



© RWTH Aachen University

Mit elektrischem Antrieb und modellbasierter Systemanalyse nahezu lautlos in die Zukunft

Die Gestaltung des Akustik- und Komfortverhaltens zählt zu den zentralen Aufgaben in der Fahrzeugentwicklung, weil sie das Kaufverhalten entscheidend beeinflusst. Aus diesem Grund entwickeln Wissenschaftler der RWTH Aachen University Tools zur domänenübergreifenden modellbasierten Beurteilung und Optimierung von Geräuschen und Schwingungen elektrifizierter Fahrzeuge.

AUTOREN



Dipl.-Ing. Pascal Drichel
ist Doktorand am Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE) der RWTH Aachen University.



Markus Jaeger, M. Sc.
ist Research Assistant am Institut für elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen University.



Mark Müller-Giebeler, M. Sc.
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für technische Akustik (ITA) der RWTH Aachen University.

ZENTRALE ROLLE DES ANTRIEBSSTRANGS

Jeder Fußgänger ist wahrscheinlich schon einmal von einem Elektroauto überrascht worden. Ein leichtes Summen und vielleicht das sanfte Abrollgeräusch der Reifen sind alles, was man hört. Ein E-Auto weist sicherlich ein geringeres Schalldruckpegelniveau auf als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Einerseits sind die für elektrische Antriebssysteme typischen magnetisch oder das Getriebe erzeugten Töne besonders störend, andererseits bekommen Fahrer und Mitfahrer durch den Wegfall des Verbrennungsmotors in einem E-Auto mehr von den übrigen Geräuschen mit, die in jedem Fahrzeug üblicherweise auftreten.

Der Antriebsstrang, also die Gesamtheit der Komponenten, die die Leistung für den Antrieb erzeugen und auf die Antriebsräder übertragen, ist ein wichtiger Aspekt im Themenfeld der E-Auto-Akustik, weil er das Geräuschbild in Elektrofahrzeugen maßgeblich mitbestimmt. Durch den Wechsel der Antriebstechnologie vom verbrennungsmotori-

schen zum elektrischen Antrieb wandelt sich die Geräuschcharakteristik ausgehend von einem für einen Großteil der Menschen wohlklingenden tiefen, breitbandigen hin zu einem höherfrequenten, tonalen Klangbild, das durch Frequenzen von bis zu einigen kHz geprägt ist. Die von Getriebe und elektrischer Maschine angeregten und vom gesamten Antriebsstrang und Fahrzeug in den Innenraum übertragenen Schwingungen sowie der daraus resultierende Schall tragen maßgeblich zum Qualitätseindruck bei und beeinflussen die Kaufentscheidung der Konsumenten. Die Gestaltung und Optimierung des NVH- (Noise Vibration Harshness) beziehungsweise Akustik- und Komfortverhaltens ist daher eine zentrale Aufgabenstellung in der Fahrzeugentwicklung.

MODELLBASIERTE SYSTEMANALYSE

Zur Wahrung der Konkurrenzfähigkeit am Markt müssen Hersteller und Zulieferer zudem Entwicklungszeiten und -kosten stets minimieren. In diesem Kontext eröffnet die stetig anwachsende

Leistungsfähigkeit von Hard- und Softwaretechnologien immer mehr die Möglichkeit, das Geräuschverhalten reproduzierbar zu erfassen, zu verstehen und in einer bestimmten Qualität vorherzusagen beziehungsweise optimieren zu können. Dazu ist die Abbildung der Wirkkette erforderlich, von Anregung bis Innenraumgeräusch im NVH-Gesamtsystem, bestehend aus elektrischem, strukturdynamischem und akustischem Teilsystem mit Wirkungen und Rückwirkungen. Es wird davon ausgegangen, dass ein möglichst frühzeitiger Beginn der modellbasierten Systemanalyse und -optimierung im Produktentwicklungsprozess die Wahrscheinlichkeit erhöht, wettbewerbsfähige Lösungen liefern zu können und das Risiko zu minimieren sowie Kosten durch Änderungen in späten Phasen des Entwicklungsprozesses zu erzeugen.

