

NVH-Simulationen subjektiv erlebbar machen – der Weg vom virtuellen Antriebsstrang zur realen Beurteilungsfahrt

Subjective Experience of NVH Simulations - From Virtual Powertrain to Real Assessment Drive

Sebastian Lucas, Oleg Rogalski, Matthias Hoffmann, Dirk Bordiehn

<http://dx.doi.org/10.25673/103516>

Kurzfassung

Im klassischen Entwicklungsprozess ist die Perzeption der Antriebsstrangakustik im Fahrzeuginnenraum erst bewertbar, wenn physische Prototypen verfügbar sind. Um bereits in frühen Entwicklungsstadien (wenn die ersten CAE-basierte Daten zur Verfügung stehen) eine realitätsnahe Auralisation der NVH-Simulation zu ermöglichen, bedarf es eines neuen Ansatzes zwischen messtechnischen Methoden und simulativen Berechnungsverfahren. Unter Kenntnis typischer Übertragungsfunktionen und der Antriebsstrangakustik bestimmter Fahrzeugklassen kann das Fahrzeuginnengeräusch auch aus Berechnungsdaten vorhergesagt werden. Dazu wird eine hybride Methode verwendet, bei der die Berechnungsergebnisse einem messtechnisch erfassten Signal überlagert und mittels Resynthese für eine Beurteilung im Fahrsimulator aufbereitet werden.

Dieser Ansatz ermöglicht frühzeitige virtuelle Testfahrten im stationären NVH-Simulator sowie auch im mobilen Akustik-Fahrsimulator unter realen Fahrbedingungen. Die realen Beurteilungsfahrten (also die direkte Perzeption des berechneten NVH-Verhaltens) tragen zusätzlich zu den in Diagrammen oder als Einzelwert dargestellten Ergebnissen sehr viel dazu bei, fundierte Entscheidungen über akustische Entwicklungsziele zu treffen. Weiterhin ermöglicht dieser Ansatz die frühzeitige Modifikation von Bauteilen und/oder -gruppen sowohl auf Aggregate- wie auch auf Fahrzeugebene, noch bevor erste prototypische Teile in Hardware aufgebaut werden. Dies wirkt sich im Produktentstehungsprozess deutlich positiv auf Entwicklungszeiten und -kosten aus.

Um die intern validierte Vorgehensweise beispielhaft vorzustellen, wird hier die aktuelle Methodik der NVH-Berechnung sowie die Integration der Daten in die Fahrsimulator-Architektur dargestellt. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass dieser hybride Ansatz eine gute Grundlage für die reale Beurteilung von simulativ ermittelten Berechnungsergebnissen darstellt und seine Weiterentwicklung eine wichtige Lücke zwischen Simulation und Perzeption schließt.

1. Motivation

Traditionell müssen alle akustisch relevanten Schritte im Fahrzeugentwicklungsprozess perceptiv bewertet und durch Messungen dokumentiert werden, was nur möglich ist, wenn physische Prototypen vorhanden sind. Die für den Aufbau von Prototypen benötigten Hardware-Ressourcen werden aufgrund des steigenden Kostendrucks und der stärkeren Digitalisierung im Entwicklungsprozess zukünftig nicht mehr zur Verfügung stehen.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, setzt Volkswagen NVH-Simulatoren ein, um bei virtuellen Testfahrten unterschiedliche technische Lösungen oder Baustände zu vergleichen. So können Entwickler unabhängig von der Verfügbarkeit von Prototypen die akustischen Auswirkungen bestimmter Baustände bzw. Lösungen in realen Fahrsituationen erleben.

Mit Hilfe der Binauraler Transfer Pfad Analyse (BTPA) ist es möglich, das Innengeräusch einer Kombination aus Fahrzeug und Antriebsstrang zu erleben, bevor der Antrieb bzw. das (prototypische) Fahrzeug physisch vorhanden ist. Da alle in diesem Modell enthaltenen Übertragungswege auch modifizierbar sind, können sie auch genutzt werden, um die akustische Relevanz bestimmter Bauteilmodifikationen zu überprüfen. Auf Prüfständen gemessene bzw. in FEM-Umgebungen simulierte Antriebsstränge liefern (Mess-)Daten, die in dieses BTPA-Modell integriert werden können, um darauf basierend das Innengeräusch vorherzusagen. Die Verwendung dieser prognostizierten Fahrzeuginnengeräusche in einem NVH-Simulator ermöglichen virtuelle Testfahrten mit unterschiedlichen technischen Lösungen oder Bauständen bereits ab der frühen Entwicklungsphase. Dadurch wird die Bewertung der Relevanz im realen Fahrbetrieb gegenüber der Darstellung in technischen Diagrammen deutlich verbessert, was für Manager wertvolle Vorteile bei der Entscheidung für die beste Lösung bringt.

2. CAE-basierte NHV-Simulation

2.1 Einleitung

Das große Ziel der Simulation ist es, eine gute NVH-Prognosegüte zu erzeugen. Ein bedeutender Vorteil dabei ist, dass eine hohe Vielfalt an Verbesserungsvorschlägen zeitnah modelliert werden und miteinander verglichen werden können. Designvorschläge entstehen dabei vorrangig mit der Hilfe der klassischen Konstruktion. Einfache Strukturen können aber auch mit den FEM-Präprozessoren entworfen werden. Dabei dient die Berechnung nicht ausschließlich der Nachrechnung. Die Verwendung von zielgerechter numerischer Form- oder Topologieoptimierung gibt vor allem in der frühen Phase der Entwicklung die Richtung für die Strukturgestaltung vor.

