Methoden für die akustische Analyse und Bewertung von E-Achs-Getrieben

Johannes Knieper[1], Johannes Blickensdorff[2]

[1] *Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 91074 Herzogenaurach (Germany), E-Mail: johannes.knieper@schaeffler.com*

[2] *Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 91074 Herzogenaurach (Germany), E-Mail: blickjha@schaeffler.com*

Einleitung

Für die Bewertung der akustischen Performance eines integrierten elektrischen Antriebs müssen je nach Produkt- und Kundenanforderung individuell anpassbare aber auch ebenso robuste NVH-Metriken im Entwicklungsprozess angewandt werden. Zur Erreichung der akustischen Ziele des Gesamtsystems steht das Zusammenspiel von Leistungselektronik, E-Maschine (EM) und Getriebe im Fokus. Zusätzlich sollen wahrnehmungskritische lokale Resonanzüberhöhungen sicher erkannt werden.

Im Unterschied zu einer subjektiven Bewertung in einem nahezu serienreifen Versuchsträger besteht die Herausforderung im Entwicklungsprozess darin, bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt belastbare Aussagen zum Geräuschverhalten eines komplexen Teilsystems wie einem elektrischen Antrieb (E-Achse) für ein Fahrzeug machen zu können.

Der nachfolgende Beitrag zeigt anhand eines Getriebes als Produktbeispiel aus der E-Mobilität die grundsätzliche Herangehensweise im industriellen NVH Design- und Validierungsprozess und stellt diesbezüglich einige bewährte Basiskriterien und Werkzeuge für die akustische Analyse und Bewertung auf Basis von Versuchsdaten vor.

Akustische Analysetiefe im Entwicklungsprozess

Akustische Basiskriterien sollen robuste Aussagen liefern und sowohl bei Simulations- als auch Versuchsergebnissen nahtlose Anwendbarkeit garantieren. Sie müssen zeitnah mit Kunden in Lastenheften abstimmbar und in End of Line Umgebungen (EoL) implementierbar sein.

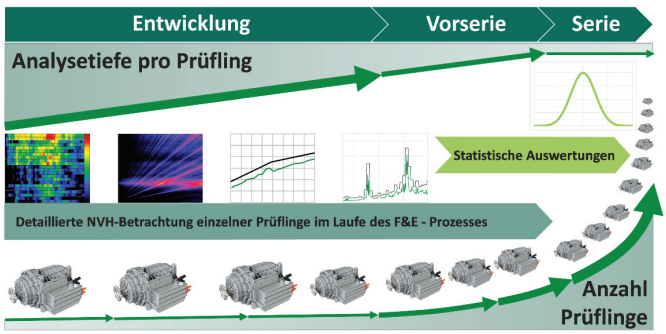

Abbildung 1: Analyseumfänge im Versuch und Datenaufkommen für Prototypen unterschiedlicher Baustufen nehmen im Projektverlauf ab; die Anzahl der zu bewertenden Prüflinge steigt im Gegensatz zur Analysetiefe in Richtung Serienfertigung deutlich an

Die genannten Anforderungen implizieren eine Reduktion der Komplexität (Abbildung 1): weg von einer einzigen umfassenden Metrik, hin zu einer Reihe von akustischen Basiskriterien, die modular anwendbar sind und eine interdisziplinäre und konzernweite Kommunikation ermöglichen.

Datenbasis für die Bewertung der akustischen Performance

Mit den erhöhten akustischen Anforderungen an moderne E-Fahrzeuge sind Entwicklungsprüfstände für den Antriebsstrang stetig erweitert worden. So sind nicht nur zusätzliche Betriebszustände wie Rekuperation (Abbildung 2), sondern auch wesentlich höhere Drehzahlbereiche als bei klassischen Verbrennern (VKMs) zu bewerten. Der Einsatz von Getrieben in E-Achsen ermöglicht bei gleicher Leistungsklasse eine kompakte und gewichtsoptimierte Bauweise.

