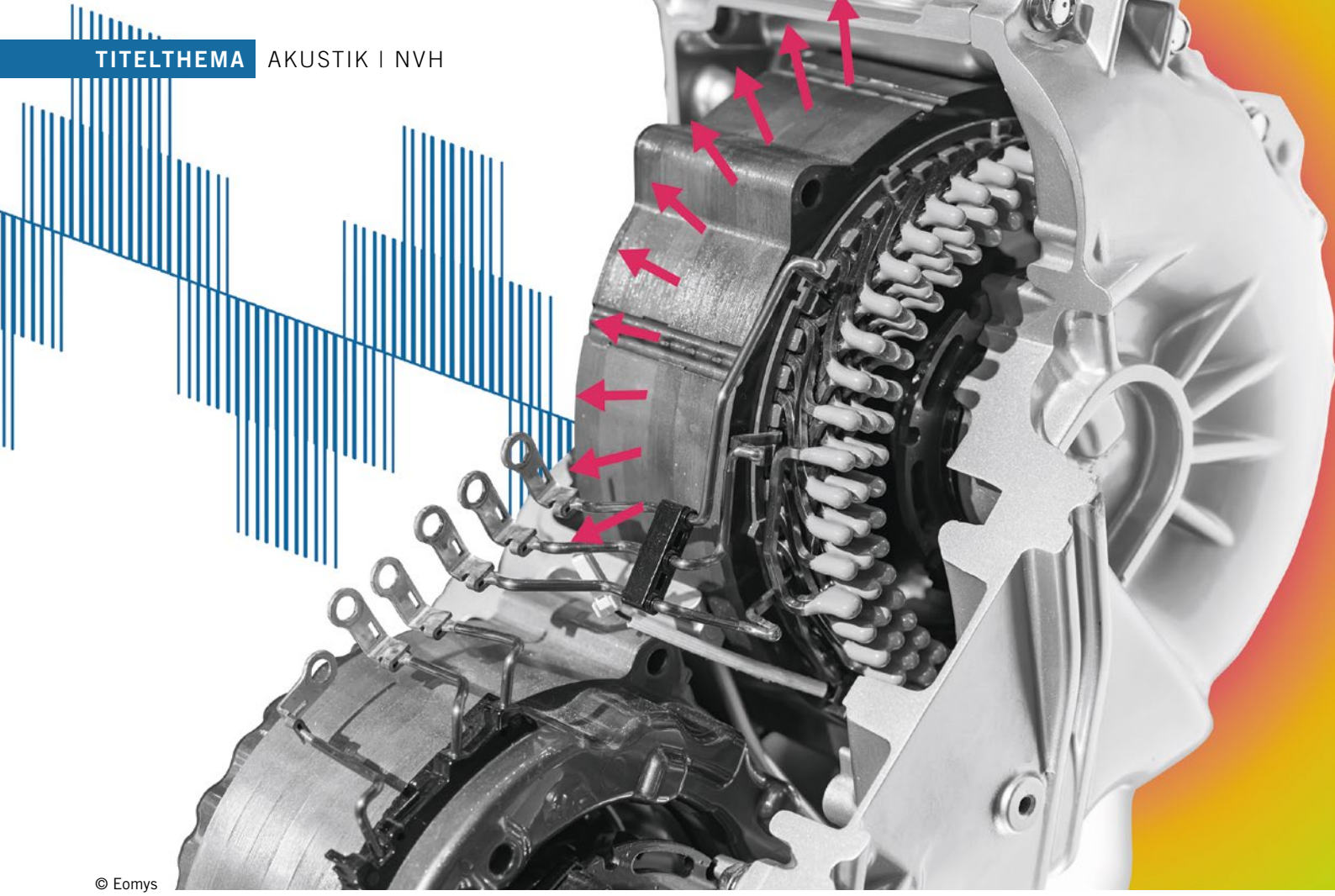

© Eomys

ANGEMESSENES GERÄUSCHNIVEAU

Akustische Geräuschquellen in Hybridelektrofahrzeugen (HEVs) oder Elektrofahrzeugen (EVs) müssen unter Kontrolle gehalten werden, um ein angemessenes Niveau an akustischem Komfort sowohl für Passanten als auch Fahrer und Passagiere zu gewährleisten. Die Geräusch- und Schwingungsquellen bei elektrischen Fahrzeugen können mechanische (zum Beispiel Reifen/Straße, Getriebe), aerodynamische (zum Beispiel Wind und Lüfter) und elektromagnetische (zum Beispiel die Luftspalt-Reluktanzwechsel, die sogenannten Airgap Reluctance Variations, und die Kommutierung) Ursachen haben.