Die Lösung der Bewegungsgleichung findet im modalen Raum statt. Modale Frequenzanalysen werden verwendet, um das benötigte Übertragungsverhalten zu berechnen. Da nur der eingeschwingene Zustand im Frequenzbereich betrachtet werden kann, sind dynamische, zeitvariante und damit nichtlineare Effekte nur bedingt oder gar nicht abbildbar. Die Eigenschaften der FEM-Modelle werden mit Hilfe der Prüfstandmessungen angepasst, damit wichtige Frequenzbereiche - wie z. B. der

Bereich der Motorraugigkeit - besser vorhergesagt werden können. Das bedeutet, dass im Laufe eines Produktentwicklungsprozesses eine Validierung eines Aggregats erforderlich ist, damit wiederum die genauere Ergebnisqualität im NVH-Simulator davon profitieren kann.

2.2 NVH-Prozess

Die Abfolge verschiedener und zahlreicher Arbeitsunter Schritte und die Verwaltung großer Datenmengen erfordert eine Prozessautomatisierung, um unter anderem Fehlerhäufigkeiten zu minimieren. Deshalb wurde ein NVH-Prozess im Laufe der Zeit entwickelt, der skriptbasiert die Simulation im hohen Maße unterstützt. Die Leistungsfähigkeit der Berechnung kann so maximiert werden. Das erlaubt eine gute Reproduzierbarkeit und Übersicht der berechneten Varianten.

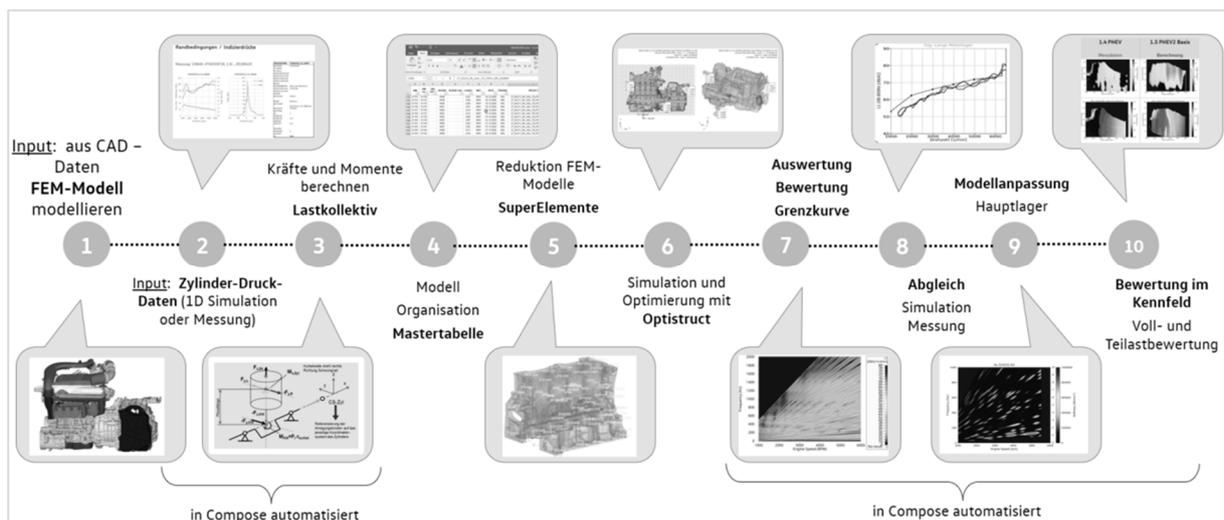


Bild 1: Allgemeine NVH Prozessschritte

Die Eingangsgrößen für die Simulation sind geometrische Informationen, Materialdaten und Lastkollektive. Die Geometrie wird vernetzt, wobei Module entstehen, die wiederum mit Federelementen bestimmter Freiheitsgrade miteinander verbunden werden. Die sogenannten Module werden entsprechend modal reduziert. Damit entstehen nur an bestimmten benötigten Koppelpunkten binäre Daten mit Steifigkeits-, Dämpfungs- und Massenmatrizen. Diese werden auch als Superelemente bezeichnet.

Vorhergehende MKS-Simulationen oder Motorenprüfstandsmessungen liefern Zylinderdruckdaten. Neben den mittleren induzierten Zylinderdrücken und Abmessungen des Kolbentriebs werden zudem auch die oszillierenden und rotierenden Massen benötigt, um die Berechnung der Kinematik und Kinetik des Kurbeltriebs durchzuführen. Die Kurbeltriebskinematik wird verwendet, um die Schnittlasten für die Kurbelwelle und den Brennraum im Zeitbereich zu berechnen. Mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) wird der Zeitbereich schließlich in den Frequenzbereich umgewandelt. Die resultierenden Spektren beinhalten Kräfte und Momente in Form von Betrag und Phase.

