

The Power of Silence

Composing BMW's Electric Powertrains

Jakob Bonart, Arthur Hülsmann, Jean-Baptiste Maurice, Gregor Schürmann

<http://dx.doi.org/10.25673/103520>

Abstract

The new BMW electric powertrains meet the highest standards in terms of acoustics. They are designed as a modular system of highly integrated electric drives that combine the electric motor, transmission, and inverter in one housing and it must be possible to integrate them into all vehicle classes. Therefore, modular objectives are derived from vehicle targets, and this paper will present the process of breaking down the acoustic requirements at car level to the electric-drive component.

In addition to the overall vehicle acoustics, which also allow differentiation by vehicle class, the acoustic requirements for the modular electric drive system are described.

The required properties to comply with these requirements at the electric-drive level are explained and detailed using a few examples. This starts with the selection of the type of electric machine and continues with the design of the housing, the design of the rotor, stator and structure dynamics, the transmission design, and the control of the electric machine. The consistent development of acoustic properties results in data-driven production monitoring. Compliance with the quality criteria is also constantly checked during series production, and big data approaches offer opportunities for error detection and corrections.

This development process is presented and explained in more detail using a few examples. Finally, after successful vehicle integration, a comparison with the competitors is presented.

Kurzfassung

Die neuen BMW-Elektroantriebe genügen auch in ihren Akustikeigenschaften höchsten Ansprüchen. Aufgrund ihrer Auslegung als Baukasten von hochintegrierten elektrischen Antrieben, die Elektromaschine, Getriebe und Inverter in einem Gehäuse vereinen, müssen sie in alle Fahrzeugklassen integrierbar sein. Dafür werden aus den Fahrzeugzielen Baukastenziele entwickelt und es wird aufgezeigt, wie daraus die akustischen Anforderungen für den einzelnen Antrieb heruntergebrochen werden.

Neben den Gesamtfahrzeugmaßnahmen, die zusätzlich eine Differenzierung nach Fahrzeugklasse ermöglichen, werden die akustischen Anforderungen an den Elektroantriebsbaukasten beschrieben.

Die für die Einhaltung dieser Anforderungen zu entwickelnden Merkmalen werden näher erklärt und anhand einiger Beispiele vertieft. Das fängt bei der Auswahl des Elekt-

romaschinentyps an und setzt sich über die Konstruktion der Gehäusestruktur, Auslegung der Rotor-, Stator- und Gehäusedynamik, der Getriebeauslegung sowie der Ansteuerung der Elektromaschine fort. Die konsequente Entwicklung der Akustikeigenschaften mündet in einer datengetriebenen Produktionsüberwachung. Die Einhaltung der Qualitätsmerkmale wird auch in der laufenden Serie permanent überprüft und Big-Data-Ansätzen bieten Möglichkeiten für eine Fehlerdetektion und -behebung.

Dieser Entwicklungsprozess wird dargestellt und anhand einiger Beispiele vertieft. Abschließend wird nach erfolgreicher Fahrzeugintegration ein Vergleich mit dem Wettbewerb dargestellt.

1. Vom Gesamtfahrzeug zum elektrischen Antrieb

Die akustische Kulisse innerhalb eines Fahrzeugs ist ein wesentlicher Faktor für das subjektive Qualitätsempfinden. Neben der Einordnung von besonders leisen Fahrzeugen in höherwertige Fahrzeugklassen zeigt sich ebenfalls ein Trend zu leiseren Automobilen im Laufe der Zeit [1]. Dieser Trend wird zudem durch EU-Richtlinien zur Regulierung des Außengeräusches unterstützt. Daher ist eine wettbewerbsfähige und möglichst leise Auslegung des gesamten Fahrzeuges sowie dessen Kernkomponenten essenziell, um hochwertige Fahrzeuge für den Kunden anbieten zu können.

Am Anfang des Auslegungsprozesses ist eine Zielvorgabe für das Gesamtfahrzeugverhalten erforderlich, in diesem Fall für die Antriebsakustik der elektrischen Fahrzeugantriebe, in dieser Veröffentlichung Elektroantriebsakustik genannt. Eine solche Zielvorgabe basiert auf dem aktuellen Stand von Wettbewerbsfahrzeugen, Erwartungen zum zukünftigen Stand solcher Fahrzeuge und einer Unternehmensvorgabe zur Positionierung von BMW-Group-Fahrzeugen im Wettbewerbsumfeld.

1.1 Bewertung der Elektroantriebsakustik im Gesamtfahrzeug und Zielableitung

Bei der Gesamtfahrzeugbewertung der E-Antriebsakustik geht es um ein Maß für die Wahrnehmbarkeit des elektrischen Fahrzeugantriebs für die Insassen. Wesentlich dabei ist, inwiefern die tonalen Geräuschanteile, die vom Antrieb erzeugt werden, aus dem maskierenden Wind-Roll-Geräusch beziehungsweise der Gesamtgeräuschkulisse hervortreten. Dazu wird anhand einer Ausrollmessung, einer Messung eines Drehzahlhochlaufs mit gewünschtem Antriebsmoment und auf Basis der DIN 45681 [2] mit dem Titel „Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen“ eine objektive Größe, die Emergenz, ermittelt (Abbildung 1). Diese Emergenz ist das gesuchte objektive Maß zur Gesamtfahrzeugbewertung der E-Antriebsakustik. Die Höhe der Emergenz wird, abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit, auf eine Stufe einer Wahrnehmbarkeitsabstufung reduziert (Abbildung 2).

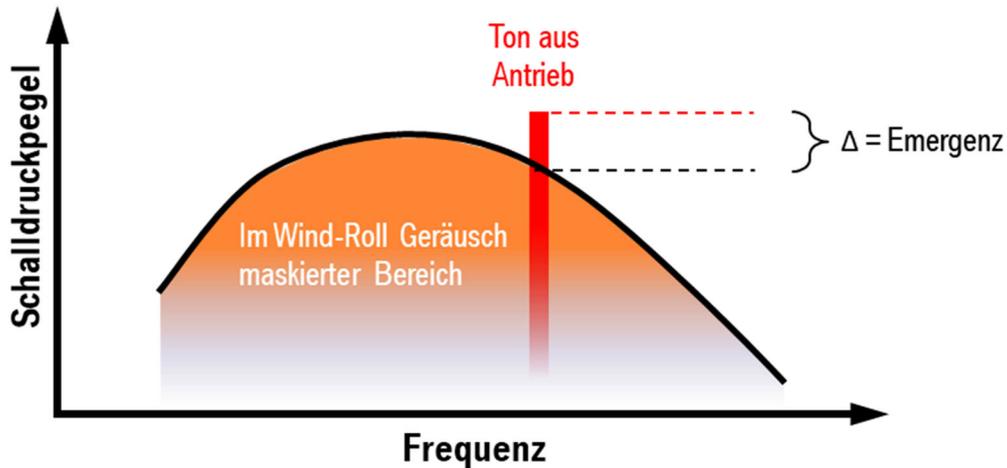


Abbildung 1: Die Emergenz ist ein Maß für die Wahrnehmbarkeit eines tonhaltigen Antriebsgeräusches als Bestandteil der Gesamtgeräuschkulisse

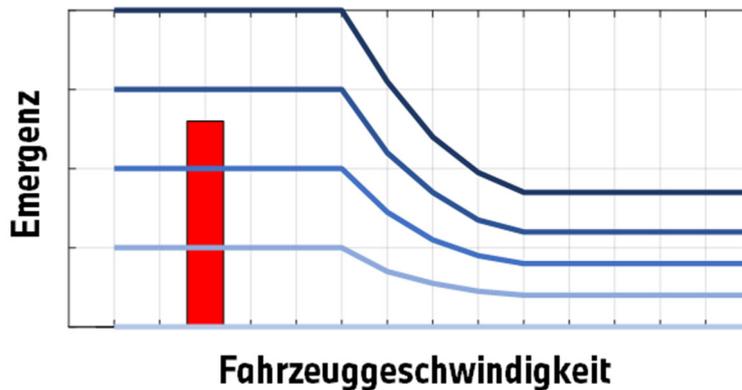


Abbildung 2: Wahrnehmbarkeitsabstufung zur Emergenz in 5 Stufen von stark wahrnehmbar (Dunkelblau) bis nicht wahrnehmbar (Hellblau)

1.2 Wettbewerbsanalyse zur Zielableitung

Für die Ableitung eines Gesamtfahrzeugzielsystems für BEV-Fahrzeuge wurde eine Wettbewerbsanalyse in der Zeit von 2016 bis 2018 durchgeführt, damit eine Positionierung zum Wettbewerb erfolgen kann. Im Rahmen dieser Analyse wurden mehrere Wettbewerbsfahrzeuge anhand der Emergenz-Methode bewertet. Ein Teil dieser Analyse ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Fahrzeuge zu der Zeit über verschiedene Lastfälle hinweg „wahrnehmbar“ bis „stark wahrnehmbar“ bewertet wurden.