Die Forschergruppe, bestehend aus dem Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE), dem Institut für elektrische Maschinen (IEM) und dem Institut für Technische Akustik (ITA), arbeitet daher an Metho-

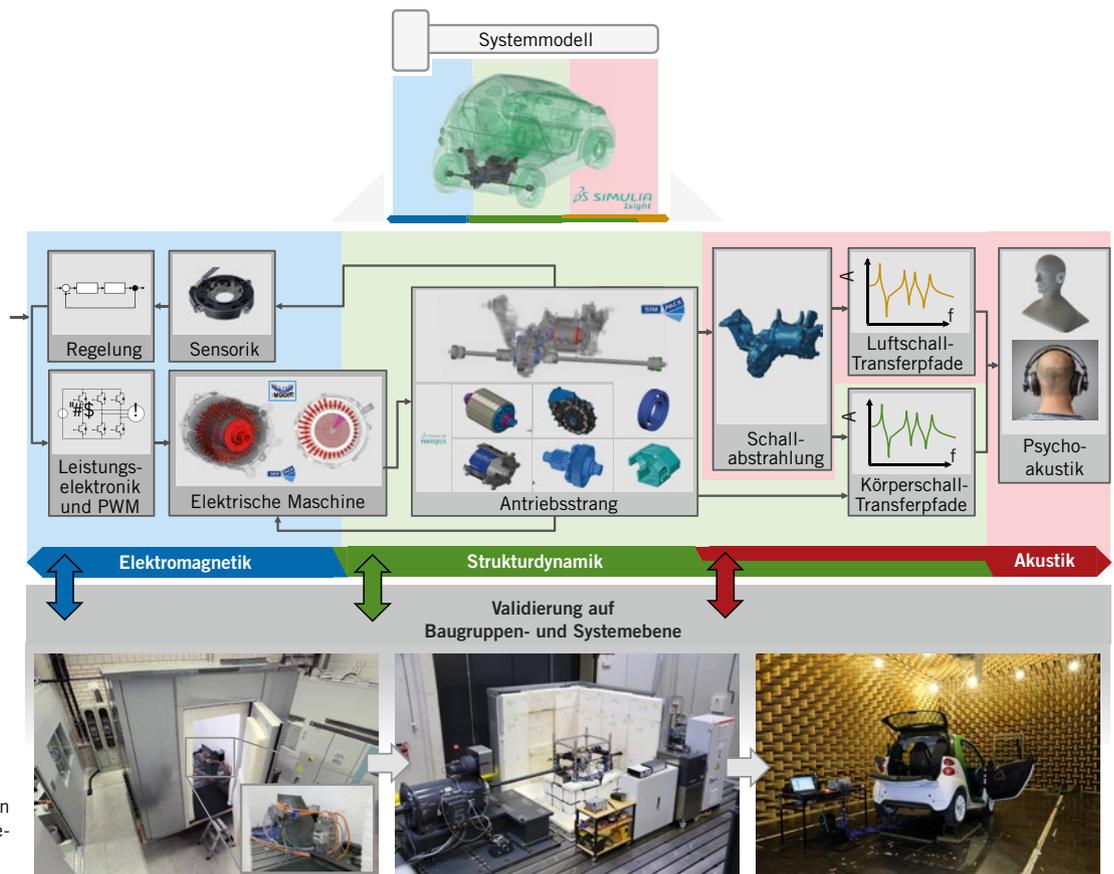


BILD 1 Domänenübergreifende Systemsimulation und Messungen zur Validierung [1] (© RWTH Aachen University)