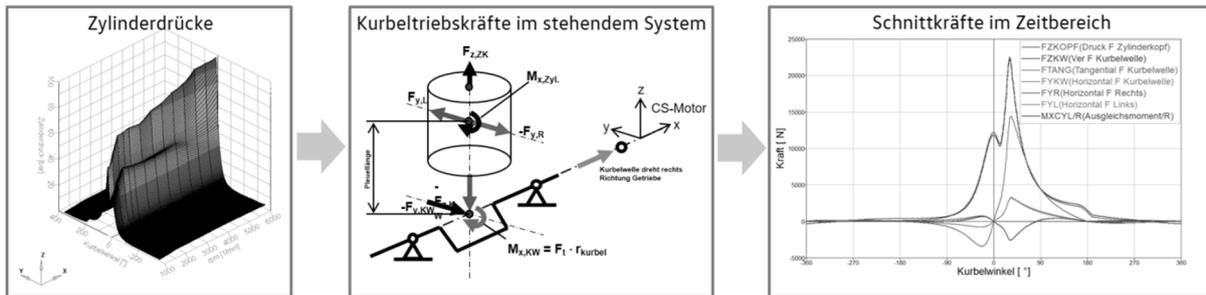


Bild 2: Berechnung der Schnittkräfte im Zeitbereich

Obwohl die Rotation der drehenden Bauteile im Frequenzbereich nicht simuliert werden kann, werden zwei Effekte dennoch einkalkuliert. Zu einem ist das der Kreisel-effekt. Für Bauteile wie den Pleumassenschwinger mit einer höheren Massenträgheit ist die Berücksichtigung im Modell wichtig, da die Moden sich drehzahlabhängig im Gesamtsystem stärker verschieben können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Drehimpuls mit steigender Drehzahl die Kippwirkung versteift.

Auch die Unwuchten werden berücksichtigt. Beim 3-Zylinder werden beispielsweise Unwuchten integriert, um einen Massenausgleich zu erzeugen. In den FEM-Rechnungen wird die Abbildung der Unwuchten mit punktuellen Kräftepaaren für bestimmte Motorordnungen berücksichtigt. Nur so kann eine gute Ergebnisgüte im Vibrationsbereich erzielt werden und somit eine gute Vorhersage für Körperschall aber auch Spannungsresultate getroffen werden.

Die numerische Berechnung und die Optimierung werden mit der Software *Optistruct* von *Altair* realisiert. Die Lastfälle werden in Drehzahlschnitten aufgebaut. Für jeden Drehzahlpunkt wird folglich eine modale Frequenzanalyse gerechnet. Die Frequenzstützstellen sind dabei die Motorordnungen. Die Berechnung im modalen Raum erfolgt relativ schnell in wenigen Minuten. Mit einer einzelnen Simulation wird ein Hochlauf gerechnet. Das bedeutet, dass eine eingeplante Drehmoment-Drehzahlkennlinie aus dem Kennfeld dabei aufgelöst wird. Standardgemäß wird die Vollast für eine bestimmte Getriebegangstellung bewertet.

Speziell für den INS-Simulator wird das M-n-Kennfeld für die ausgewählten Gaspedalstellungen simuliert. Neben der Vollast werden hier mehrere Teillastkennlinien gerechnet, die für die Abbildung des gesamten Last-Kennfeldes notwendig sind.

2.3 Unterteilung und Bewertung der Frequenzbereiche

Die Berechnung des Körperschalls gilt hier für die akustischen Bereiche Vibration und Rauigkeit (Vibration und Harshness „VH“). Zum Bewerten der Vibration reichen einzelne Motorordnungen aus. Beim 4-Zylinder Motor ist das z. B. die zweite Motorordnung (Bild 3).

Um die Bereiche der Motorrauigkeit und die der Motorvibration bewerten zu können, werden Richtkurven/Grenzkurven von der Abteilung für physikalische Erprobung erzeugt. Aus zahlreichen Messungen am Prüfstand oder im Fahrzeug ergeben sich somit Richtkurven, die für die darauffolgende Entwicklung als Auslegungskriterium dienen. Somit wird eine Anforderungsbasis für die akustische Entwicklung gelegt.

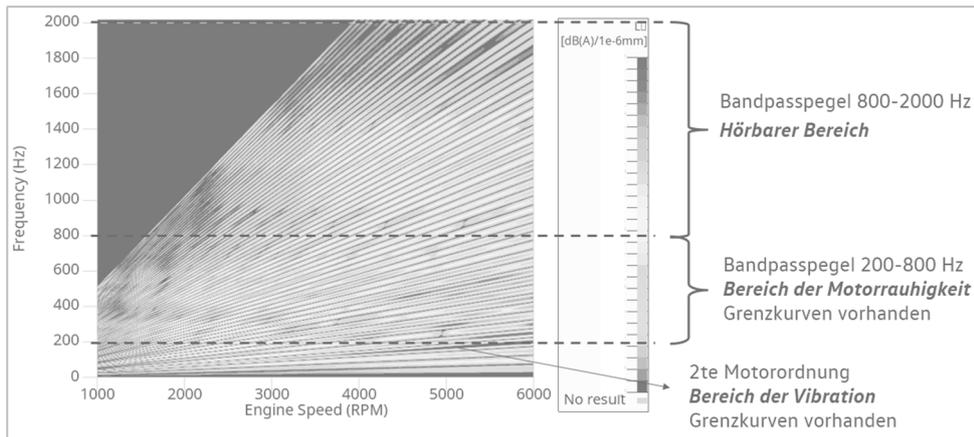


Bild 3: Bewertungsbereiche des Körperschalls für Verbrennungskraftmaschinen

Die berechneten Schwingwege an den jeweiligen Lagerstellen werden in einem 2-D Diagramm geplottet. Der Vergleich der Simulation mit den Richtkurven zeigt mögliche Schwachpunkte auf. Daraufhin können gezielt Strukturen und somit das Schwingungsverhalten optimiert werden, bis die Richtkurven eingehalten werden.