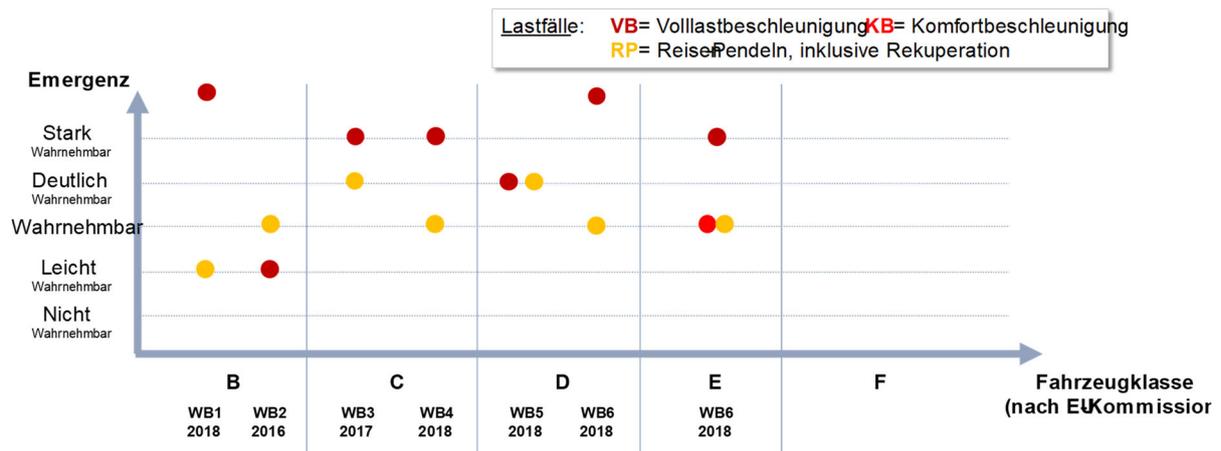


Abbildung 3: Ergebnisse der Wettbewerbsanalyse über ein Zeitfenster von 2016 bis 2018 (WB: Wettbewerbshersteller)

1.3 Die Zielableitung für die Elektroantriebsakustik aus dem Gesamtfahrzeug

Abgeleitet von der Wettbewerbsanalyse und dem Anspruch, den Kunden Premium-Fahrzeuge anzubieten, und unter Berücksichtigung einer zu erwartenden Weiterentwicklung des Wettbewerbsumfeldes in Richtung weniger wahrnehmbar, kommt man zu einer Gesamtfahrzeugverzielung für die Fahrzeuge.

1.4 Die Wirkkette der Elektroantriebsakustik

Abbildung 4 zeigt die Wirkkette der Elektroantriebsakustik, wie die Anregung aus dem Antrieb zu den Ohren der Insassen geleitet wird. Dabei wird unterschieden zwischen dem Körperschall- und dem Luftschallpfad. Auf beiden Pfaden müssen verschiedene Komponenten so ausgelegt und aufeinander abgestimmt werden, dass das akustische Erlebnis für den Insassen der Zielsetzung, wie im letzten Abschnitt beschrieben, entspricht. Das betrifft unter anderem die statischen Kennlinien und die dynamischen Steifigkeiten der verschiedenen Gummilager, sowie die Struktureigenschaften von Antriebsgehäuse, Achsträgern und Karosserie. Auch die Eigenschaften von Hochvolt- und Potentialausgleichsleitungen sind relevant für die Körperschallübertragung. Dabei spielen unter anderem die Bauart, die Länge und der Verlauf der Leitungen eine wesentliche Rolle. Neben der Übertragung ist aber auch die Anregung aus dem Antrieb von großer Bedeutung für das Erlebnis der Insassen.

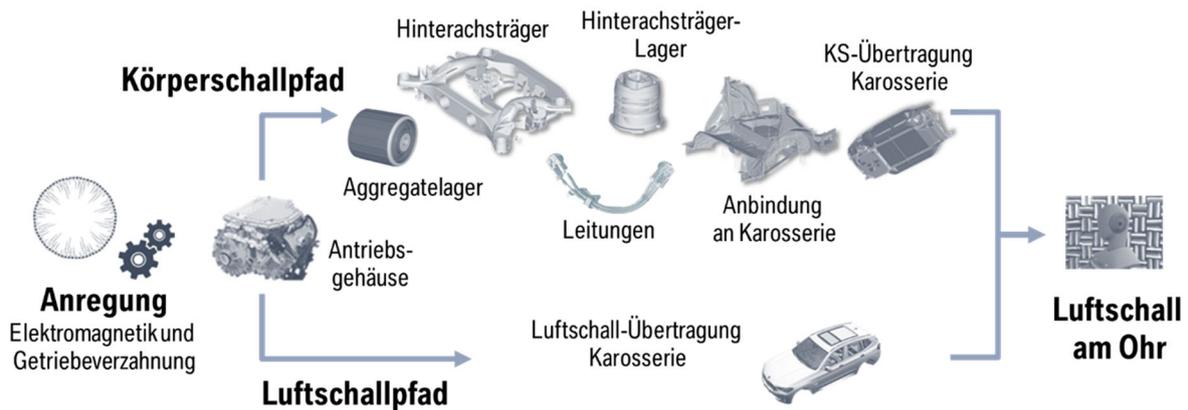


Abbildung 4: Die Wirkkette der Antriebsakustik von elektrischen Fahrzeugantrieben

1.5 Ermittlung von Zielen für die Anregung aus dem Antrieb

Eine Zielvorgabe für die Anregung aus dem Antrieb wurde auf Basis des in Abschnitt 1.3 ermittelten Gesamtfahrzeugzielsystems abgeleitet. Ausgehend von der Emergenz und dem Wind-Roll-Geräusch-Ziel für die entsprechenden Zielfahrzeuge wurde zuerst berechnet, wie hoch die Ordnungspegel aus dem Antrieb maximal im Innenraum sein dürfen. Nach einer Trennung zwischen Körperschall- und Luftschallanteil werden anhand mechanisch-akustischer Übertragungsfunktionen die maximal in die Karosserie einzuleitenden Kräfte ermittelt. Im letzten Schritt werden die dynamischen Eigenschaften der Aggregatlager verwendet, um Spektren von den maximal zulässigen Beschleunigungen am Antriebsgehäuse zu berechnen. Diese Spektren bilden die Vorgaben für die Antriebsentwicklung. Die Anregung für die Übertragung über den Luftschallpfad wird mittels der Luftschallabstrahlung am Antriebsgehäuse beschrieben und ausgelegt.

2. Entwicklung der akustischen Eigenschaften des elektrischen Antriebs

2.1 Das Konzept des hochintegrierten Antriebs

Die elektrischen Antriebe, die bei BMW nun in der 5. Generation entwickelt wurden, zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauweise aus, in der der Elektromotor, das Getriebe und der Inverter in einem gemeinsamen Gehäuse integriert sind (Abbildung 5). Dies reduziert das Gewicht und die Komplexität des Antriebs. So können die hoch gesteckten Ziele aus hoher Leistungsdichte, Akustik, Effizienz und Zuverlässigkeit erreicht werden.