In diesem Artikel konzentriert sich Eomys auf die von der Leistungselektronik hervorgerufenen und oft unangenehmen Schaltgeräusche, auch PWM-Rauschen genannt (Pulse Width Modulation; Impulsbreitenmodulation), die für Geräusche in elektrischen Antriebseinheiten (EDUs) verantwortlich sein können. An erster Stelle soll die Physik des PWM-Geräusch-Generierungsprinzips erläutert werden, das von einer Spannung bis zu magnetischen Anregungsharmonischen reicht. Die Eigenschaften des Geräuschspektrums von EV- oder HEV-Anwendungen werden zweitens analytisch hergeleitet, um Schlussfolgerungen auf Aspekte der Klangqualität bei Schaltgeräuschen zu ziehen. Schließlich werden Beispiele von Geräuschmessungen bei kommerziellen Hybrid- und Elektrofahrzeugen vorgestellt und interpretiert.

AUTOREN

Dr.-Ing. Emile Devillers
ist R&D Engineer für Electrical Engineering bei Eomys in Lille (Frankreich).

Dr.-Ing. Paul Gning
ist R&D Engineer für Electrical Engineering bei Eomys in Lille (Frankreich).

Dipl.-Ing. Karine Degrendele
ist R&D Engineer für Vibro-Acoustics bei Eomys in Lille (Frankreich).

Dr.-Ing. Jean Le Besnerais
ist CEO und R&D Engineer bei Eomys in Lille (Frankreich).

Aspekte der Klangqualität von Elektrofahrzeugen

In Hybrid- und Elektrofahrzeugen kann die Leistungselektronik unangenehme Schaltgeräusche hervorrufen, die vom Elektromotor ausgehen. Um den Komfort für Passanten, Fahrer und Passagiere sicherzustellen, hat Eomys zahlreiche Untersuchungen an Elektroantrieben vorgenommen. Die richtige Wahl der Umrichterfrequenz kann je nach Elektromotortyp zur Verringerung des Schaltgeräuschpegels beitragen.

NVH IN ELEKTRISCHEN SYSTEMEN

In den letzten Jahren stieg das Interesse an NVH-Thematiken (Noise, Vibration, Harshness; Geräusch, Vibration, Rauigkeit) für Hybridantriebe sowie Elektroantriebe in HEVs oder EVs aufgrund verschiedener Konzeptionsherausforderungen in der Elektrifizierungstechnologie stetig an. Eine der sogenannten Elektro-NVH-Herausforderungen ist die Handhabung neuer Anregungsquellen in Elektroantrieben, die von elektromagnetischen Kräften infolge von Magnetfeldschwankungen hervorgerufen werden. Magnetische Kräfte beinhalten Maxwellkräfte und Magnetostriktionskräfte; letztere sind nur bei passiven Geräten wie Transformatoren von Bedeutung. Basierend auf der Erfahrung von Eomys mit mehr als 100 elektrischen Maschinen, stellen Maxwellkräfte die treibenden Elektro-NVH-Anregungsquellen in EV-HEV-Anwendungen dar.

Elektromagnetische Kräfte tendieren dazu, Rotor und Stator in elektrischen Maschinen anzuziehen, so wie Magnete mit entgegengesetzten Polaritäten. Es können zwei Arten von magnetischen Kräften in Elektromotoren unterschieden werden: Nuten-Stoßkräfte (sogenannte Slotting Forces), die durch die Interaktionen zwischen Nuten und Polen in permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) hervorgerufen werden, und Schaltkräfte, die durch Stromharmonische, induziert durch die Leistungselektronik, erzeugt werden. Je nach ihrer Frequenz und physischen Ursprung sind magnetische Kräfte durch eine besondere Form entlang des Luftspalts gekennzeichnet, die Wellenzahl genannt wird. Eine gut bekannte magnetische Anregung sowohl auf den Rotor als auch auf den Stator ist die Drehmomentwelligkeit, wobei es sich um eine pulsierende Kraft in tangentialer Richtung handelt. Dabei ist die Drehmomentwelligkeit nur eine von mehreren Magnetkräften, die innerhalb der elektromechanischen Umwandlung vorhanden sind. Die Drehmomentwelligkeit und andere mögliche Schwingformen werden in **BILD 1** dargestellt, die mit der von Eomys entwickelten Software Manatee generiert wurden.