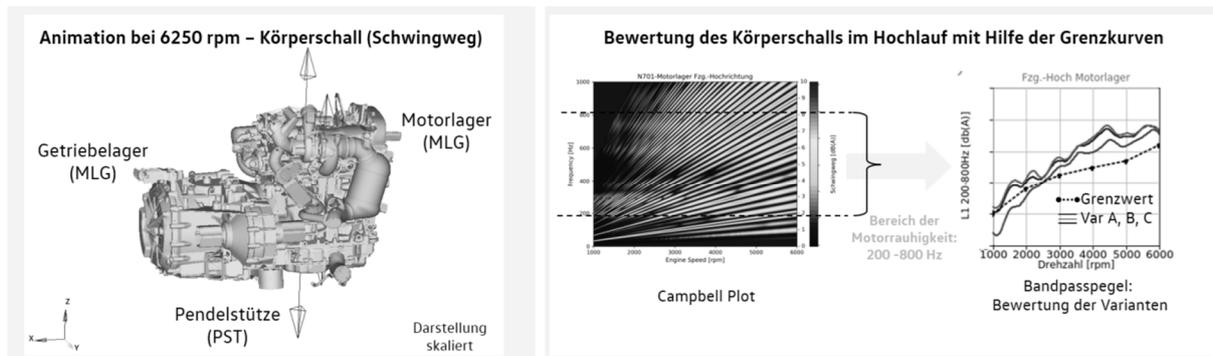


Bild 4: Bewertung des Körperschalls für VKM's unter Verwendung der Grenzkurven

Der Körperschall wird an den Aggregatlagerpositionen berechnet und als Beschleunigung an den NHV-Simulator übergeben (Bild 4). In Summe werden die Daten der drei Übergangsstellen Motor-, Getriebe- und Pendelstützlager übergeben, da das Aggregat dort mit dem Fahrzeug verbunden und der Hauptanteil an Körperschall dort eingeleitet wird.

3. Erlebbarkeit im NVH Simulator

3.1 Einleitung

Der NVH-Simulator ist keine neue Technologie, er ist seit langem im Einsatz und wurde kontinuierlich verbessert [1-3]. Die Notwendigkeit der Anwendung dieser Technologie ist allerdings aktueller denn je. Mit steigendem wirtschaftlichen Druck werden hardwarebasierte Prototypen immer stärker reduziert und die Entwicklungsprozesse immer weiter verkürzt. Um dieser Entwicklung gerecht zu werden, kommen die NHV-Simulatoren zum Einsatz, um Schall und Vibration möglichst früh in einem virtuellen Prototypen zu erleben. Sie werden für viele Anwendungen wie Benchmarking, Zielwertdefinition und zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen verwendet.

Ein NVH-Simulator ist eine je nach Anwendung, Fokus und Budget skalierbare Lösung. Angefangen beim Desktop-Simulator mit kalibrierter und hörgerechter Kopfhörerwiedergabe, einem Monitor für eine grundlegende Visualisierung und Pedalen für die Interaktion, kann man dieses System fast beliebig skalieren. Der nächste Schritt ist ein Simulator mit festem Sockel und zusätzlichen Sitz- und Lenkradvibrationen. Es kann ein vereinfachter Sitz-Aufbau oder eine komplette Fahrzeugkabine verwendet werden. Auch eine Integration in einen Gesamtfahrzeugsimulator als Subsystem ist möglich. Jedes weitere Hinzufügen von Kontext, Aussehen und Perzeption erhöht die User-Experience und Akzeptanz des Simulator-Systems [4]. In diesen Systemen werden die binauralen Geräusche und Vibrationen des Antriebsstrangs, Reifen-/Fahrbahngeräusche und Windgeräusche interaktiv wiedergegeben. Die Probanden können im Simulator nahezu frei in alltäglichen Fahrdynamiksituationen fahren und währenddessen den Sound und die Vibrationen so erleben, als wären sie in einem echten Auto. So können sie alle für sie wichtigen Betriebsbedingungen beurteilen.

Im statischen Einsatz werden die Fahrparameter wie z. B. Geschwindigkeit, Drehzahl und Last den NVH-Simulatoren mit Hilfe von Fahrdynamikmodell bzw. externer Softwarelösungen über eine Schnittstelle kontinuierlich zur Verfügung gestellt. Im mobilen Einsatz ist dies nicht erforderlich, da die tatsächlichen Fahrparameter über den CAN-Bus übertragen werden. Der Ton wird über Noise-Cancelling-Kopfhörer (ANC) wiedergegeben. Die Testperson fährt ein reales Auto und hört sich ein virtuelles Auto an. Dieser Ansatz bietet natürlicherweise das beste Fahrerlebnis, da man alle realen Fahrdynamikeinflüsse abbildet. Zu beachten ist, dass hier die Vibrationen nicht verändert werden können, also sollten sich Demonstrator und virtuelles Fahrzeug möglichst ähnlich verhalten.