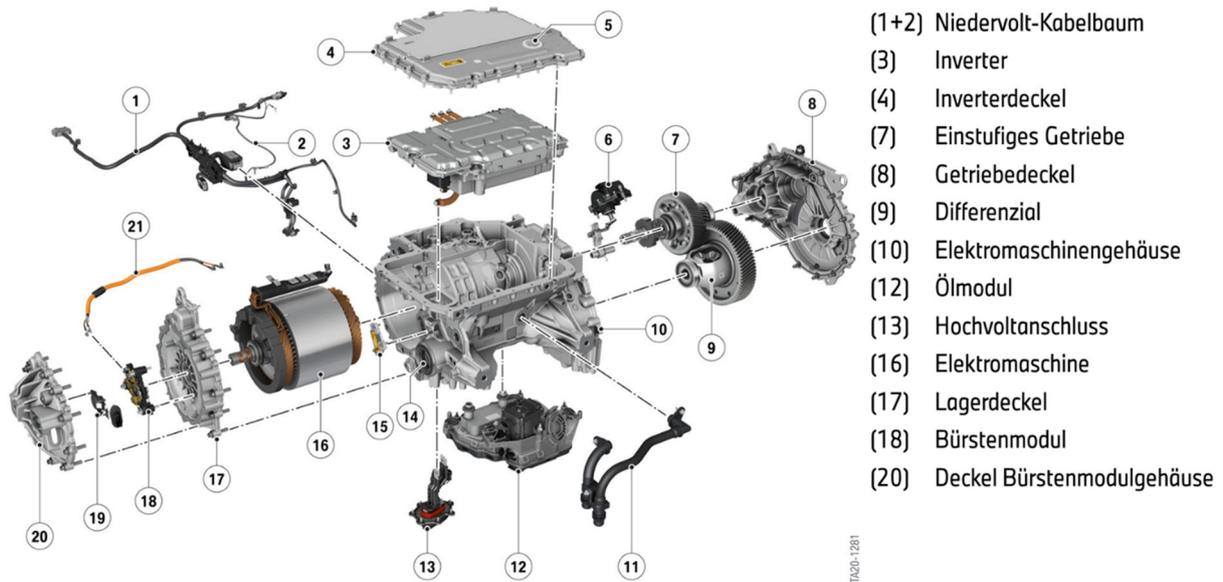


Abbildung 5: Elektromotor, Getriebe und Inverter sind in einem gemeinsamen Gehäuse integriert

2.2 Das Konzept der stromerregten Synchronmaschine

Die Auswahl des Elektromotorkonzepts hat großen Einfluss auf die benötigten Rohstoffe, die Leistungsdichte und die Eigenschaften Akustik, Effizienz und Steuerbarkeit. Die BMW Elektroantriebe setzen dazu auf das Konzept der stromerregten Synchronmaschine (Abbildung 6). Zu den Vorteilen im Vergleich zur permanentenerregten Synchronmaschine zählt, dass sie ohne den Einsatz von Permanentmagneten und damit ohne seltene Erden auskommt. Die im Gegenzug notwendige Stromregelung des Rotorfeldes führt dazu, dass sich der Elektromotor sehr fein regeln lässt, einen großen Bereich mit hoher Effizienz aufweist und hohe Leistungen auch bei hohen Drehzahlen bereitstellen kann. Weiterhin kann er bei Nichtbestromung des Rotors drehmomentfrei geschaltet werden, womit keine Induktionsverluste im Segelbetrieb auftreten.

Als Nachteile stehen der stromerregten Synchronmaschine gegenüber der permanentmagneterregten Synchronmaschine eine aufwendigere Bauform durch die benötigten Rotorwicklungen und das Schleifringmodul, sowie eine geringere elektromagnetische Induktion des Rotors gegenüber.

Durch die Regelbarkeit des Rotorfeldes können die elektromagnetischen Kräfte im Luftspalt gezielt ausgelegt und gestaltet werden. In Kombination mit der sinusförmigen Feldverteilung führt das zu einer geringeren Anregung der elektromagnetischen Kräfte bei höheren Drehmomenten aufgrund der besseren Flussverteilung im Luftspalt. Die elektromagnetischen Kräfte sind für ein gutes Akustikverhalten besser beherrschbar und auslegbar.

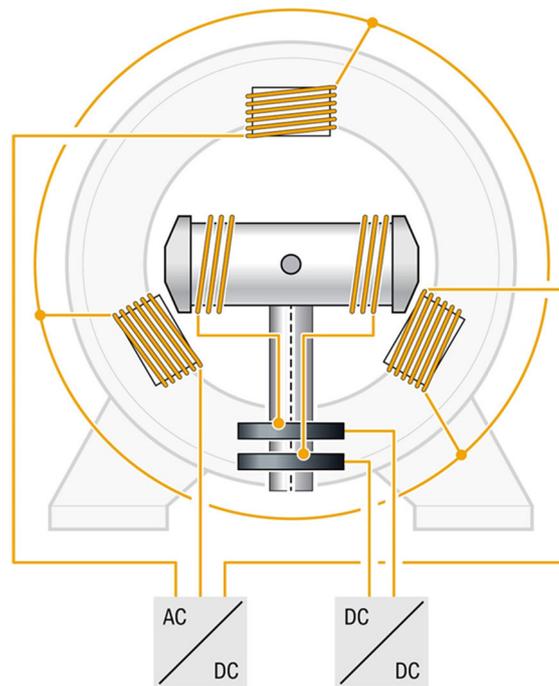


Abbildung 6: Konzeptschaubild einer stromerregten Synchronmaschine

2.3 Die Stellhebel zur Akustikentwicklung

Das Geräuschverhalten kann neben der elektromaschinentypabhängigen Ansteuerung entscheidend über die konstruktiven und fertigungstechnischen Parameter und über die Bestromung beeinflusst werden (Abbildung 7). Die Elektromaschinensteuerung lässt sich über eine Stromglättung und durch Verringerung der Stromoberwellen für geringe elektromagnetische Kraftanregungen optimieren. Darüber hinaus kann die stromstellende Pulsweitenmodulation („PWM-Ansteuerung“) statt mit diskreten Frequenzen über randomisierte Frequenzen gestaltet werden, was das sogenannte „Inverterpiepsen“ nachhaltig reduziert. Dies wird im Folgenden vertiefend beschrieben.

Mit der Festlegung der konstruktiven und fertigungstechnischen Parameter kann das Geräuschverhalten eines elektrischen Antriebes grundlegend beeinflusst und ausgelegt werden. Dazu zählen die Strukturmechanik des Gehäuses, dessen Steifigkeiten und dessen dynamisches Verhalten über Ersatzgrößen auslegbar sind. Als Auslegungsgrößen dienen die dynamischen Anbindungssteifigkeiten an den Wälzlagersitzen (Krafteinleitungspunkte der Elektromaschine und des Getriebes), die dynamischen Anbindungssteifigkeiten an den Tragarmen, an denen die Aggregatlager zum Fahrzeug anbinden und die Übertragungsfunktionen zwischen den Wälzlagersitzen und den Tragarmen. Außerdem wird das Gehäuse simulativ und versuchstechnisch auf eine geringe Luftschallabstrahlung optimiert und bei Bedarf kann die Absorption des abgestrahlten Luftschalls mit einer (Teil-)Kapselung erhöht werden, um die für eine gute Fahrzeugakustik notwendigen Luftschallabstrahlungsziele einzuhalten.