Magnetkräfte, die auf Rotor- und Statorstrukturen wirken, können als wandernde Wellen dargestellt werden. Die Bezeichnung erfolgt mit dem Paar $\{f, r\}$, wobei f die Anregungsfrequenz und r die Wellenzahl ist. Wenn der Stator einer Kraft-Oberschwingung ausgesetzt ist, kann es zu einer normalen Verformung der Baugruppe mit dem Statorgehäuse kommen, was in einem Luftschallanteil resultiert. Magnetische Vibrationen des Rotors können einen Körperschall hervorbringen, insbesondere im Fall von $r = 1$ (unausgeglichene magnetische Anziehungskraft), **BILD 1**. Bei Resonanz können bedeutsame Schwingungen und Lärmstörungen auftreten, etwa wenn die Form der Magnetkraft einer Stator- oder Rotormodalform entspricht und wenn ihre Anregungsfrequenz mit der entsprechenden Eigenfrequenz übereinstimmt.

SPANNUNGS- UND STROMHARMONISCHE INFOLGE DER PWM

Da die Drehgeschwindigkeit des Ankers proportional zur Grundfrequenz von Wechselstrommotoren (wie beispielsweise PMSM) ist, erfordern Traktions-

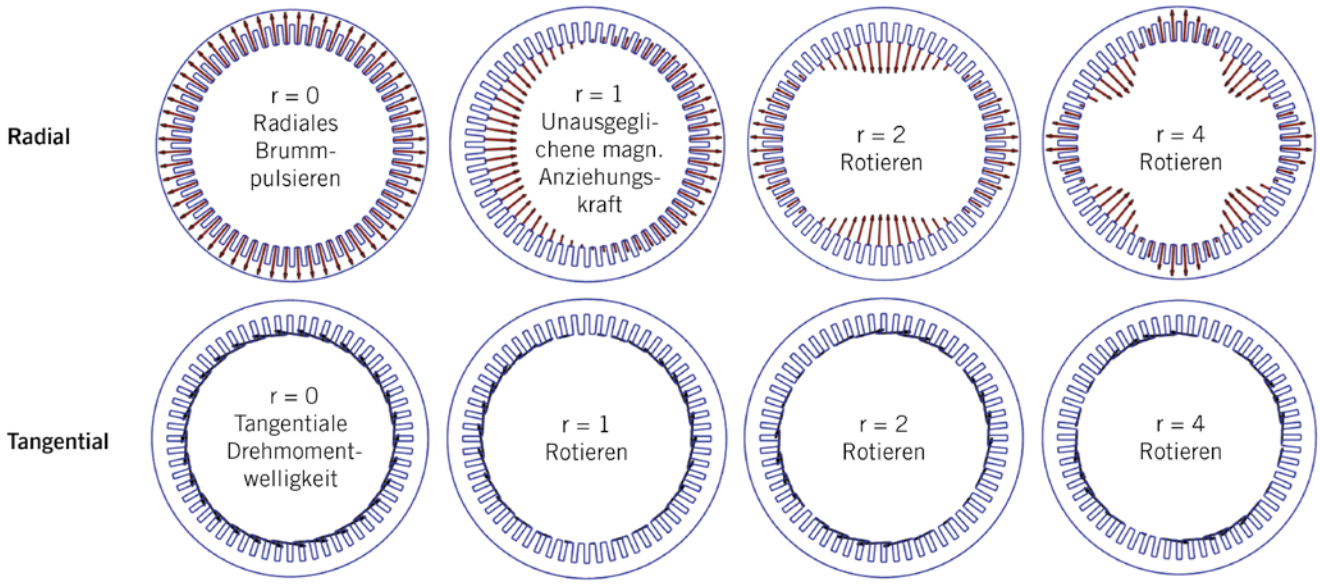

BILD 1 Beispiele von radialen und tangentialen Magnetkraftarten, die auf den Stator eines Elektromotors wirken (© Eomys)

anwendungen mit variabler Geschwindigkeit die Erzeugung dreiphasiger Ströme mit variabler Frequenz. Die Bauteile der Leistungselektronik enthalten keine Sinusstromquellen mit einstellbarer Frequenz; es sind jedoch Gleichstromspannungen und Schalter (IGBTs) verfügbar; und Berg-Tal-förmige Spannungswellenformen können erzeugt werden, indem zu bestimmten Kommutierungszeiten von Hochspannung (im Allgemeinen von Batterien des EV oder HEV bereitgestellt) auf Nullspannung umgeschaltet wird.