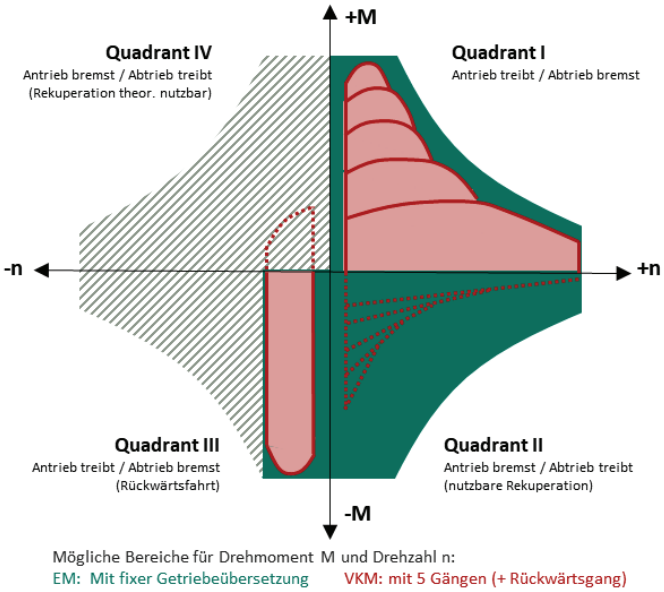

Abbildung 2: Vier Quadranten für Getriebemessungen im Vergleich (VKM vs. EM), Quelle: [1]

Bei Getriebemessungen werden exponentielle Drehzahlrampen in einem Bereich bis ca. +/- 25000 U/min verwendet. Antriebsseitige Drehmomente liegen in Abhängigkeit vom Wirkungsgradkennfeld der im Prüfstand verbauten E-Maschine in einen Bereich bis +/- 400 Nm (Abbildung 3).

Neben konstanten Randbedingungen, wie geringen externen Störeinflüssen von Luft- und Körperschall, schwingarmer Lagerung, aktiver Kühlung und einer insgesamt hohen Wiederhol- und Reproduzierbarkeitsqualität (R&R), sind moderne Getriebeprüfstände flexibel und für die jeweils zu prüfenden Antriebstopologien kurzfristig konfigurierbar. Sowohl Vorder- und Hinterachsgetriebe als auch entsprechende koaxial oder achsparallele Topologien müssen im Entwicklungsprozess dynamisch vermessen

werden, um akustische Anforderungen an das Produkt sicherzustellen (Abbildung 4) [1].

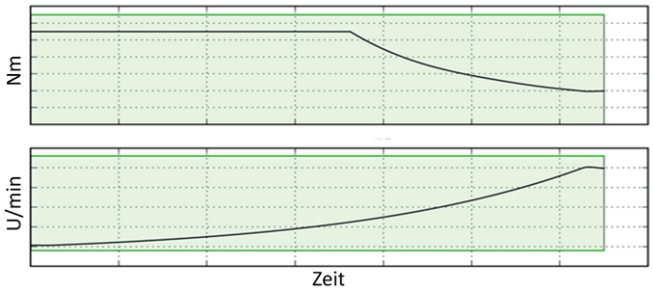

Abbildung 3: Prüfprofile für Getriebemessungen; Drehmomente nehmen mit steigenden Drehzahlen aufgrund des Wirkungsgradkennfelds der im Prüfstand verbauten E-maschinen kontinuierlich ab; exponentielle Drehzahl-rampen

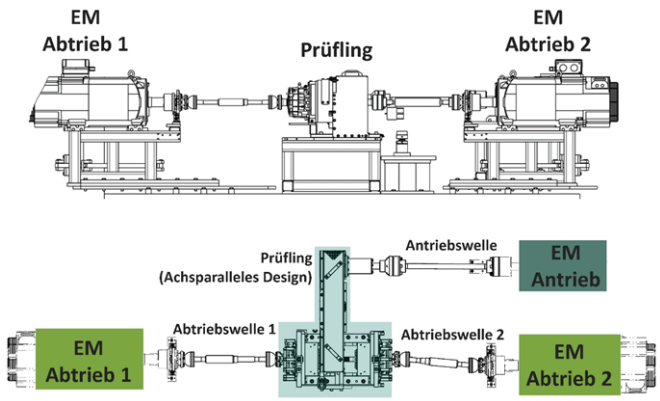

Abbildung 4: Beispiel für einen Getriebeprüfstand in Achsparallel-Anordnung; Seiten- und Draufsicht