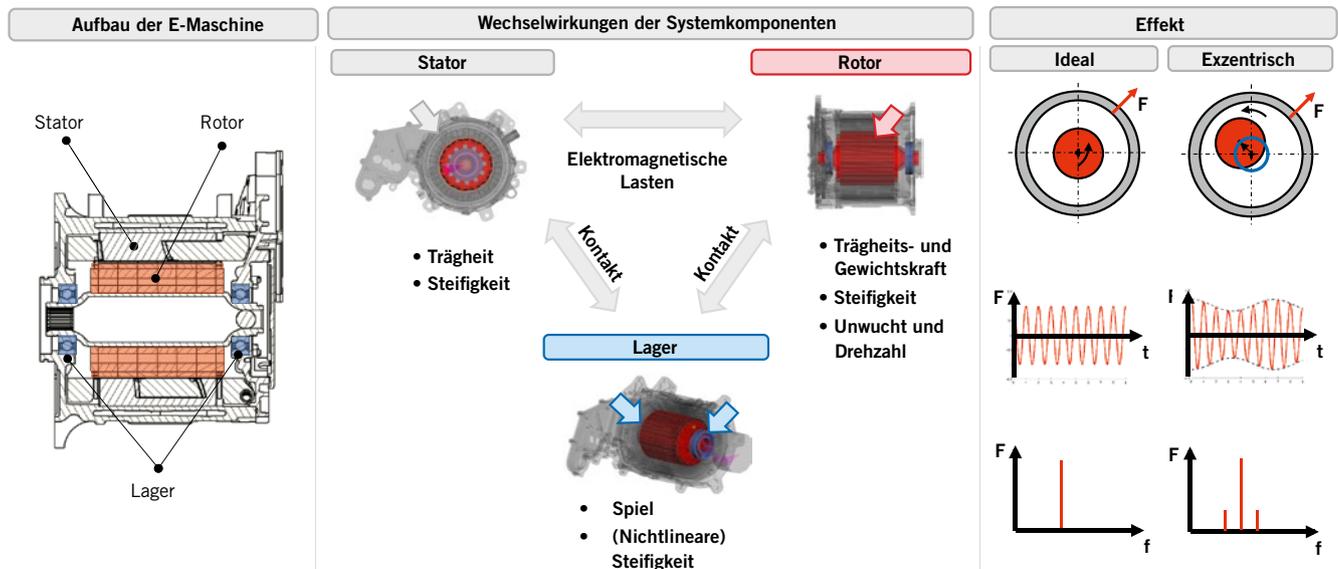


BILD 2 Wechselwirkungen der E-Maschinen-Komponenten und Berücksichtigung des nicht-ideal Verhaltens der elektrischen Maschine durch Rotor-Exzentrizität [8] (© RWTH Aachen University)

den und Modellen zur Analyse, Optimierung und Bewertung des Geräusch- und Schwingungsverhaltens von elektrifizierten Fahrzeugen. Dies geschieht im stetigen Austausch mit der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). Um den Geräuscheinfluss diverser Komponenten und Effekte im Antriebsstrang zu verstehen, wird ein domänenübergreifender, hybrider Ansatz aus analytischen und numerischen Simulations- und Messkomponenten verfolgt. Die Berücksichtigung der strukturdynamischen Eigenschaften des Gesamtsystems ist nötig, da das Getriebegeräusch von den Eigenschaften der elektrischen Maschine beeinflusst wird, und umgekehrt. Zur Integration bewährter und zur Implementierung neuer beziehungsweise weiterentwickelter Modellkomponenten und -schnittstellen sowie zur Lösung des gekoppelten Systemverhaltens werden unter anderem Simulia-Lösungen wie das EMKS-Tool (Elastische Mehr-Körper-Simulation) Simpack, die FEA-Umgebung (Finite-Elemente-Analyse) Abaqus und die Prozessautomatisierung iSight in Kombination mit weiterer Software wie dem IEM-FEA-Tool Pymoose zur elektromagnetischen Berechnung verwendet. Messtechnische Untersuchungen an Komponenten, Baugruppen und am System stellen die Grundlage für den Parametrierungs- und Validierungsprozess dar [1], **BILD 1**.