Die Technik der PWM wird oft in dreiphasigen Spannungsumrichtern verwendet, um einen quasi-sinusförmigen Strom mit einer bestimmten Frequenz in der Statorwicklung des Elektromotors zu erzeugen. Ziel ist es, Spannungsimpulse unterschiedlicher Breite zu erzeugen, **BILD 2**, die auf dem Vergleich einer dreiecksförmigen Trägerwelle der Frequenz f_{Schalt} (Schaltfrequenz) und einer modulierenden Sinuswellenform der Frequenz f_S (Statorstrom-Grundfrequenz) basieren. Aufgrund der Existenz von Induktivitäten im Stromkreis werden Spannungsimpulse geebnet, und der Strom kann sinusförmig ansteigen oder abnehmen, je nachdem wie der gleitende Mittelwert der Spannungswellenform zu- und abnimmt.

Man kann zeigen, dass diese Modulationstechnik hochfrequente Oberwellen kleiner Größe in den Spannungs- und Stromwellenformen erzeugt. Für Standard-PWM-Strategien wie Sinus-PWM (SPWM) oder Space Vectors PWM (SVPWM) können die Frequenzen dieser Harmonischen durch $f_{PWM} = mf_{Schalt} \pm nf_S$ beschrieben werden, wobei m und n ganze Zahlen mit entgegengesetzter Parität sind, $n > 0$ und nicht ein Vielfaches der Phasenanzahl q_s. Wie in **BILD 3** zu sehen ist, hängt die Amplitude I der Stromharmonischen aufgrund der PWM vom Modulationsindex D ab, der das Verhältnis der Zwischenkreisspannung (DC-Bus) zur Grundphasenspannung ist [1]. Die größten Stromoberschwingungen treten bei $2f_{Schalt} \pm f_S$ beim Start und $f_{Schalt} \pm 2f_S$ im Fahrtmodus auf.

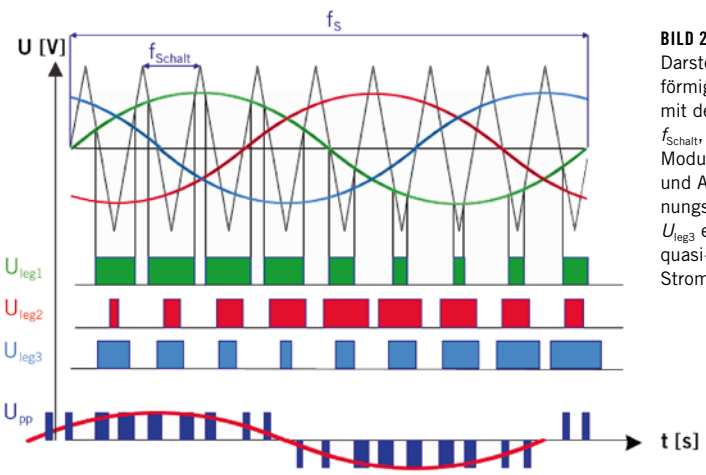

BILD 2 Schematische Darstellung: dreiecksförmige Trägerwelle mit der Schaltfrequenz f_{Schalt}, sinusförmige Modulationssignale und Ausgangsspannungswellen U_{leg1} bis U_{leg3} erzeugen den quasi-sinusförmigen Strom U_{pp} (© Eomys)

OBERSCHWINGUNGEN DER PWM-MAGNETKRAFT

Maxwellkräfte sind proportional zum Quadrat der Flussdichte. In PMSM ist das Anregungsfeld beim Stator proportional zum Statorstrom, und die Anregung am Rotor bleibt aufgrund von Permanentmagneten konstant. Daher sind die durch die PWM verursachten Oberwellen der Magnetkraft hauptsächlich das Resultat der PWM-Flussharmonischen beim Stator und des Rotor-Grundflusses.

Die größten rotierenden Flusswellen infolge der PWM können als $\{f_{PWM}, p\}$ beschrieben werden, wobei p die Anzahl der Polpaare des Elektromotors ist und $\{f_s, p\}$ dem Rotor-Grundfluss entspricht.