Die eingangs beschriebene hohe Analysetiefe zeigt sich auch anhand der erfassten Datenmenge aller zu bewertenden Mess- und Referenzgrößen. Sowohl dynamische Drehmomente und Drehzahlen aller Wellen, triaxiale Beschleunigungen, Schnittkräfte an Gehäusegrenzen und weitere Messgrößen (Abbildung 5) werden mit mittleren bis hohen Abtastraten von üblicherweise 48 kHz erfasst, bei transienten Phänomenen kommen bis 100 kHz zur Anwendung.

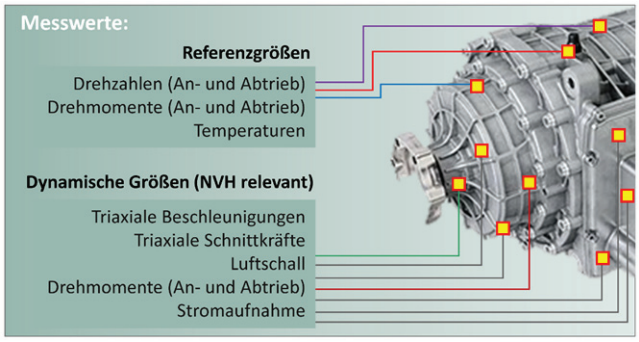

Abbildung 5: Analysen des NVH-Verhaltens setzen die zeitsynchrone Erfassung aller Mess- und Referenzgrößen mit hoher zeitlicher Auflösung voraus

Werkzeuge für die akustische Getriebe-bewertung

In den folgenden Abschnitten wird eine Auswahl von industriell eingesetzten Werkzeugen zur Bewertung der akustischen Perfomance von E-Achs-Getrieben für alle Phasen der Produktentwicklung und für die Serien-anwendung vorgestellt.

Werkzeug 1: Campbell-Diagramm (3D)

Ein wichtiges Werkzeug für die Akustikentwicklung ist das Campbell-Diagramm (Abbildung 6), das aufgrund seiner hohen Informationsdichte in allen Entwicklungsphasen angewendet wird.

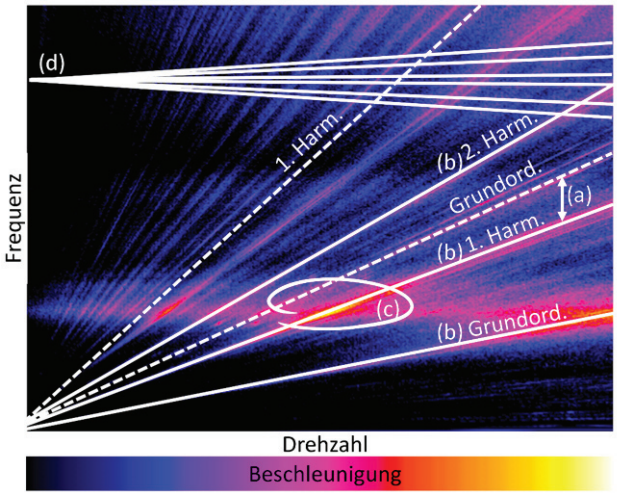

Abbildung 6: Campbell-Diagramm: (a) Risikobewertung Schwebungen, (b) Amplitudenverhältnisse von Grundord-nungen zu Harmonischen, (c) potenziell kritische Resonanzüberhöhungen durch Überlagerung von Getriebe-ordnungen mit Resonanzen, (d) Ordnungen der Leistungs-elektronik