ANALYTISCHE SIMULATION

Im Bereich der Elektromagnetik entwickeln die Forscher Modelle, die die Anregungskräfte eines umrichter gespeisten permanentenregerten Synchronmotors (PMSM) abbilden. Dabei werden bestehende analytische und numerische Modellierungsansätze weiterentwickelt, um Fertigungsabweichungen, Exzentrizität und den Einfluss des Umrichters recheneffizient im Systemmodell abbilden zu können [2, 3]. Die schnell ausführbare analytische Simulation arbeitet dabei auf Basis der Ergebnisse aus tausenden vorab parallel durchgeführten numerischen FE-Simulationen der IEM-Software Pymoose zur Berechnung der mehrdimensionalen Kennfelder von Flussverkettungen, Induktivitäten und Anregungskräften. Die Kraft-Anregungsspektren werden analysiert, um festzustellen, welche Effekte besonders dominant sind und hinsichtlich einer effizienten Weiterverarbeitung berücksichtigt werden sollten. Hierzu wurde eine eigene Berechnungsmethode entwickelt und implementiert. Diese Methode bildet im Vergleich zu bekannten Ansätzen [4, 5] die Wechselwirkungen der Antriebsstrangkomponenten durch eine starke Kopplung ab, sodass zum Beispiel Rotorunwucht und Lagerspiel ein nicht-ideales Verhalten der E-Maschine zur Folge haben. Dadurch tritt eine Amplitudenmodulation der elektromagnetischen

Kräfte auf, die neben den dominanten Anregungen der magnetischen Pole und Statornuten zur Ausbildung vibroakustisch relevanter Seitenbänder führt, **BILD 2**. Die Abaqus-FE-Modelle der Unterbaugruppen des Antriebsstrangs beinhalten vollflexible Gehäuse, Wellen und die Fluid-Struktur-Wechselwirkung von Statorgehäuse und Maschinenkühlmittel. Die strukturdynamischen Eigenschaften von Rotor und Stator, deren magnetische Aktivteile einen geschichteten Aufbau aufweisen, werden mithilfe von Materialmodellen mit richtungsabhängigen Eigenschaften modelliert und unter Verwendung von Methoden der Multi-Skalen-Modellierung (repräsentatives Volumelement – RVE) und Messungen parametrisiert. Die Submodelle der Strukturdynamik werden in einer elastischen Mehr-Körper-Simulation zusammengeführt. Zudem werden die lastabhängigen, nichtlinearen Lagersteifigkeiten und das Anregungsverhalten des Getriebes in dieser Umgebung eingebunden. Diese Vorgehensweise erlaubt eine deutliche Reduzierung der Anzahl der Freiheitsgrade im Vergleich zu einer Finite-Elemente-Simulation und damit die Berücksichtigung der beschriebenen nichtlinearen, strukturdynamisch relevanten Effekte im Zeitbereich. Ohne diese effiziente Modellierungstechnik wäre der ganzheitliche Ansatz mit der Betrachtung des transienten Systemverhaltens wohl nicht zu realisieren.