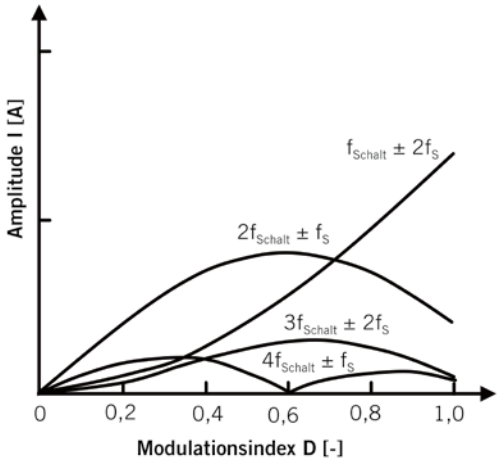

BILD 3 Schematische Darstellung der Amplitude *I* der Stromoberschwingungen als Funktion des Modulationsindex *D* [1] (© Eomys)

In der Annahme einer symmetrischen PWM-Strategie kann die erste Ordnung der durch die PWM induzierten magnetischen Kräfte berechnet werden, indem diese beiden Flussharmonischen kombiniert werden. Wellenzahlen und Frequenzen der Magnetkraft erhält man durch das Addieren/Subtrahieren derjenigen einer jeden Flussdichtewelle. Die PWM addiert pulsierende $r = 0$ und rotierende $r = \pm 2p$ Kraft-Wellenzahlen um das Vielfache der Schaltfrequenzen. Im Fall einer Innenrotor-PMSM-Maschine mit einer „hohen" Anzahl von Polpaaren p (typischerweise $p = 4$ in Automobilanwendungen) dominieren pulsierende Magnetkraft-Oberschwingungen die NVH-Antwort, **BILD 4**, da Vibrationsverformungen mit hoher Wellenzahl $2p$ tendenziell eine geringere Größe und Strahlungseffizienz haben.

Dies erklärt, warum in EV- und-HEV-Anwendungen mit einer Standard-PWM das Schaltgeräusch nicht exakt bei einmal einer Schaltfrequenz auftritt, (nur Seitenlinien darum), sondern bei der doppelten Schaltfrequenz. Außerdem wird das PWM-Schaltgeräusch beim Start von der doppelten Schaltfrequenzgruppe dominiert, moduliert mit $6f_s$.

KLANGQUALITÄT DES PWM-SCHALTGERÄUSCHS

Die Schaltfrequenz kann je nach elektrischer Traktionsanwendung und Umrichterstrom von 250 Hz bis 20 kHz variieren. Je größer die Schaltfrequenz, desto höher die Umrichterverluste. Bei EVs wird die Schaltfrequenz tendenziell minimiert, um die EDU-Effizienz zu verbessern, aber maximiert, um die Auswirkungen von NVH und elektromagnetischer Störung (Electromagnetic Interference, EMI) zu verringern.

Das PWM-Schaltgeräusch kann aus verschiedenen Gründen unangenehm klingen. Erstens verbleibt ein Teil des Schaltgeräuschs unverändert, sodass es keine Fahrgeschwindigkeitsinformationen übermittelt. Zweitens können Schaltgeräusche bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, bei denen Wind- und Straßengeräusche keine verdeckende Rolle spielen, besonders aufdringlich wirken. Des Weiteren kann das PWM-Schaltgeräusch wie ein störendes Pfeifgeräusch klingen, da es sich durch eine hohe Tonalität und ein hohes Prominenzverhältnis auszeichnet.

Letztendlich zeichnet sich der PWM-Klang durch eine starke Rauigkeit aufgrund von Modulationseffekten aus. Rauigkeit tritt auf, wenn das menschliche Ohr nicht in der Lage ist, zwei nahe beieinander liegende individuelle Reintöne zu unterscheiden, typischerweise wenn die Frequenzdifferenz zwischen 10 und 300 Hz liegt. Es entsteht dann eine schwankende Hülle um diese Töne, die das unangenehme Gefühl von Rauigkeit vermittelt. Die Rauigkeit hängt von der Mitten- oder Trägerfrequenz f_T (entsprechend f_{Schalt} oder $2f_{Schalt}$ im PWM-Startfall), der Modulationsfrequenz (entsprechend $6f_s$ im PWM-Startfall) und dem Modulationsindex m ab. Für $m = 1$ ist das Rauigkeitsmaximum unabhängig von der Schaltfrequenz, die zwischen 1 und 8 kHz variiert. Die Rauheits-Wahrnehmung m ist maximal, wenn die Modulationsfrequenz etwa 70 Hz beträgt [2].

Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences

An der Ernst-Abbe-Hochschule, **Fachbereich Maschinenbau,** ist ab dem **01.04.2021** folgende

Professur

zu besetzen:

Virtuelle Produktentwicklung
Bes. Gr.: W 2; Kennziffer: MB 6

Der Fachbereich Maschinenbau sucht eine engagierte Ingenieurin bzw. einen engagierten Ingenieur des Maschinenbaus oder eng benachbarter Fachdisziplinen mit einschlägiger Industrieerfahrung in der Entwicklung technischer Produkte, die/der das o. g. Fachgebiet in Lehre und Forschung kompetent vertritt. Neben der weiteren Etablierung moderner Entwicklungs- und Simulationsmethoden (u. a. VR/AR) wird auch die Übernahme von Lehrveranstaltungen in 3D-CAD und Finite-Elemente-Methode erwartet. Die Infrastruktur des Fachbereiches bietet gute Voraussetzungen, die bestehende Laboreinrichtung in der Denominationsrichtung auszubauen. Neuen Ideen und Konzepten zur Erweiterung und Ergänzung des Curriculums stehen wir aufgeschlossen gegenüber.

Zum Aufgabenspektrum gehören auch Lehrveranstaltungen zu konstruktiven Grundlagenthemen und die Betreuung von Studierenden im Praxissemester bzw. bei der Anfertigung von Projekt- oder Abschlussarbeiten. Die Bereitschaft zur Mitwirkung in der akademischen Selbstverwaltung sowie zur Durchführung von Lehrveranstaltungen in englischer Sprache wird begrüßt.

Den vollständigen Ausschreibungstext entnehmen Sie bitte der Rubrik "Karriere" auf unserer Homepage unter www.eah-jena.de.

Schriftliche Bewerbungen werden erbeten mit den üblichen aussagefähigen Unterlagen unter Angabe der Kennziffer bis zum **24.08.2020** an den

Rektor der Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

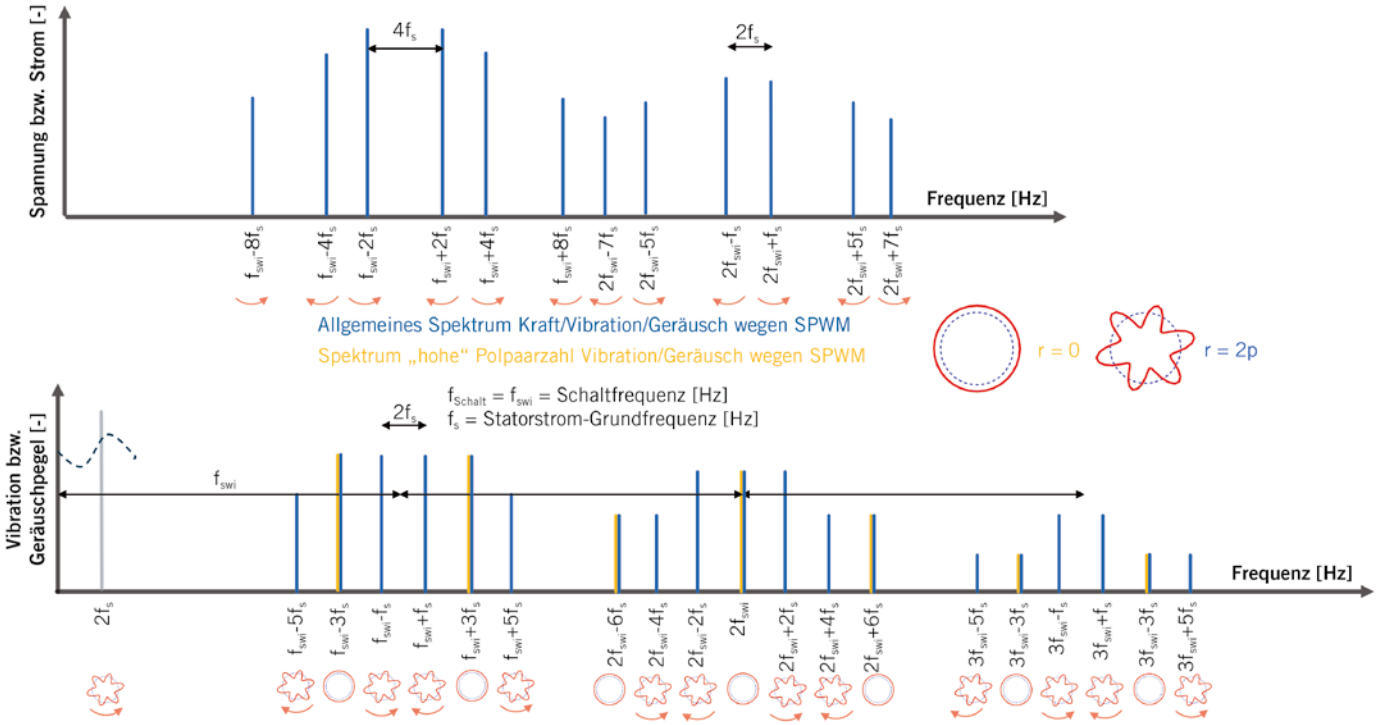

BILD 4 Schematische Darstellung des Spektrums der PWM-Spannung beziehungsweise des PWM-Stroms (oben); elektromagnetische PWM-Anregungskräfte (unten) (© Eomys)