Die Pegelverhältnisse von Ordnungen lassen sich im Campbell-Diagramm bewerten. In der Getriebeauslegung werden die Nennordnungen der Getriebestufen mit definiertem Ordnungsabstand ausgelegt, was das Risiko einer Schwebung aufgrund von zwei dicht benachbarten Zahneingriffsfrequenzen reduziert. Die Ausprägung der einzelnen Ordnungen an konkreten Messstellen, sowie der Amplitudenabfall zu deren Harmonischen kann durch die Messungen quantifiziert werden. Dabei ist das Verhältnis von dominanten zu tonal wahrnehmbaren Nebenordnungen zu bewerten. Wenn sich Resonanzen mit Getriebeordnungen überlagern, treten lokale Resonanzüberhöhungen auf. Bei der Analyse dieser potenziell kritischen Betriebszustände erfolgt ein Abgleich mit Resonanzen aus der Prüfumgebung und strukturdynamischen Eigenfrequenzen des Prüflings. Validierte Simulationsmodelle und Modalanalysen dienen hierbei als Basis für die Bewertung. Potenziell kritische Resonanzüberhöhungen treten auch auf, wenn Ordnungen der Leistungselektronik, welche durch einen konstanten Frequenzversatz im Spektrum charakterisiert sind, mit Resonanzen oder Getriebeordnungen wechselwirken. Dies wird ebenfalls in der Gesamtauslegung von E-Achsen berücksichtigt.

Im Entwicklungsprozess findet eine Bewertung der genannten dominanten Ordnungen und Überlagerungen in Bezug auf die Relevanz im Fahrzeug statt, was zum Beispiel bei der weiteren Verzahnungsauslegung beachtet wird.

Werkzeug 2: Ordnungsschnitt (2D)

Ordnungsschnitte sind ein wichtiges Werkzeug für die Bewertung des Getriebeheulens in allen Entwicklungsphasen und in der Serienanwendung.

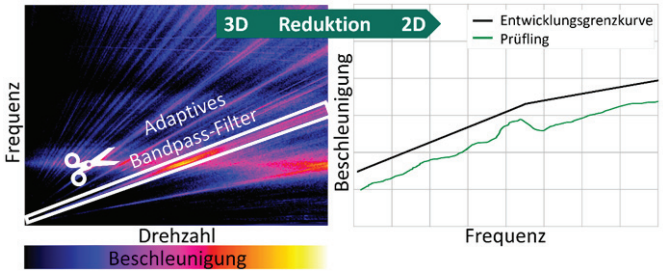

Abbildung 7: Campbell-Diagramm wird auf einen zweidimensionalen Ordnungsschnitt reduziert, um das charakteristische Getriebeheulen gegen eine Entwicklungsgrenzkurve zu bewerten

Ein Ordnungsschnitt entsteht durch die adaptive Bandpassfilterung einer Ordnung (Abbildung 7). Die Wahl der drehzahlabhängigen Filterbandbreite bestimmt den Amplitudenverlauf des zweidimensionalen Ordnungsschnitts. Im Gegensatz zu Stirnradstufen (fehlerfreie Bauteile vorausgesetzt) treten bei Planetenstufen systembedingte Seitenbänder aufgrund des Planetendurchlaufs auf. In Abhängigkeit von der Auslegung der Planetengetriebe und dem Messpunkt können sich die spektralen Seitenbänder, beispielsweise bei sequentiellem Zahneingriff und äquidistant verteilten Planeten, unterschiedlich ausprägen [2]. Auf Basis dieses Wissens erfolgt die Wahl der Ordnungsschnittbreite.

Bei einer Analyse der Ordnungsschnitte müssen analog zur Bewertung der kritischen Pegelüberhöhungen aus Werkzeug 1 die Eigenschaften der Prüfumgebung berücksichtigt werden.

Getriebeheulen als charakteristische Eigenschaft wird anhand des Ordnungsschnitts gegen Entwicklungs- oder Seriengrenzkurven an Referenzmesspunkten bewertet. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist die bestehende Korrelation des Prüfstandes zum Kunden. Die Übertragung der Anregungen des Getriebes in den Fahrzeuginnenraum erfolgt primär auf indirektem Weg durch Körperschall. In Abhängigkeit von der Transferpfad-Charakteristik des Fahrzeugs werden Grundordnungen und deren Harmonische frequenzabhängig gedämpft, was bei der Definition der Grenzkurven zu berücksichtigen ist.