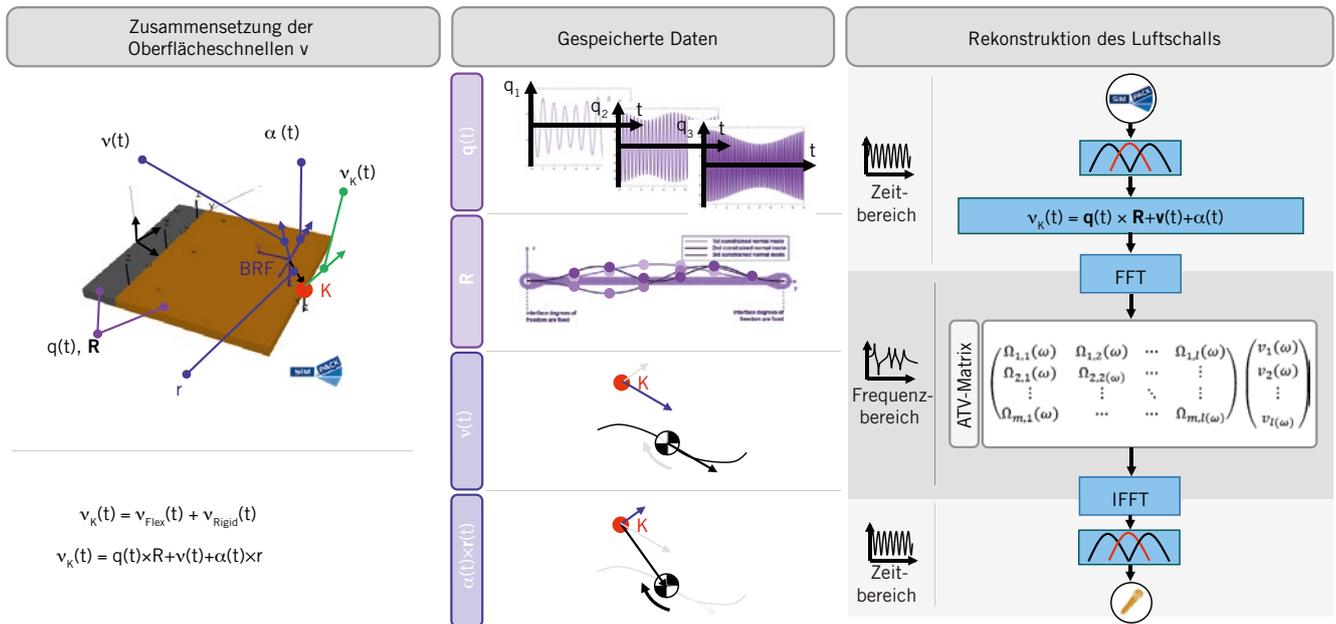


BILD 3 Konzept zur effizienten Berechnung des abgestrahlten Luftschalls auf Grundlage des berechneten Körperschalls in der EMKS [8] (© RWTH Aachen University)

AURALISIERUNG DES KÖRPERSCHALLS

Ein umfassendes akustisches Bild eines Elektroautos ergibt sich jedoch erst nach der Hörbarmachung (Auralisierung) des berechneten Körperschalls unter Berücksichtigung der gemessenen Luft- und Körperschalltransferpfade. Zur Berechnung des abgestrahlten Luftschalls kommen numerische Abstrahlungsmodelle (Boundary Element Method – BEM) zum Einsatz. Damit kann das komplexe Abstrahlungsver-

halten des Antriebsstrangs erfolgen, zum Beispiel unter Berücksichtigung von Reflexionen und Abschattung. Dazu ist jedoch die Kenntnis der räumlich und zeitlich hochaufgelösten Oberflächenschnellen des Antriebsstrangs ($v_k(t)$) notwendig. Dies stellt hinsichtlich des Datenhandlings bei der Größe typischer Antriebsstränge und üblicher Hochlaufzeiträume eine Herausforderung dar (Beispiel Hochlaufzeit 10 s, Abtastrate 20 kHz, 7100 kn, 100 Moden: 250 GB). Als wesentlicher Schlüssel, um die auszutauschende Datenmenge in

einem handhabbaren Rahmen zu halten, wird eine effiziente Strategie umgesetzt, die im Wesentlichen aus der Nutzung der zeitabhängigen modalen Schnelle ($q(t)$) der elastischen Körper in Kombination mit dem über einen Simulationslauf konstanten Zusammenhang zwischen modaler und nodaler Schnelle (R) basiert und die zu transferierende Datenmenge im Beispiel signifikant auf 0,21 GB reduziert. Die damit bereitstehenden transienten Oberflächenschnellen werden nach Transformation in den Frequenzbereich mit den vorab ebenfalls



SETZEN SIE STANDARDS BEI DEN CO₂-FLOTTENWERTEN – WIR ELEKTRIFIZIEREN IHRE ANTRIEBE

**NUTZEN SIE UNSERE EXPERTISE SOWOHL BEI DER
INTEGRATION VON 48 VOLT-TECHNOLOGIEN ALS AUCH BEI DER
ENTWICKLUNG VON E-FAHRZEUGEN**