Abbildung 7: Einflussfaktoren auf das Geräuschverhalten eines elektrischen Antriebs

Die Getriebeauslegung lässt sich mit den Verzahnungsparametern gestalten. Ziel ist es, eine gleichmäßige Verdrehsteifigkeit der Zahnradpaarung und eine gleichmäßige Belastung der Zahnflanken unter den relevanten Drehmomenten zu erreichen [3]. Die Makrogeometrie, zu der der Achsabstand, die Breite der Zahnräder, die Zähnezah und das Modul gehören, legt wesentlich die Verdrehsteifigkeit der Zahnradpaarung fest. Mit der Mikrogeometrie kann die Belastung der Zahnflanken beeinflusst werden. Hierzu zählen Modifikationen wie Stirnprofilkorrekturen (Kopf- und Fußrücknahme, Balligkeit) und Flankenlinienkorrekturen (Endrücknahme, Balligkeit). Die vom Drehmoment abhängige Anregung beim Zahneingriff wird auch maßgeblich über die Steifigkeiten bzw. die Verformung der Zahnräder, Wellen und Lagersitze beeinflusst. Sie kann daher gezielt ausgelegt werden, um in bestimmten für den Fahrzeugbetrieb relevanten Lastzuständen minimiert zu werden.

Wichtig für eine geringe Getriebeanregung ist die Koaxialität der Wellen, die über Gehäuse- und Bauteiltoleranzen inklusive der Lagersitze auszulegen ist. Dazu wird eine Toleranzanalyse der Bauteile durchgeführt und die Funktionsmaßkette inklusive aller Lagerspiele simuliert. Dann können Maßnahmen ergriffen werden, z. B. Toleranzen einschränken oder Bemaßungsbezüge ändern.

Die Wellen von Elektromotor und Getriebe sollten auch keine zu hohen Unwuchten aufweisen, da sonst tieffrequente Vibrations- oder Brummphänomene im Fahrzeug zu hören sind, die untypisch für Elektrofahrzeuge sind. Parameter, die die Unwucht von Wellen und Zahnrädern beeinflussen sind die Rundheit, die gezielt einzuschränken ist und das Fertigungskonzept, was großen Einfluss auf die resultierende Unwucht eines gesamten rotierenden Teils haben kann. Die Rotorunwucht ist darüber hinaus von besonderer Wichtigkeit, da sie die Rotordynamik maßgeblich beeinflusst. Das Setzverhalten der Rotorwicklungen bei der stromerregten Synchronmaschine hat ebenfalls direkten Einfluss auf die resultierende Unwucht. Weitere Parameter, mit der die Rotordynamik begrenzt werden kann, ist die Auslegung der Rotorlagerung und die Verbindung der Rotor- und Getriebeeingangswelle.

Die Anregung eines Elektroantriebes besteht neben den elektromagnetischen Kräften und den Verzahnungskräften maßgeblich aus den Wälzlagerkräften, die ebenfalls auf das Gehäuse wirken. Um diese zu minimieren kann das Wälzlagerkonzept, also die Fest-Los-Lagerung und der Einsatz der Wälzlagerarten so ausgelegt werden, dass die Kräfte auf das Gehäuse minimal sind und sich gut in stabilen Strukturen abstützen. Die Auswahl von Wälzlagertyp und die Anregungsoptimierung beinhalten auch die Betrachtung der entstehenden Wälzlagerordnungen, die im günstigen Fall einen großen Ordnungsabstand zu den anderen Anregungsordnungen von Elektromaschine und Getriebe aufweisen, um Schwebungen zu vermeiden.

Im Folgenden werden die Auslegung der Elektromaschinensteuerung und die Optimierung der Strukturmechanik des Gehäuses näher diskutiert.

2.4 Das Randomisierte PWM-Verfahren

Pulsweitenmodulationen (PWM) sind in der gegenwärtigen Regelung elektrischer Maschinen unausweichlich, da diese Verfahren die Konvertierung einer DC-Spannung oder eines DC-Stroms, kommend vom Hochvolt-Speicher, in ein Signal mit beliebiger Amplitude und Frequenz ermöglichen. Dies ist der Hauptbestandteil der Aufgabe der Leistungselektronik.

Stark verbreitet sind PWM-Verfahren, die auf einer Träger-Frequenz basieren, um die gewünschten Schaltmuster zu generieren [4]-[7]. Viele Strategien sind verfügbar, die sich nicht nur in der Ausführung unterscheiden, sondern auch in ihrer Auswirkung auf Eigenschaften wie Effizienz oder Akustik differenzieren. Eine gute Übersicht solcher Verfahren ist in [7] vorgestellt. In dem Beispiel von Abbildung 8 wird ein sinusförmiges Signal auf Basis der Modulation eines kontinuierlichen Signals und einem regelmäßigen Modulationsmuster mit entsprechender Schaltfrequenz des Trägers generiert.

Entscheidend für die Akustik einer E-Maschine ist dann die Frage, ob das ausgewählte Verfahren Geräusche generieren kann, die im Innengeräusch oder sogar im Außengeräusch, zum Beispiel während einer Vorbeifahrt, wahrnehmbar sind. Bei den Standardverfahren mit fester Trägerfrequenz werden tatsächlich tonale Anregungen sowohl im Körperschall als auch im Luftschall generiert, die häufig „Piepsen“ genannt werden. Diese Störgeräusche sind zwar charakteristisch für die Leistungselektronik einer elektrischen Antriebsmaschine, dennoch entsprechen diese nicht dem Anspruch an die akustische Qualität eines BMW-Fahrzeuges.

In Abbildung 9 sind auf der linken Seite die Campbell-Diagramme von Körperschall-Messungen von Messpunkten vor der Aggregate-Lagerung dargestellt. Die sogenannten PWM-Fächer sind klar erkennbar, die sich als drehzahlsynchrone Stränge entwickeln. Diese Anregung pflanzt sich entlang des akustisch-mechanischen Übertragungspfad bis zum Fahrerohr fort, wie in den Messungen eines Fahrzeugs eines Wettbewerbers in den Campbell-Diagrammen des Luftschalls im Innengeräusch auf der rechten Seite von Abbildung 9 ersichtlich.

Durch den Einsatz einer randomisierten Trägerfrequenz in dem PWM-Verfahren kann die Energie der Anregung auf einen größeren Frequenzbereich verteilt werden, um somit akustisch unauffälliger zu werden. Aus der Luftschallbetrachtung von Abbildung 9 ist klar erkenntlich, dass das Rauschen aus der Körperschallmessung ab 55 km/h keine Auffälligkeit im Luftschall in der Fahrgastzelle bewirkt.

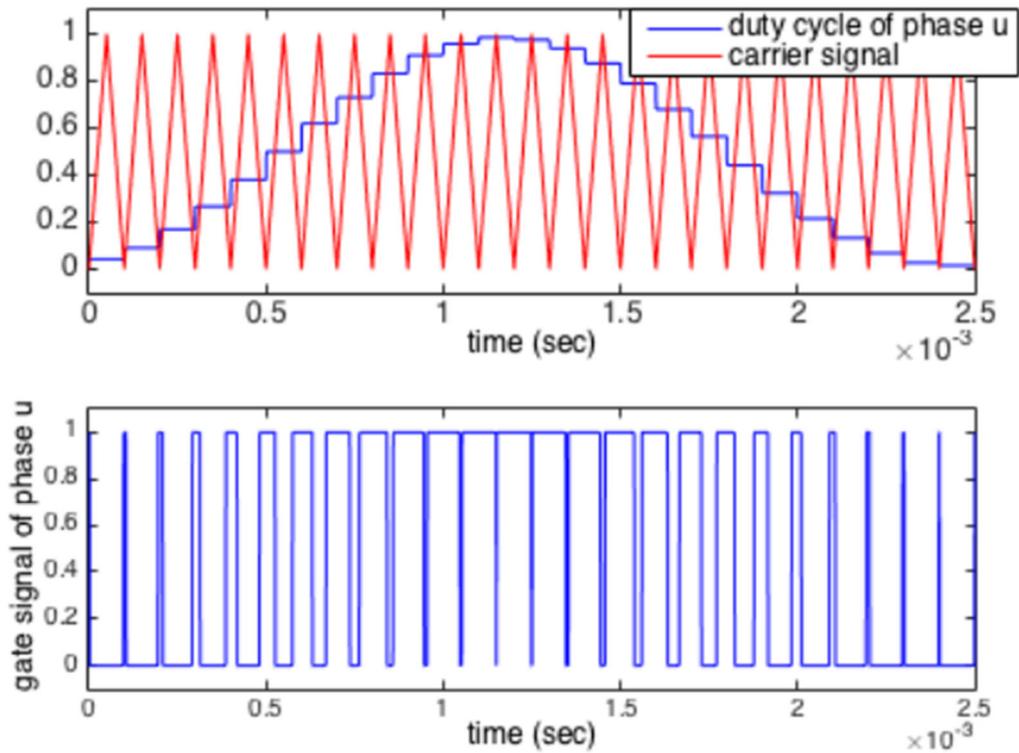


Abbildung 8: Beispiel einer symmetrischen, regelmäßigen Abtastung mit Trägerfrequenz aus [6]