3.2 Methodik

Grundlegender Bestandteil des Simulationskonzeptes bei VW ist die binaurale Transferpfadanalyse (BTPA). Ziel der BTPA ist es, die Beiträge von Luftschall und Vibration für jeden Pfad separat zu quantifizieren, sowie zusätzlich die Quelle und das Übertragungsverhalten zu charakterisieren (Bild 5). Sie ist ein sehr hilfreiches Werkzeug innerhalb des gesamten Produktentwicklungsprozesses, da mit ihrer Hilfe bereits in der frühen Konzept- und Designphase das Übertragungsverhalten bzw. die akustischen Eigenschaften des Fahrzeugs untersucht werden können.

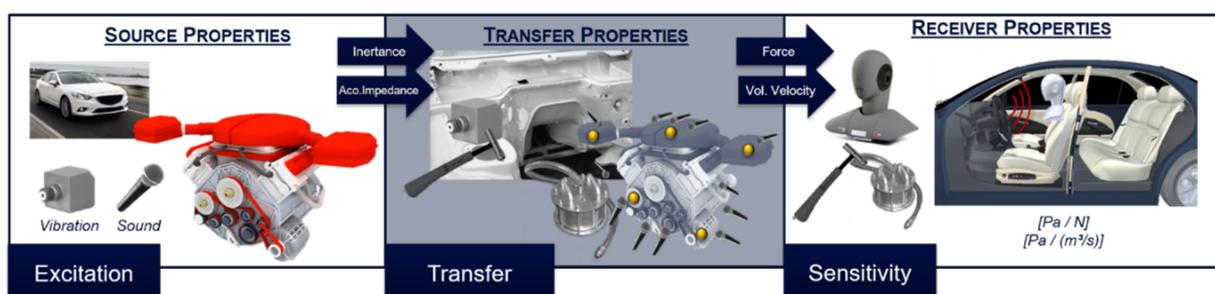


Bild 5: Eigenschaften von Transferpfaden [5]

Auch im weiteren Produktentwicklungsprozess ist die detaillierte Kenntnis des Anregungs- und Übertragungsverhaltens sehr hilfreich, um den Optimierungsprozess zu unterstützen. Dieses Konzept kann so erweitert werden, dass am Prüfstand vermessene Antriebsstränge oder auch Simulationsdaten erlebbar werden. Die

Entwicklung und Anwendung der BTPA wurde in zahlreichen Quellen beschrieben [5-13]. In Abbildung 6 ist beispielhaft ein möglicher Modellbaum der einzelnen BTPA-Pfade dargestellt, wie er typischerweise bei den Transferpfadanalysen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor vorliegt.

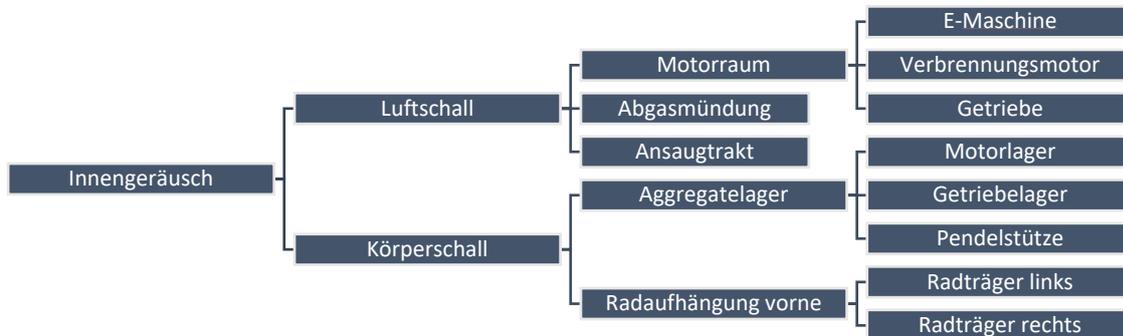
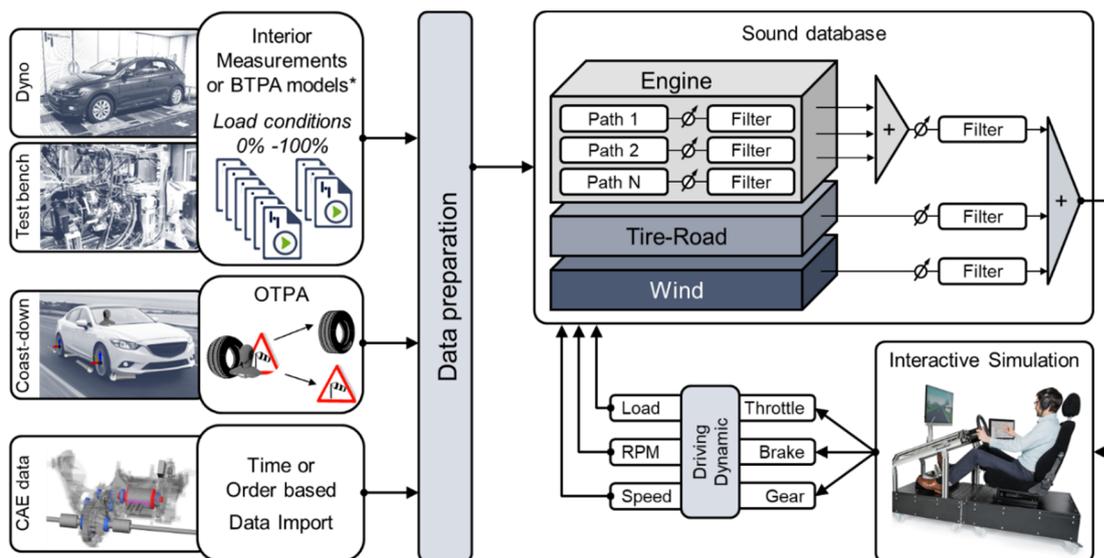