Werkzeug 3: Ordnungsspektrum (2D)

Durch Projektion des dreidimensionalen Ordnungsspektrums in die Ordnungsebene mit Reduktion durch Maximalwertbildung oder Mittelung entsteht ein zweidimensionales Ordnungsspektrum (Abbildung 8). Die Auswahl eines fahrzeugrelevanten Drehzahlbereichs ist maßgeblich für die Aussagekraft der Ergebnisse, da dieser die Amplituden des Ordnungsspektrums bestimmt.

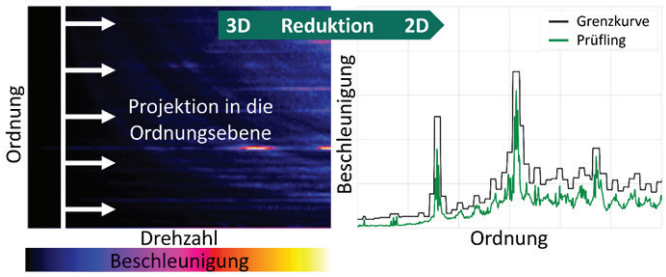

Abbildung 8: Dreidimensionales Ordnungsspektrum wird in die Ordnungsebene projiziert, um einen weiten Ordnungsbereich zu überwachen (Ordnungsspektrum 2D)

Das Werkzeug Ordnungsspektrum (2D) wird in der Vorserie und Serie eingesetzt, um beispielsweise die Robustheit der Produktion über einen weiten Ordnungsbereich zu überwachen. Hierbei lassen sich überhöhte Ordnungen als Abweichungen von bisherigen Produktionsdaten und Überschreitungen der Grenzkurve detektieren.

Werkzeug 4: Kennwerte als Qualitätskriterien für die Serienanwendung (1D)

Für eine effiziente Bewertung und statistische Auswertungen ist die Berechnung von skalaren Indizes hilfreich. Zweidimensionale Ordnungsspektren (siehe Werkzeug 3) können für definierte Drehzahl- und Ordnungsbereiche integriert und anschließend gewichtet werden, wodurch ein produktspezifischer NVH-Index entsteht (Abbildung 9). Da Nennordnungen der Teilkomponenten durch den Entwicklungsprozess bekannt sind, können die entsprechenden Ordnungsbereiche auf zu erwartende Nebenmodulationsanteile, Streubreiten und überhöhte Amplituden überprüft werden.

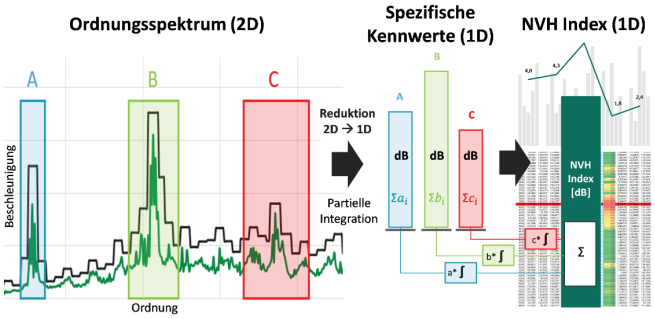

Abbildung 9: Gefensterte und gewichtete Liniensummen als Beispielanwendung für skalare NVH-Kennwerte in der Serienanwendung (Werkzeug 4)

Der NVH-Index liegt als abgesicherter Nachweis für jedes ausgelieferte Bauteil vor und kann als cloudbasierte Größe für weitere statistische Auswertungen verwendet werden. Dies umfasst zum Beispiel Rückläufernachweise bei akustisch auffälligen Transportschäden oder möglichen Chargenabweichungen.