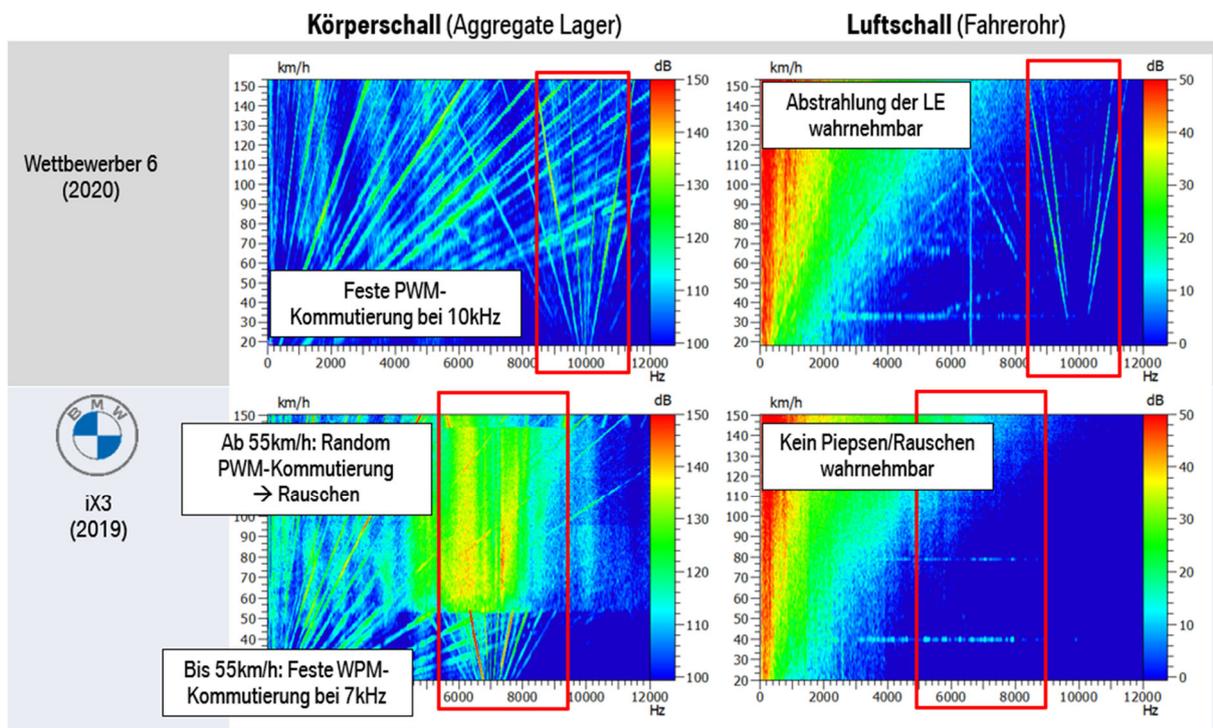


Abbildung 9: Einfluss PWM-Schaltmuster auf Körperschall vor Aggregatlager und Luftschall im Innenraum. Vergleich der direkten Raumzeiger-Modulation RZM (Fahrzeug eines Wettbewerbers) und Kombination von RZM mit Random-PWM (BMW iX3)

Das Verfahren wurde im BMW iX3 erfolgreich erprobt und umgesetzt und auf weitere Fahrzeuge und Antriebe ausgerollt, um den besten Kompromiss zwischen Akustik und Effizienz zu erreichen.

2.5 Optimierung der Gehäusesteifigkeiten und Eigenmoden - Simulationenethoden und Absicherung

Die Erreichung der aus dem Gesamtfahrzeug abgeleiteten Pegel-vor-Lager Ziele werden durch geeignete Subziele im Top-Down Verfahren sichergestellt. Durch frühe Simulationen prototypischer Konstruktionsstände sowie deren Vergleich untereinander kann bereits vor der ersten Versuchsteilen eine Optimierung bezüglich der akustischen Performance durchgeführt werden. Alle Normanregungsquellen (Elektromagnetik, Getriebe, Wälzlager, usw.) werden als frequenzabhängige Kräfte simuliert ($F(\omega)$, Abbildung 10 und entsprechend der Übertragungsfunktionen $H(\omega)$ bis zu den Fahrzeuganbindungspunkten zu einem prognostiziertem Anregungspegel $X(\omega)$ auf das Fahrzeug verarbeitet.

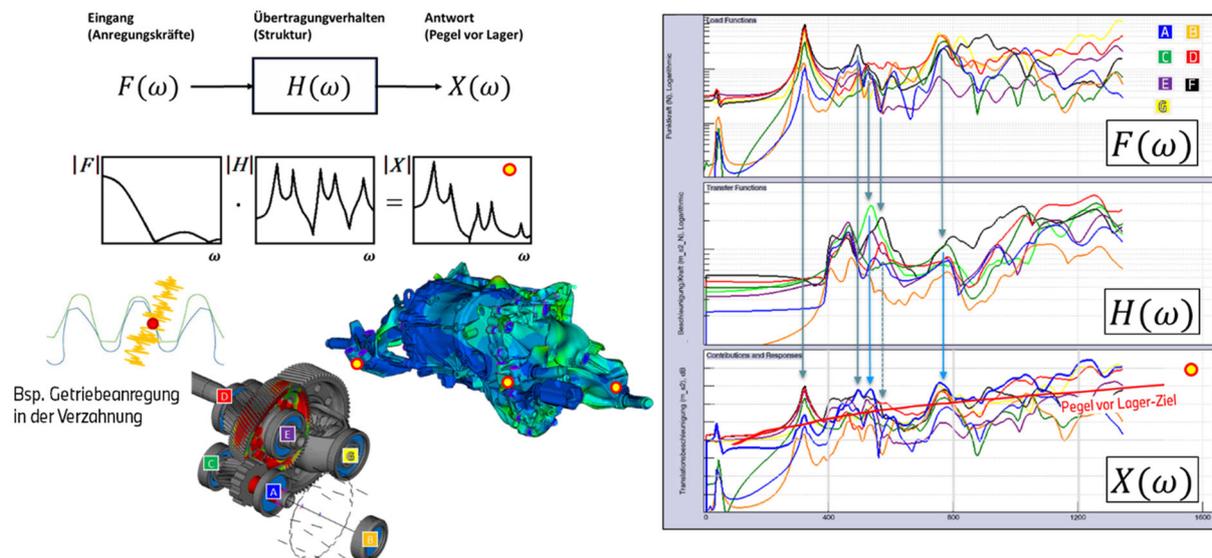


Abbildung 10: Beitrag Strukturdynamik in der Systemanalyse und Verbesserung der Akustikwirkkette

Besonders in frühen Phasen der Entwicklung ohne reale Prototypen werden Überschreitungen des gesetzten Zieles auf die Hauptbeitragsleister zurückgeführt. Diese können die Anregung einer Komponentengruppe selbst sein, wie beispielsweise die radial wirkenden Magnetfeldkräfte oder Getriebeverzahnungsgeräusche. Ebenso können die Zielverfehlungen alleinig aus lokalen oder globalen Strukturschwächen des umgebenden Gehäuses resultieren. Durch das Wissen über die passende Größe zur Behebung der Überschreitung wird eine effiziente und schnelle Lösung erarbeitet.