Bild 6: Beispiel BTPA-Pfade Modellbaum für das Innengeräusch

Die Anteile von Wind- und Reifenabrollgeräusch am Innengeräusch werden mittels eines Ausrollversuchs auf einer realen Straße ermittelt. Auf einer Teststrecke wird das Fahrzeug auf Höchstgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend lässt man es (möglichst ohne Motorlauf oder zumindest im Leerlauf) bis in den Stand ausrollen. Das Innengeräusch wird mit dem OSPA-Verfahren in Reifenfahrbahngeräusche und Windgeräusche getrennt [14], welche im Simulator separat verarbeitet werden.

Bei Volkswagen werden diese BTPA-Datensätze in verschiedenen Simulator-konzepten verwendet. Der Nutzer fährt das virtuelle Fahrzeug entweder in einem statischen oder mobilen Simulator in einer interaktiven Simulation, welche auf Technik bzw. Software der Firmen *VI-grade*, *HEAD acoustics* und *IPG Automotive* basieren. Passend zur Fahrdynamik werden die entsprechenden Antriebsstrang-, Reifen-/Fahrbahn- und Windgeräusche wiedergegeben (Bild 7). Diese wählt der Fahrer aus einer Sounddatenbank verschiedener Antriebsstränge, Fahrbahnbeläge und Windgeräusche. Während der Fahrt kann der Nutzer Schallquellen ein- und ausschalten, den Pegel verändern oder die Geräusche mit Filtern manipulieren [5].



* BTPA models also allows the use of FRFs derived by CAE

Bild 7: schematisches Konzept der NVH Simulatoren am Bsp. eines statischen Simulators [5]

3.3 CAE-basierte NVH-Daten erlebbar machen

Für die perzeptive Darbietung von CAE-Simulationsdaten im Simulator wird aktuell ein hybrider Ansatz genutzt. Basierend auf den messtechnisch erfassten BTPA-Modellen und den simulativ ermittelten Ordnungspegeln des Antriebsstrangs wird eine sogenannte Resynthese durchgeführt (Bild 8).

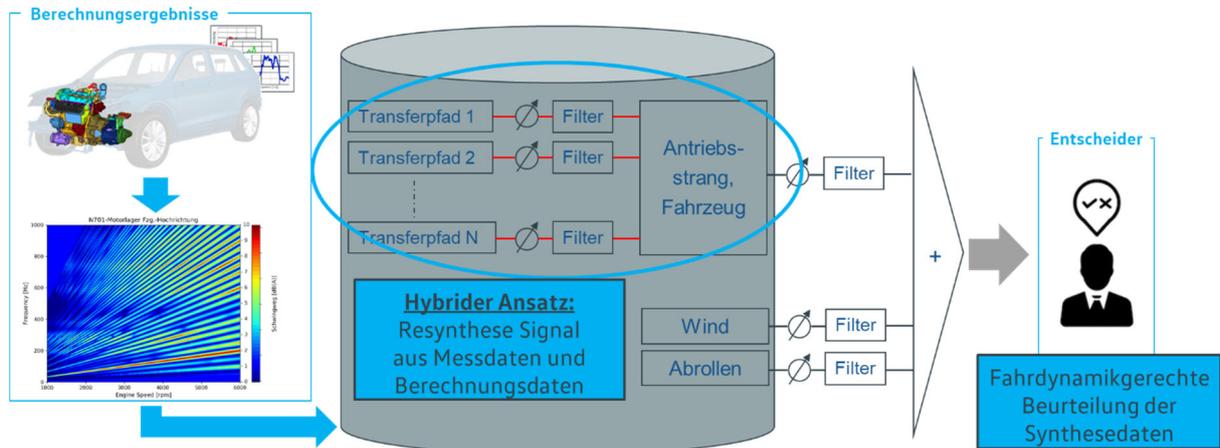


Bild 8: Hybrider Ansatz zur Wiedergabe von CAE-Daten im NVH-Simulator

Dazu werden die Daten mittels analytischer Verfahren, wie der FFT, analysiert, im Frequenzbereich miteinander kombiniert und anschließend wieder in den Audiobereich transformiert. Die Kombination findet statt, indem die Ordnungen aus den gemessenen Ausgangsmessungen des Datensatzes extrahiert und pegel- sowie phasenrichtig durch die Daten der Simulation ersetzt werden. Die so erzeugten hybriden Daten werden im Folgenden mit Hilfe der in der TPA ermittelten Übertragungsfunktionen hinsichtlich ihres Innengeräuschanteils weiterverarbeitet und zur Prognose des gesamten Innengeräusches kombiniert (Bild 9).