BEISPIELE VON SCHALTGERÄUSCHEN IN EV- UND HEV-ANWENDUNGEN

In NVH-Spektrogrammen erscheinen Oberschwingungen einer asynchronen PWM-Strategie als V-förmige Linien, da die Schaltfrequenz unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit festgelegt ist. Bei einer synchronen PWM-Strategie, bei der die Schaltfrequenz proportional zur Drehzahl ist, treten komplexere Muster auf.

BILD 5 zeigt Spektrogramme von zwei NVH-Testkampagnen für EVs (Nissan Leaf) und HEVs (Hyundai Ionic), die von Eomys [3] durchgeführt wurden, wobei die Oberwellen des PWM-Schaltgeräuschs mit weißen Pfeilen hervorgehoben sind. Hochfrequente Geräuschstörungen beim Nissan Leaf, die bei 5, 10 und 15 kHz auftreten, sind auf die PWM zurückzuführen, die mit einer asynchronen Schaltfrequenz von 5 kHz verbunden ist. In Übereinstimmung mit der Theorie treten die höchsten Oberschwingungen des PWM-Schaltgeräuschs bei $2f_{Schalt}$ beim Start des Fahrzeugs und $f_{Schalt} \pm 3f_s$ bei höherer Geschwindigkeit auf.

Im Fall des Hyundai Ionic führt eine komplexere Kommutierungsstrategie

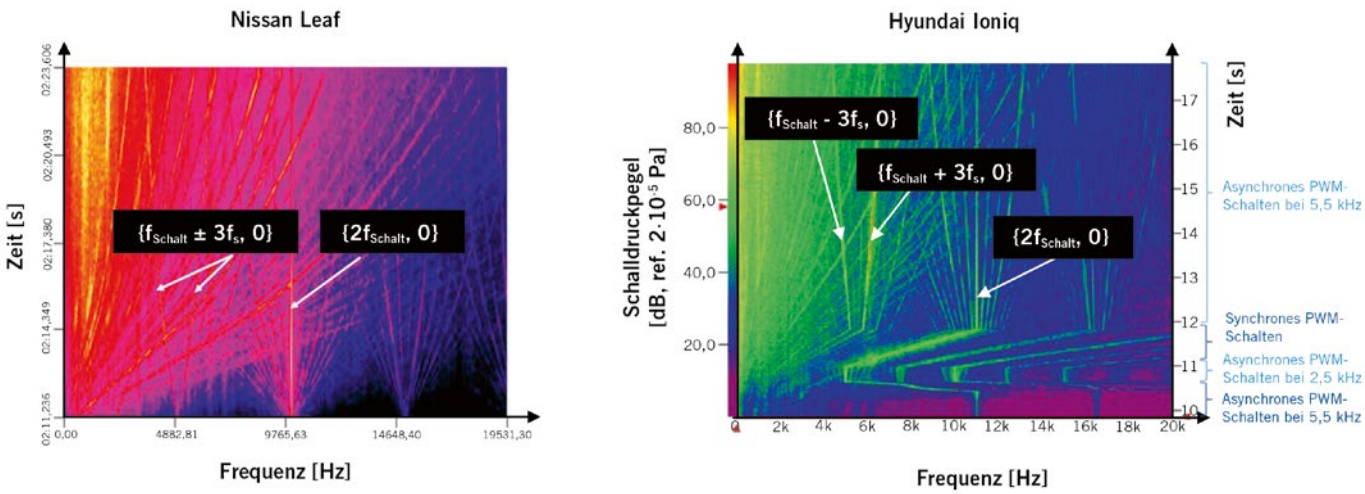

BILD 5 Schalldruckpegel-Spektrogramm des elektrischen Antriebsstrangs während des Hochlaufs bei maximalem Drehmoment in Motornähe für den Nissan Leaf (links) und für den Hyundai Ionic (rechts) (© Eomys)

plötzliche Neigungsänderungen über der Geschwindigkeit ein; diese spezielle Strategie kann zur Reduzierung der Schaltverluste oder zur Verbesserung des NVH-Verhaltens verwendet werden. Im akustischen Spektrogramm ist in der Nähe von 6 kHz eine Resonanz sichtbar, die wahrscheinlich der Übereinstimmung zwischen den pulsierenden PWM-Kräften und der Atmungsmode der Statorlaminierung entspricht.