Nach der simulativen Optimierung der einzelnen Subkomponenten und der globalen Eigenschaften der Antriebseinheit erfolgt die Bestätigung der prognostizierten Performance durch Prüfstandsversuche.

Neben der obligatorischen Vermessung des jeweiligen Prototypenstandes bezüglich der gesetzten Zielwerte an einem Akustikmessprüfstand, wird die Entstehungskette

der Geräusche analog der Simulation aufgenommen. Dadurch können Probleme, welche nicht bereits durch die simulative Optimierung gelöst werden konnten, genauer analysiert und bearbeitet werden. Konkret werden durch eine experimentelle Modalanalyse die Eigenmoden und Übertragungsfunktionen des Antriebs vermessen, siehe Abbildung 11. Die Untersuchungen erfassen sowohl das Innenleben (Radsatz, Rotor, Wälzlager), die über Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden, als auch die Schwingungen der Gehäusestruktur, die über Laservibrometrie erfasst werden. Diese Daten ermöglichen nicht nur die Bestätigung der simulativ ermittelten Eigenschaften in der frühen Phase, sondern auch weitere Einsicht für die Problemlösung in einer späteren Phase.

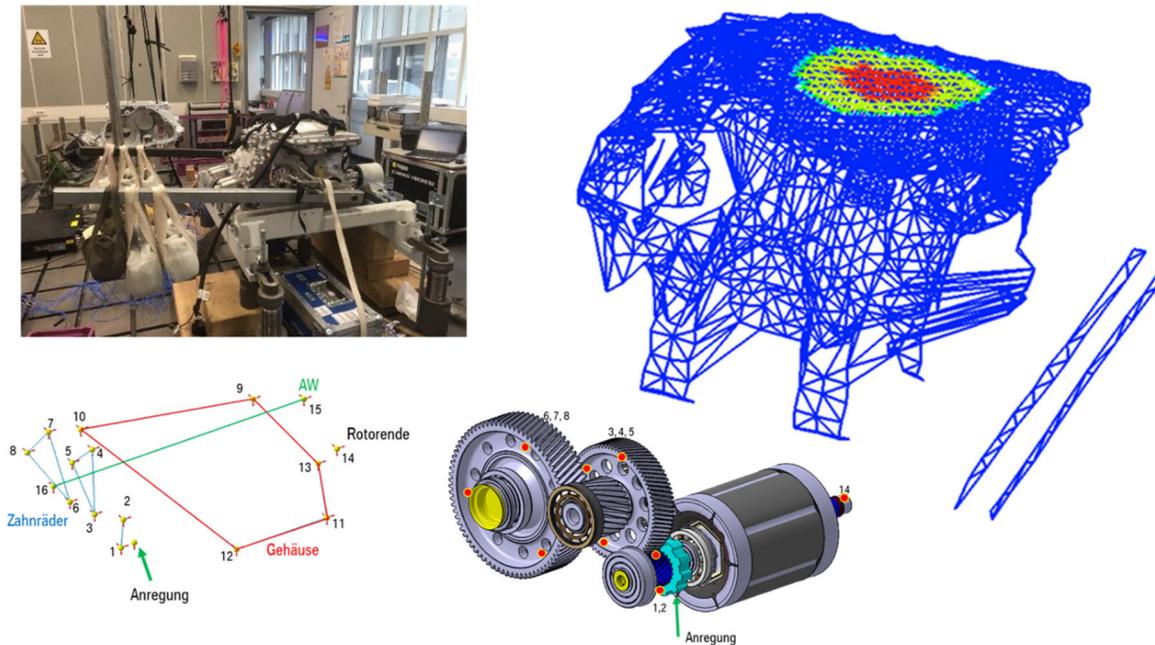


Abbildung 11: Aufbau der experimentellen Modalanalyse am Anfang der Entwicklung der elektrischen Antriebe der 5. Generation

2.6 Fertigungsdatenanalyse und Fehlerdetektion am End-of-Line-Prüfstand

Neben der robusten Fahrzeugauslegung und der systematischen Unterdrückung von hohen Pegelanregungen des Elektroantriebes können vereinzelt produktionsbedingte Störanregungen auftreten. Daher bedarf es einer kompetenten End-of-Line-Prüfung, um fehlerbedingte Akustikprobleme zu identifizieren und auszusortieren [8]-[13]. Durch die eigene Fertigung aller zentralen Komponenten (Rotor, Stator, Getriebe und Zentralgehäuse) können die gewonnenen akustischen Fingerabdrücke mit den zugrundeliegenden Produktionsdaten korreliert werden [12]. Im Falle eines identifizierten Fehlers kann auf den verursachenden Produktionsschritt zurückgeschlossen, weitere betroffene Bauteile vor Fertigstellung der Elektroantriebe identifiziert und eventuell grenzwertige Antriebe gesondert überprüft werden, Abbildung 12.

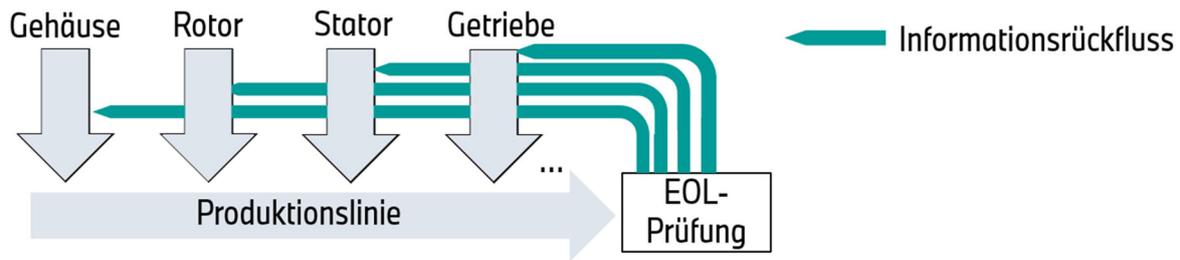


Abbildung 12: Aufbau der Produktionslinie, sowie Datenrückflüsse auf Basis von EoL Körperschallmessungen

Ein Beispiel akustisch hochkritischer Produktionsfehler stellen ungewollte Welligkeiten auf den Verzahnungsflanken eines Getriebes dar [11]. Diese sind nicht auf systematische Einstellungen der Produktionsmaschinen zurückzuführen und bilden daher die ideale Basis, um die EoL-Klassifikation von guten und schlechten Maschinen zu testen. Darüber hinaus ist die atypische Vibrationssignatur eine Herausforderung für die automatisierte Fehlerbenennung. Die Lösung hierfür stellen Koinzidenzen zwischen der primären Anomalie und sekundären Begleiterscheinungen dar [8]-[9].

Die EoL-Prüfung stellt erhöhte Pegel fest und suggeriert, dass eine Zahnflanke auf der Zwischenwelle mehrerer Aggregate eine 20-fach periodische Welligkeit pro Umdrehung aufweist. Die zusätzliche Symmetrie bezüglich einer Wellenrotation erzeugt einen Drehwegfehler entsprechend der Welligkeitsamplitude. Die hieraus resultierenden Pegel übersteigen die normale Getriebeverzahnungsordnung teilweise um mehr als 10dB, Abbildung 13. Durch die akustische Bewertung der schlechtesten aufgetretenen Maschinen in den betroffenen Fahrzeugen ist die Relevanz bestätigt. Somit kann durch einen erstmal klein erscheinenden Produktionsfehler (unterhalb $1\mu\text{m}$ Fehleramplitude auf der Zahnflanke) eine relevante akustische Anregung entstehen. Diese kann nicht systematisch in einem vorangegangenen Entwicklungsprozess unterbunden werden. Ein akustisch anspruchsvolles Fahrzeug benötigt somit neben dem Entwicklungsprozess ebenfalls eine hohe Fertigungs- und Produktionsgüte, sowohl in den Prozessen als auch in den zugehörigen Prüfschritten.