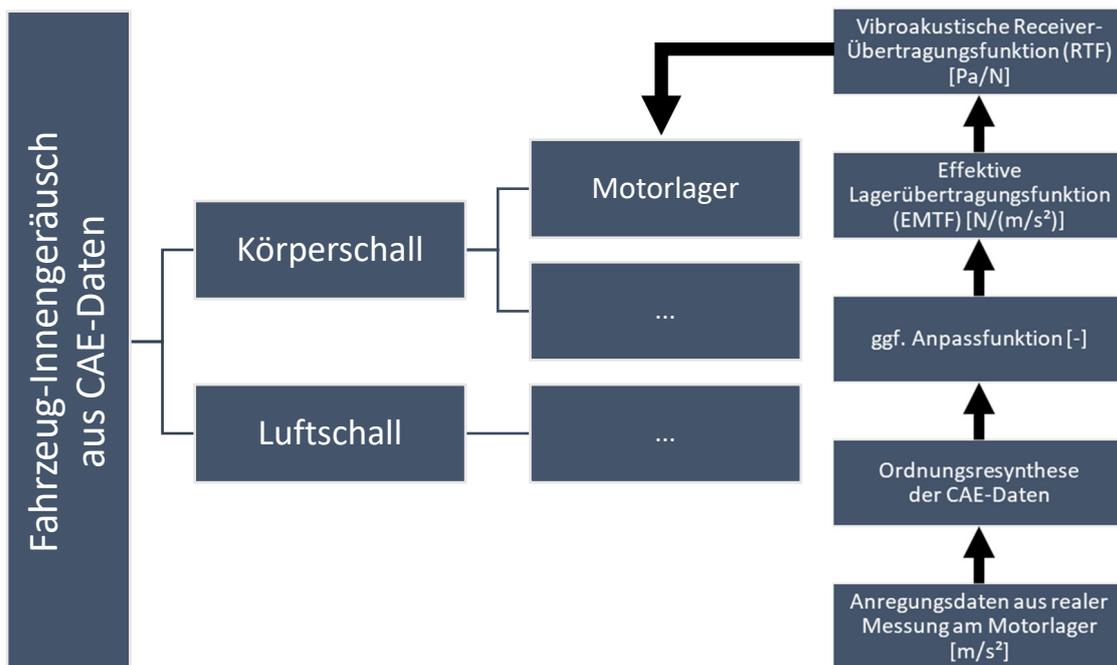


Bild 9: Schema des BPTA-Modells zur Prognose des Innengeräusches von CAE-Daten

4. Vorteile im Entwicklungsprozess

4.1 Praktische Anwendung

Der NVH-Simulator wird bei Volkswagen zum direkten Erleben und Vergleichen unterschiedlicher technischer Lösungen/Bauständen in Echtzeit verwendet. Durch seine Möglichkeit der Einbindung von Antriebsprüfstands- und Simulationsdaten in die Innenraumgeräuschprädiktion mittels Binauraler Transfer Pfad Analyse (BTPA) ermöglicht er (bereits in frühen Entwicklungsphasen) perzeptive Akustikbeurteilung von Fahrzeug-Antriebs-Kombinationen und Bauzuständen in einer variablen Simulatorumgebung. Neben den Antriebsstranggeräuschen werden auch das Reifen-/Fahrbahngeräusch und das Windgeräusch in das Gesamtfahrzeugakustikmodell integriert, um auch Maskierungseffekte zu berücksichtigen. Alle diese Innengeräuschanteile können bei Bedarf in der Simulatorumgebung weiter modifiziert werden.

Beispielhaft kann die subjektive Bewertung der akustischen Folgen von konstruktiven/strukturellen Änderungen an einem Aggregat genannt werden. Die Auswirkungen auf das NVH-Verhalten wurden mittels CAE-Simulation bestimmt. Mit dem hier vorgeschlagenen Verfahren wurde aus diesen Daten in Kombination mit einem Transferpfadmodell eines typischen Fahrzeugs das Fahrzeuginnengeräusch simuliert. Das resultierende Innengeräusch wurde bei Testfahrten im mobilen Akustik-Simulator dargestellt und konnte von allen Teilnehmern in Echtzeit durch einfaches Umschalten wahrgenommen werden. Dies war ohne die Erstellung eines prototypischen Hardwareaufbaues in einem sehr frühen Entwicklungsstadium möglich und führte zu erheblichen Auswirkungen und Kostenersparnissen im Entscheidungsprozess.

Zusätzlich zum mobilen Betrieb wird das Simulatorsystem auch stationär am Arbeitsplatz und für weitere bei Volkswagen betriebene Fahrsimulatoren verwendet. Die Einsatzfälle sind sich in ihrer Anwendung sehr ähnlich und auch hier wird die Bewertbarkeit von Mess- und Simulationsdaten deutlich verbessert. Auch bei rein digitalen Fahrzeugbewertungen und Abnahmeprozessen wie dem „Digital Customer Check“ bei Volkswagen kommt das NVH-Simulatorsystem zum Einsatz. Durch die zu Optik und Bewegung passende Darbietung von Vibrationen und Sound wird das Fahrerlebnis deutlich verbessert, was zu einer realistischeren Wahrnehmung der dargestellten Gesamtfahrzeugsimulation und damit zu einer höheren Akzeptanz führt. Auf Basis dieser verbesserten Erlebbarkeit wird die Entscheidungsfindung nachhaltig erleichtert.