Beispielanwendung: Fehleranalyse von überhöhten Ordnungen im Ordnungsspektrum (2D)

Mit Werkzeug 3 wird beispielsweise die Überschreitung einer Grenzkurve in einer spezifischen Ordnung detektiert. In einem ersten Schritt der Fehleranalyse kann kein Zusammenhang mit einem bekannten Fehlerbild hergestellt werden. Eine analytische Ordnungsbetrachtung liefert anschließend die Hypothese, dass die detektierte

Auffälligkeit durch einen Bauteilfehler am Hohlrad verursacht wird. Um dies zu überprüfen, werden Kreuztausche einzelner Bauteile und gezielte Geometriemessungen durchgeführt. Am Beispiel des Hohlrades wandert die Auffälligkeit der überhöhten Ordnung in Kreuztauschen mit dem Hohlrad. Die geometrische Messung der Laufverzahnung zeigt eine auffällige Welligkeit auf der Zahnflanke, die auf eine unerwünschte Maschinenschwingung im Fertigungsprozess zurückzuführen ist. Diese tritt durch eine anschließende Optimierung der Parameter des Fertigungsprozesses nicht mehr auf, was im weiteren Produktionsablauf durch eine kontinuierliche Überwachung sichergestellt wird. Diese neue Erkenntnis wird anschließend in den akustischen Fehlerbildkatalog aufgenommen.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden vier relevante Werkzeuge für die akustische Bewertung von E-Achs-Getrieben im industriellen Entwicklungsumfeld vorgestellt. Campbell-Diagramme weisen eine hohe Informationsdichte für den Entwicklungsprozess auf. Getriebeheulen als charakteristisches Phänomen wird anhand von Ordnungsschnitten gegen definierte fahrzeugbezogene Grenzkurven bewertet. Zweidimensionale Ordnungsspektren geben Hinweise auf fehlerhafte Komponenten und abgeleitete NVH-Indexe stellen die breitbandige Robustheit in der Produktion auf Basis akustischer Daten sicher. Die Herausforderung besteht darin, sich auf einige wenige Kriterien zu stützen, die sowohl in Simulation als auch Versuch Verwendung finden können. Der Einsatzbereich dieser Kriterien umfasst den kompletten Produktzyklus: von der Entwicklung erster Prototypen bis zur Serienanwendung.

Psychoakustische Parameter werden in diesem Beitrag bewusst ausgeklammert, was nicht bedeutet, dass sie im industriellen Kontext und speziell für die Grenzkurvenentwicklung keine Anwendung finden.

Die dargestellte Vorgehensweise konzentriert sich auf einige etablierte Werkzeuge der Ordnungsanalyse aus Versuchsdaten für E-Achs-Getriebe, ist aber auch auf weitere rotatorische Bauteile und Teilsysteme übertragbar. Dies umfasst beispielsweise E-Maschinen mit magnetischen Flusskräften und aktive mechatronische Systeme, die eine drehzahlabhängige spektrale Signatur in Körper- und Luftschall aufweisen. Auch komplexe Systeme wie E-Achsen, die aus vielen der genannten Teilkomponenten bestehen, lassen sich damit zuverlässig bewerten.

Literatur

[1] Tschöke, H., Gutzmer, P. und Pfund, T.: Elektrifizierung des Antriebsstrangs, Springer, Berlin Heidelberg, 2019

[2] Inalpolat, M. und Kahraman, A.: A theoretical and experimental investigation of modulation sidebands of planetary gear sets. Journal of Sound and Vibration 323(3-5) (2009), 677–696

[3] Pletschen, B.: Akustikgestaltung in der Fahrzeugentwicklung. In: Klaus Genuit (Hg.): Sound-Engineering im Automobilbereich. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

[4] Kurch, M; Blickensdorff, J.; Holz, A.; Satzinger, S.: Akustik-Herausforderungen und -Lösungen für elektrische Achsen. In: Tagungsband DAGA (2019), Rostock

[5] Blickensdorff, J.; Schiffer, I.; Nichols, M.: Steigerung der Vorhersagequalität von elektrischen Antriebsgeräuschen. In: Tagungsband DAGA (2019), Rostock