Ihr Engineering Partner für:

- > Integration von 48 Volt-Systemen
- > P1 bis P4 Hybridantriebsstränge
- > Modulare Batterieentwicklung mit eigenem Batteriemanagementsystem
- > Hybridgetriebe-Entwicklung

SIMULATION

im Frequenzbereich berechneten Transfereigenschaften des Luftvolumens unter Berücksichtigung der Gehäusegeometrie (Acoustic Transfer Vector-Matrix) verrechnet und im Anschluss durch eine Rücktransformation in den Zeitbereich auralisiert [6]. Die neben den typischerweise berücksichtigten modalen Schnellen der elastischen Körper ($v_{Flex}(t)$ [7] berücksichtigten Starrkörperanteile ($v_{Rigid}(t)$) stellen eine exakte Berechnung der Oberflächenschnellen im Fall mehrerer gekoppelter elastischer Komponenten sicher, **BILD 3**.

Als Anwendungsbeispiel des domänenübergreifenden Modellierungsansatzes konnten verschiedene Lastfälle und Antriebsstrangvarianten berechnet und dominante Resonanzeffekte innerhalb des Systems im relevanten Geschwindigkeitsbereich identifiziert werden. Der durch das Modell möglich gewordene Einblick in die Mechanismen der Geräuschenstehung und -leitung bildete die Grundlage für eine zielgerichtete Optimierung des Systemverhaltens. So konnte Optimierungspotenzial hinsichtlich einer gekoppelten Systemresonanz identifiziert werden, in der die Torsion des Rotors Energie an die Getriebeeingangswelle und über die Schrägverzahnung und Lagerung an den Strang und die Gehäuse überträgt. Die Simulationsergebnisse belegen, dass durch eine gezielt abgestimmte elasti-

sche Entkopplung des Rotors das Körperschallpegelniveau im betrachteten Betriebsbereich reduziert werden kann, **BILD 4** [4, 5].

SENSITIVITÄTSANALYSEN UND HÖRVERSUCHE

Um einen möglichst frühzeitigen Beginn der modellbasierten Systemanalyse und -optimierung im Produktentwicklungsprozess zu ermöglichen, ist ein effizientes Modell entscheidend. Neben der Bewertung und Validierung der vorgestellten Maßnahmen zur Verbesserung der Vorhersagequalität stehen vor allem folgende Fragestellungen im Fokus der weiteren Betrachtung: In welchem Maß wirkt sich die Detaillierung von Modellkomponenten auf das wahrgenommene Geräuschverhalten aus? Welche Modellkomponenten müssen für eine gute Vorhersage dezidiert abgestimmt werden und welche Modellkomponenten können vereinfacht abgebildet werden? Welcher Verlust der Vorhersagegüte tritt durch eine überschlägige Abbildung einzelner Komponenten auf? An dieser Stelle sollen systematische Untersuchungen zeigen, welche Aussagen zum vibroakustischen Verhalten in welcher Güte in verschiedenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses möglich sind. Zur Bewertung des berechneten Geräuschs kommen neben

klassischen Bewertungen des Schalldruckpegels insbesondere psychoakustische Auswertungen zum Einsatz, die die Dimensionen der menschlichen Hörempfindung berücksichtigen. Die Erkenntnisse sollen durch Hörversuche abgesichert werden und ermöglichen, den Detailgrad von Schnittstellen, physikalischen Effekten, Bauteilen und Baugruppen so genau wie nötig für den konkreten Untersuchungszweck einzustellen und die Entwicklungszeit nicht durch eine zu exakte Modellierung zu verschenken.