Die von Eomys beobachteten PWM-Strategien für diese beiden Fahrzeuge, aber auch für andere EV- und HEV-Anwendungen sind in **TABELLE 1** zusammengefasst. Es zeigt sich, dass im Markt die Asynchron-PWM-Strategie vorherrscht.

Automobilhersteller	Fahrzeugmodell	Motortopologie	PWM-Strategie	Schaltfrequenz f_{Schalt} [kHz]
BMW	i3	HSM	Asynchron	8,0
Hyundai	Ionic	PMSM	Variabel	2,5 bis 5,5
Nissan	Leaf	IPMSM	Asynchron	5,0
Opel	Ampera	IPMSM	Asynchron	10,0
Renault	Twizy	SCIM	Asynchron	8,0
Renault	Zoe	WRSM	Asynchron	10,0
Smart	Fortwo	IPMSM	Asynchron	10,0
Tesla	X90D	SCIM	Asynchron	5,5
Toyota	Prius 2004	IPMSM	Asynchron	2,5
Volkswagen	E-Up	IMPSM	Asynchron	9,0

TABELLE 1 Zusammenfassung der PWM-Strategien verschiedener EV- und HEV-Anwendungen (HSM = hybriderregte Synchronmaschine, PMSM = permanentmagneterregte Synchronmaschine, IPMSM = Synchronmaschine mit eingebetteten Permanentmagneten, SCIM = Asynchronmaschine mit Käfigläufer, WRSM = Synchronmaschine mit Stabläufer) (© Eomys)

SCHLUSSFOLGERUNG UND EMPFEHLUNG

Die Leistungselektronik moduliert die Wellenformen der Versorgungsspannung von drehzahlvariablen elektrischen Antriebssträngen, was zu zusätzlichen Stromoberschwingungen in Wechselstrommotoren führt. Folglich werden neue elektromagnetische Kräfte um das Vielfache der Schaltfrequenzen eingeführt, assoziiert mit den Wellenzahlen 0 und $\pm 2\,p$, wobei p die Anzahl der Polpaare ist, was zu einem potenziell unangenehmen Luftschall mit starker Rauigkeit führt. Die Wahl der Schaltfrequenz kann zur Verringerung des Schaltgeräuschpegels beitragen, indem Resonanzen zwischen elektrischem Antriebsstrang (insbesondere die Stator-Atmungsmode) und Magnetkräften vermieden werden, während die Wahl der Kommutierungsstrategie (zum Beispiel je nach Motorbauart mit sinusförmiger Impulsbreitenmodulation (SPWM), Raumzeiger-Impulsbreitenmodulation (SVPWM), unstetiger Impulsbreitenmodulation (DPWM), allgemein unstetiger Impulsbreitenmodulation (GDPWM) und Zufalls-Impulsbreitenmodulation (RPWM)) zur Verbesserung der PWM-Klangqualität beitragen kann.

Es ist sehr empfehlenswert, Schaltgeräuschprobleme in einem frühen Entwurfsstadium abzuschätzen, um die Anwendung von akustischen Behelfslösungen in der späten Entwicklungsphase zu vermeiden, da es hier schnell zu zusätzlichem Gewicht, Wärme, Kosten und Produktionsverzögerungen kommen kann. Die Optimierung der NVH-Auslegung kann zusammen mit dem virtuellen Prototyping des elektrischen Antriebsstrangs unter Verwendung kombinierter elektrischer, elektromagnetischer, strukturmechanischer und akustischer numerischer Modellierung durchgeführt werden, wie es mit Manatee-Softwarelösungen [4] von Eomys möglich ist.

LITERATURHINWEISE

[1] Ueda, S.; Honda, K.; Ikimi, T.; Hombu, M.; Ueda, A.: Magnetic noise reduction technique for an AC motor driven by a PWM inverter. In: Transactions on Power Electronics 6 (1991), Nr. 3 (Juli), S. 470-475

[2] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics. Facts and Models. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007

[3] Eomys Engineering (Hrsg.): Audio files of electromagnetically-excited noise. WAV-Format, online: https://eomys.com/e-nvh/audio-files-of-electromagnetically-excited-noise/, aufgerufen: 23. März 2020

[4] Eomys Engineering (Hrsg.): Manatee. Magnetic Acoustic Noise Analysis Tool for Electrical Engineering. Software, version v1.09.01, online: http://www.manatee-software.com, aufgerufen: 20. April 2020

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