Um diese Güte weiter zu verfeinern und systematisch zu verbessern ist neben der reinen Prüfung ein Wissensgewinn über die Fehlerursache notwendig. In diesem Fall kann der Fehler auf einen einzelnen Produktionsschritt der Getriebewellen zurückgeführt werden. Während dem Schleifen der Getrieberitzel im Honprozess werden Vibrationen der Honmaschine über die Werkzeugspindel auf das Werkstück aufgeprägt, siehe Abbildung 14. Um eine quantitative Beurteilung zu ermöglichen, werden die Vibrationen in diesem Prozess über einen Beschleunigungsaufnehmer am Honring erfasst.

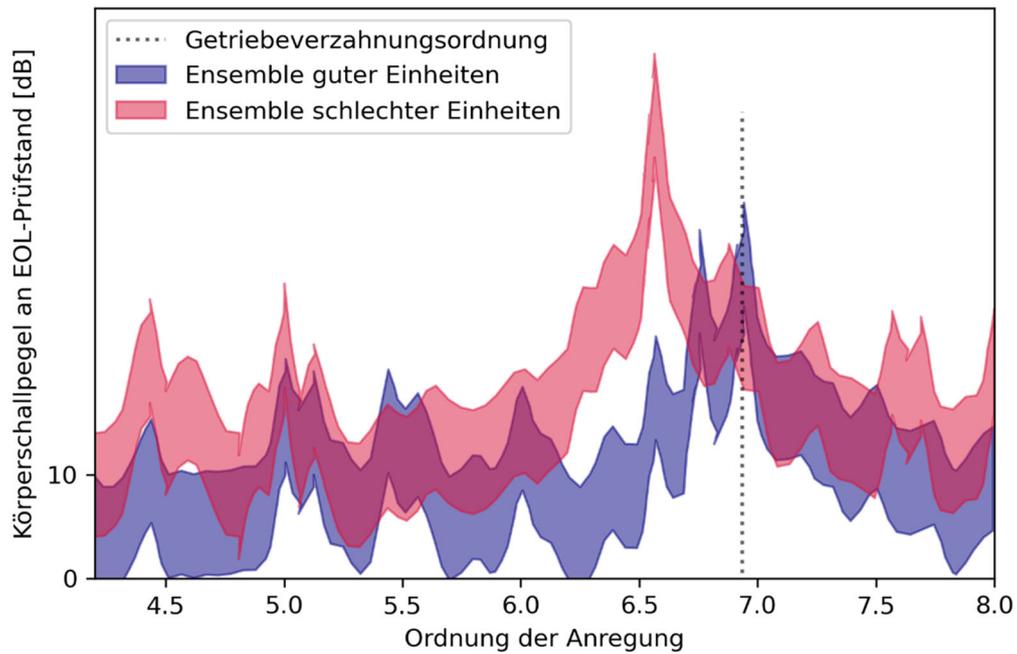


Abbildung 13: Auswirkung einer welligen Verzahnungsoberfläche im Vergleich zu einem Ensemble akustisch guter Maschinen. Als Referenz ist die normale Zahneingriffsordnung notiert

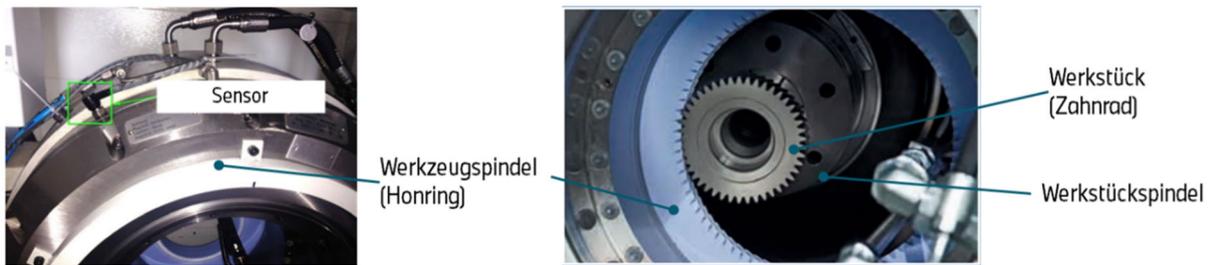


Abbildung 14: Schwingungsüberwachung bei dem Honprozess

Die Korrelation von EoL-Werten zu Vibrationsmessdaten während des Honvorgangs der Wellen ist hochsignifikant (siehe Abbildung 15a). Durch diese Vibrationsmessdaten werden im Zulauf befindliche Komponenten bereits vor dem Verbau in eine Maschine klassifiziert und im Zweifel nicht verbaut. Die weitere Rückführung eines als hochrelevant eingestuften Parameters mit Vermessungen der Wellen im Feinmessraum erlaubt eine Generalisierung der aufgetretenen Honmessdaten und EoL-Pegel zu weiteren Topologievarianten, ohne dass hierfür fehlerhafte Antriebseinheiten aufgebaut werden müssen. Dieser Schritt ist essenziell, da Vibrationen während dem Honen der Wellen spezifisch für eine Honmaschine sind.

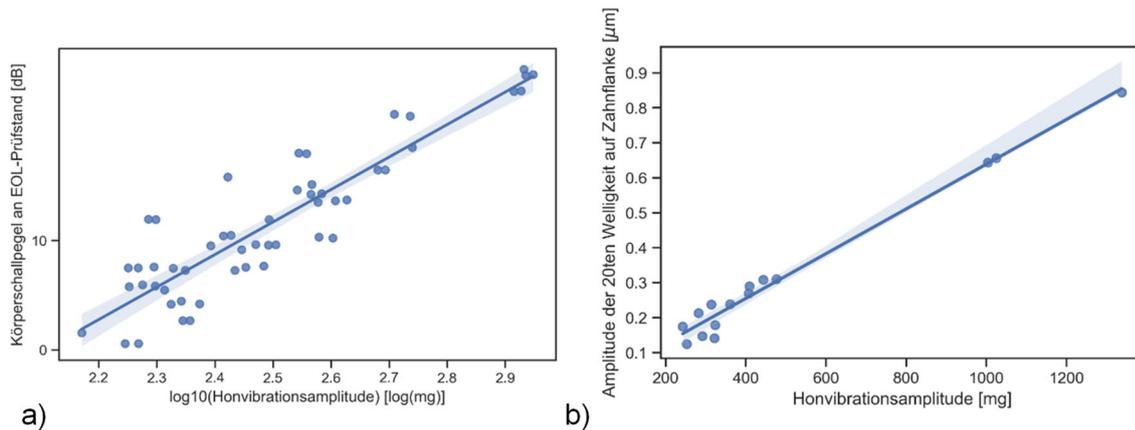


Abbildung 15: a) Korrelation von Honvibrationen zu EOL-Pegeldaten. b) Korrelation zwischen Welligkeitsamplitude auf Zahnflanken und der Vibrationsamplitude der Honmaschine bei einer Frequenz

3. Vergleich zwischen Wettbewerb und BMW-Fahrzeugen

Nachdem in Abschnitt 1.2 beschrieben wurde, wie der Stand des Wettbewerbsumfeldes im Zeitfenster von 2016 bis 2018 bewertet wurde, ist eine Bewertung der aktuellen Fahrzeuge nicht nur im Vergleich zu diesen Wettbewerbsfahrzeugen interessant, aber vor Allem im Vergleich zum aktuellen Wettbewerb notwendig. Ergebnisse aus einer aktuellen Wettbewerbsanalyse für das Zeitfenster von 2021 bis 2023 sind in Abbildung 16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Wettbewerb sich, wie in Abschnitt 1.3 vermutet, tatsächlich in Richtung weniger wahrnehmbar weiterentwickelt hat. Es sind im Rahmen dieser Analyse auch Emergenzstufen im Bereich „Leicht wahrnehmbar“ ermittelt worden.