SUCHE VON GERÄUSCHQUELLEN

Ein Großteil der Arbeit wird mit den Lösungen Simulia Abaqus und Simulia Simpack von Dassault Systèmes bestritten. Aus Forschungssicht ist die Kombination aus modernen nichtlinearen Solvern, bewährten Modellierungselementbibliotheken und der Möglichkeit, über Nutzer-Routinen neue Modellierungs- und Berechnungsmethoden aus der Forschung zu integrieren, besonders wertvoll. Dank diesem leistungsstarken Merkmal können eigene Ideen für Teilanalysen in die Software integriert werden. Außerdem wird auch Simulia Isight zur Prozessautomatisierung und -optimierung eingesetzt. Dadurch können verschiedene Software-Workflows zusammengeführt werden. Zugleich

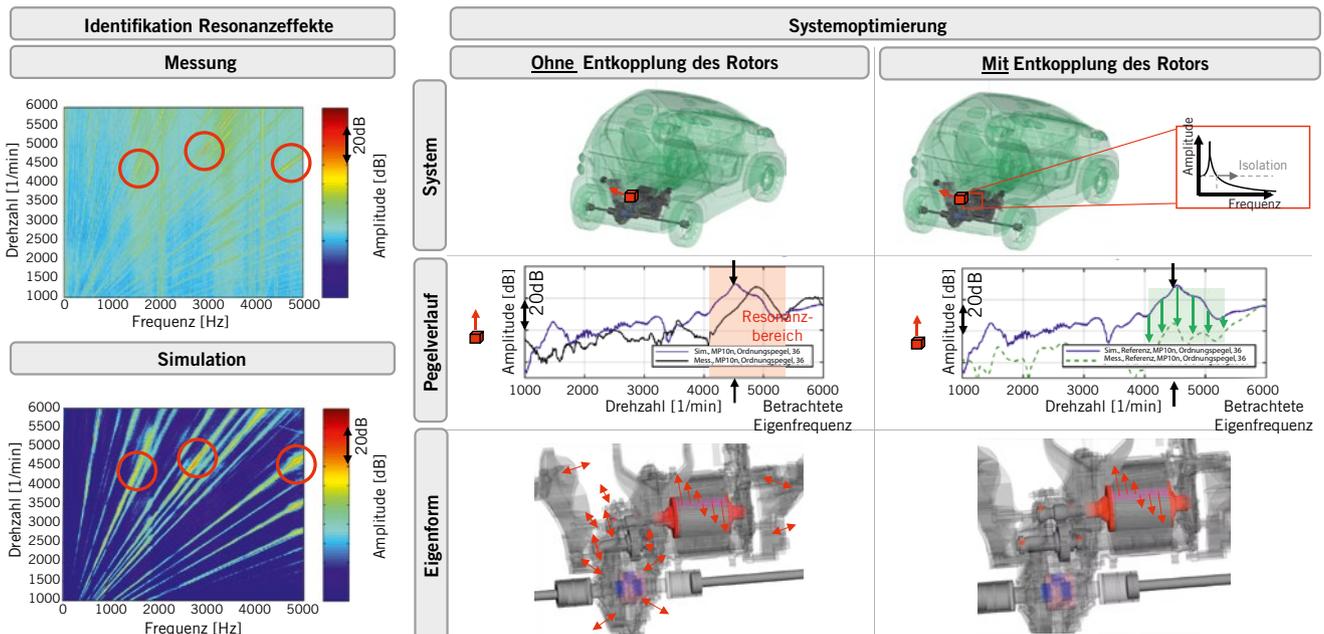


BILD 4 Analyse struktureller Auffälligkeiten (Körperschall am Getriebe) in Messung und Simulation [5] (© RWTH Aachen University)

werden die Ausführung und die Auswertung im Vergleich zu manuellen Workflows erleichtert, robuster gemacht und signifikant beschleunigt.

Dank elastischer Mehr-Körper-Simulation, Multi-Skalen-Simulation und Prozessautomatisierung können Produktentwickler während der Konstruktionsphase schnell einen Einblick in ein System gewinnen. Moderne Methoden unterstützen einen ganzheitlichen Ansatz zur Systemsimulation der E-Auto-Antriebsstrangkonstruktion. So können Lösungen für spezifische technische Probleme identifiziert, verstanden und entwickelt werden, die durch die Wechselwirkungen von Komponenten und Subsystemen gekennzeichnet sind. Die Aufgabe, Werkzeuge und Modelle bereitzustellen, mit denen Akustikingenieure die DNA der Antriebsstrangeräusche von Elektrofahrzeugen gestalten können, kann mit den beschriebenen Lösungen erreicht werden.

ZEIT- UND KOSTENVORTEIL

Die Forschungsarbeit der Aachener Wissenschaftler ist ein Beitrag, um mithilfe der ganzheitlichen modellbasierten Systembetrachtung eine gezieltere vibroakustische Gestaltung der E-Autos der Zukunft zu ermöglichen. Messungen werden sicherlich für eine lange Zeit integraler Bestandteil zur Parametrie-

rung und Absicherung von Simulationsmodellen bleiben. Doch der aus der modellbasierten Betrachtung resultierende Zeit- und Kostenvorteil bei der NVH-Auslegung der neuen Antriebstechnologie kann bereits heute dazu beitragen, Hersteller und Zulieferer in die Lage zu versetzen, die E-Autos der Zukunft wohlklingend und für alle ein wenig erschwinglicher zu machen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Wegerhoff, M.; Jacobs, G.; Drichel, P.: Noise, vibration and harshness validation methodology for complex elastic multibody simulation models. With application to an electrified drive train. Journal of Vibration and Control 26 (2), DOI: 10.1177/1077546318800124, 2018
- [2] Van der Giet, M.: Analysis of electromagnetic acoustic noise excitations: A contribution of electrical machines. Dissertation. RWTH Aachen, Institut für Elektrische Maschinen, 2011
- [3] Herold, T.: Simulation des elektrischen Antriebsstrangs als Hilfsmittel für die Synthese und Überprüfung von Algorithmen im Kontext der antriebsbasierten Diagnose. Dissertation. RWTH Aachen, Institut für Elektrische Maschinen, 2015
- [4] Rick, S.; Wegerhoff, M.; Klein, J.; Hameyer, K.; Jacobs, G.; Vorländer, M.: E-Motive NVH-Simulationsmodell. Modellbildung zur NVH Simulation eines E-Motive Antriebsstrangs. Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF 17453 N), 2015
- [5] Wegerhoff, M.: Methodik zur numerischen NVH Analyse eines elektrifizierten PKW Antriebsstrangs. Dissertation. RWTH Aachen, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, 2017
- [6] Gerard, F.; Tournour, M.; El Masri, N.; Cremers, L.; Felice, M.; Selmane, A.: Acoustic transfer vectors for numerical modeling of engine noise. In: Sound and Vibration 36 (7), 2002

- [7] Vanhollenbeke, F.; Helsen, J.; Peeters, J.; Vandepitte, D.; Desmet, W.: Combining multibody and acoustic simulation models for wind turbine gearbox NVH optimisation. Proceedings of ISMA International Conference On Noise And Vibration, 2012
- [8] Drichel, P.; Müller-Giebeler, M.; Jaeger, M.; Jacobs, G.; Vorländer, M.; Hameyer, K.: Multi-domain simulation for the assessment of the NVH-behavior of electric vehicles with special attention to the influence of rotor eccentricity. Dassault Systemes User Conference 2018, Hanau, 2018

DANKE

Die Hauptautoren danken den Mitautoren Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dr. Kay Hameyer und Prof. Dr. rer. nat. Michael Vorländer. Außerdem gilt der Dank aller Autoren der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Mark Nichols (Schaeffler Technologies AG & Co. KG) und der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e.V.

Das IGF-Vorhaben 18764 N Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten für maschinenakustische Untersuchungen an E-Motive-Antrieben im Kontext zur Fahrzeugstruktur der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.



**DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN
VERFÜGBAR UNTER:**

www.emag.springerprofessional.de/atz

ASAP

Als Partner der Automobilindustrie bietet die ASAP Gruppe umfassende Entwicklungsleistungen mit Fokus auf die Mobilitätskonzepte von morgen: E-Mobilität, Autonomes Fahren und Connectivity.

www.asap.de



**READY.
FOR THE
FUTURE.**