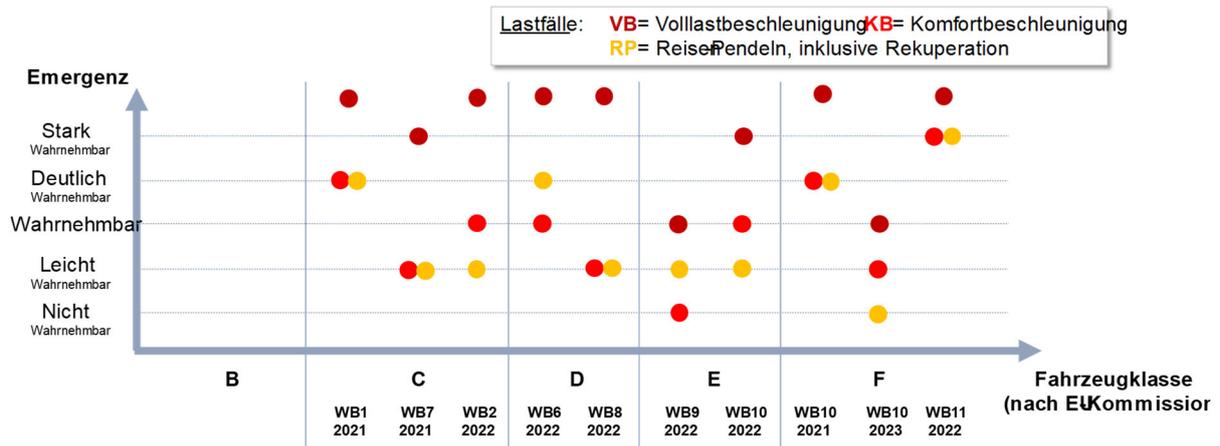


Abbildung 16: Emergenzbewertungen im Rahmen einer aktuellen Wettbewerbsanalyse über ein Zeitfenster von 2021 bis 2023 (WB: Wettbewerbshersteller)

In Abbildung 17 sind die Emergenzbewertungen einiger aktuellen BMW-Serienfahrzeugen mit Antrieben der 5. Generation aufgenommen. Der Vergleich zwischen Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigt, dass BMW im Wettbewerbsumfeld dem Premium-Anspruch gerecht wird.

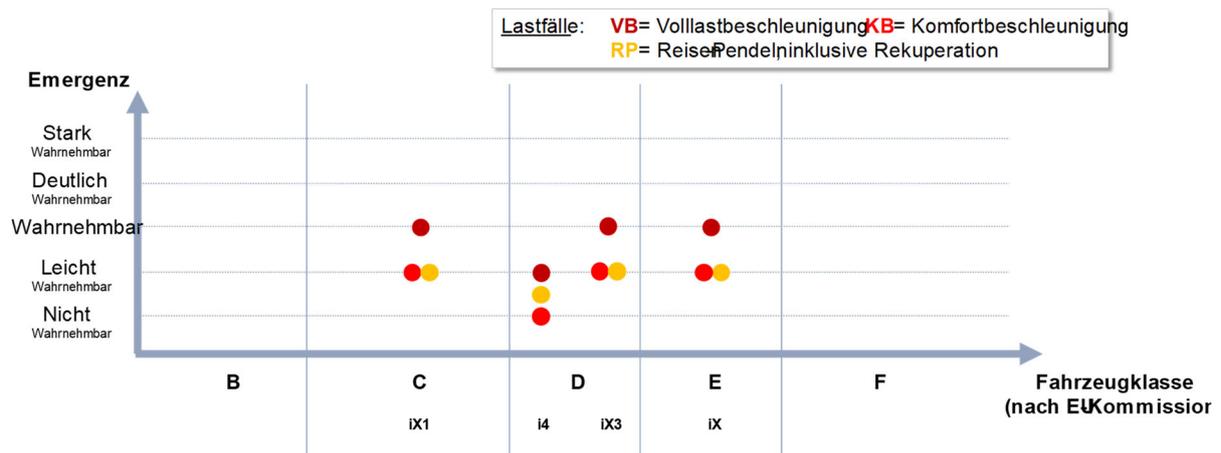


Abbildung 17: Emergenzbewertungen einiger aktuellen BMW-Serienfahrzeugen mit Antrieben der 5. Generation

4. Ausblick

In diesem Paper wird der Entwicklungsprozess der Eigenschaft Akustik von der Zielableitung auf Gesamtfahrzeugebene bis zur elektrischen Antriebsmaschine erläutert, sowie die Auslegungsthemen, die bei der Entwicklung solcher Antriebe bei der BMW Group im Fokus stehen, dargestellt. Diese Vorgehensweise wurde bereits im Rahmen der Entwicklung der 5. Generation der elektrischen Antriebsmaschinen, die gerade weltweit in unterschiedlichen Derivaten in Serie gebracht wird, eingeführt und angewendet.

Im Hinblick auf den stetig steigenden Druck bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen die Reichweite zu erhöhen, liegt der Fokus bei der Entwicklung elektrischer Antriebsmaschinen maßgeblich in den Bereichen Effizienz und Gewicht. Somit gestaltet sich der Entwurfskorridor für die Eigenschaft Akustik in elektrischen Antriebsmaschinen der Zukunft als große Herausforderung. Um den Wettbewerb weiterhin einen Schritt voraus zu sein und den Kunden akustisch anspruchsvolle Antriebe anbieten zu können, wird bei der BMW Group kontinuierlich an der weiteren Verbesserung des vorgestellten Auslegungsprozesses gearbeitet.

5. Literatur

- [1] Knoefel Bjoern, „Potential und Grenzen der akustischen EOL-Fahrzeug-Korrelation am Beispiel eines Pkw-Getriebes unter Anwendung verschiedener Methoden der deskriptiven Statistik“. Dissertation. TU Chemnitz, 2020.
- [2] DIN 45681, "Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen“, Berlin, Deutschland, Beuth Verlag GmbH, März 2005.
- [3] Heider, M. K., „Schwingungsverhalten von Zahnradgetrieben“, Dissertation. Technische Universität München, 2012.
- [4] Aktaibi, M. A. Rahman, A. Razali, “A critical review of Modulation Techniques”, NECEC, 2010.
- [5] Edison Roberto C., Euzeli Cipriano, Cursino Jacobina, “Pulsewidth Modulation Strategies – Nonsinusoidal Carrier-based PWM and Space Vector Modulation Techniques”, Industrial Electronics Magazine, 2011.
- [6] Hava, A.M., “Carrier Based PWM-VSI Drives in the Overmodulation Region”, PhD thesis, University of Wisconsin, Madison, USA, 1998.
- [7] Birda, D. Athina, “Evaluation of various Pulse Width Modulation strategies for the automotive sector”, Master thesis, Technical University of Munich, 2015.
- [8] Bonart Jakob, Hümmer Phillip, Drossel Welf-Guntram, „Enhancing End-of-Line Defect Classifications and Evaluating Early Testability for Inline Test Stands Using NVH Measurements“. In: EDPC 2021, Nov. 2021.
- [9] Bonart Jakob u. a., „Identification of anomalies in highly-integrated electric drives by secondary excitation mechanisms“. In: IEEE SDEMPED 2021, Aug. 2021.
- [10] Bischof Thomas, „Root Cause Analysis of Acoustically Suspicious Transmissions During EOL Testing“. In: 7th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, Juni 2012.
- [11] Kimme Simon, „Simulation des Wälzschleifens und dessen Einfluss auf die Flankentopografie und Verzahnungstechnik“. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, 2019.
- [12] Knappe Jonas, „Prozessorientierte Ableitung akustischer Richtwerte für die Getriebeentwicklung anschließende Klassifizierung der Geräusche“. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, 2022.
- [13] Schwanbeck Johannes, „Entwicklung einer End-of-Line Körperschallprüfung für elektrische Antriebseinheiten“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2020.
- [14] Eirich J, Koutroulis G, Mutlu B, Jackle D, Kern R, Schreck T, Bernard J. ManEx: The Visual Analysis of Measurements for the Assessment of Errors in Electrical Engines. IEEE Comput Graph Appl. 2022.