4.2 Vorteile bei der NVH-Entwicklung

Mit Hilfe des NVH-Simulators ist es möglich, eine exakte und adaptive Vorhersage der Auswirkungen unterschiedlicher Bauzustände des Fahrzeugs auf die Akustik durchzuführen, ohne einen physischen Prototyp berücksichtigen zu müssen. Dies führt zu monetären Einsparungen bei Hardware und Prototypenaufbau, sowie Verbesserung der Aussagesicherheit zum Konzept des Antriebsaggregates und seiner Fahrzeugintegration. Weitere Einsparpotenziale ergeben sich aus der Nutzung gemeinsamer Daten mit anderen von Volkswagen betriebenen Fahrsimulatoren.

Durch die Einbindung von Antriebsstrangprüfstands- und CAE-Simulationsdaten in die Simulatorumgebung wird man in die Lage versetzt, die Fahrzeugakustik bereits in sehr

frühen Entwicklungsstadien in einer realen Fahrzeugumgebung perceptiv zu bewerten. Dies hat einen deutlichen Effekt für den Gesamtprozess. Durch frühzeitige subjektive Beurteilungen und den direkten Vergleich verschiedener technischer Lösungen kann man die Akustikentwicklung zielsicher in die optimale Richtung lenken. Lösungen, die im Fahrzeug wenig erfolgversprechend erscheinen, können frühzeitig abgebrochen werden und die Notwendigkeit von nachgewiesenen positiven Maßnahmen kann bekräftigt werden. Dies führt auch zu einer deutlichen Verbesserung in der späten Entwicklungsphase, da relevante Komponenten bereits identifiziert werden und somit die Notwendigkeit zur Fehlersuche reduziert wird. Diese Vorteile bringen natürlich auch eine Kostenersparnis über den gesamten Entwicklungsprozess mit sich.

Ein ebenfalls nicht zu vernachlässigender Vorteil beim mobilen Betrieb in einem Versuchsträger ist das Problem der Simulatorkrankheit. Eine Vielzahl von Menschen verträgt die Benutzung eines Fahrsimulators nur eingeschränkt, da die Sinnesindrücke beim Fahren in einem Simulator dazu führen können, dass sich der Anwender unwohl fühlt. Dies ist auf fehlende bzw. nicht ausgeprägte Komponenten wie z. B. Längs- und Querschleunigungen, Sichtfeld etc. zurückzuführen. Im mobilen Betrieb sind diese in einer realen Ausprägung vorhanden, was dazu führt, dass es nahezu keine Beschwerden gibt. Damit wird die Bewertbarkeit einer breiteren Masse von Anwendern zugänglich gemacht.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der immer kürzer werdende Produktzyklus von Fahrzeugen erfordert neue Entwicklungsansätze, um effizient und kostendeckend zu bleiben. Im NVH-Bereich, wie in vielen anderen Disziplinen auch, tritt daher das Entwickeln mit virtuellen Methoden und Prototypen zunehmend in den Vordergrund, um diese Anforderungen zu erfüllen und kostspielige physische Prototypen zu vermeiden. Die Kombination von CAE-basierter Akustiksimulation und der Binauralen Transfer Pfad Analyse (BTPA) ist ein Puzzleteil für das virtuelle Prototyping. Durch die Messung und detaillierte Modellierung des Fahrzeugmodells und die Simulation des aktuellen Entwicklungsstands des Antriebsstrangs können die Innengeräusche und -vibrationen auralisiert und präzise vorhergesagt werden. Die Vorgehensweise und Vorteile dieser Methode wurden in diesem Beitrag dargestellt.

Zur Bewertung der Relevanz von Modifikation an den akustischen Quellen für das Fahrzeuginnengeräusch ist es neben der spektralen Analyse von Daten immer auch vorteilhaft, diese perceptiv erleben zu können. Die bei Volkswagen eingesetzten NVH- und Akustik-Simulatoren erfüllen genau diese Anforderung. Mit ihrer Hilfe kann das virtuelle Fahrzeug während einer virtuellen Testfahrt gefahren werden, um so aktuelle Entwicklungsrichtungen auch für Nicht-NVH-Experten möglichst realitätsnah in einem frühen Entwicklungsstadium erlebbar zu machen und Entscheidungen treffen zu können. Damit sind unterschiedliche Entwicklungen oder Entwicklungsstufen während einer einzigen Testfahrt in Echtzeit ohne prototypische Hardwareaufbauten durch einfaches Umschalten wahrnehmbar. Volkswagen setzt den hier vorgestellten Virtual-Prototyping-Ansatz erfolgreich für verschiedene Anwendungen ein. Durch die gemeinsame Nutzung der Fahrzeugmodelle und Daten in verschiedenen Fachabteilungen werden weitere Kapazitäten gespart und Entscheidungsprozesse vereinfacht.

Der hier vorgestellte Prozess des virtuellen Prototypings ist in vielfältiger Weise adaptierbar und erweiterbar. Stark im Fokus der zukünftigen Entwicklung steht auch hier die konsequente Weiterentwicklung des Ansatzes für Elektro- und Hybridfahrzeuge. Hier gibt es eine Vielzahl weiterer elektromagnetisch geprägter akustischer Phänomene und auch Übertragungspfade, die es zu erfassen gilt. Der Anwendungsbereich kann hier ebenfalls auf aktives Sounddesign im Innenraum wie auch im Außenbereich (AVAS) sowie auch HMI-Themen erweitert werden.

Literatur

- [1] Genuit, K., Bray, W.: "A Virtual Car: Prediction of Sound and Vibration in an Interactive Simulation Environment", SAE 2001, Traverse City, MI, USA
- [2] Genuit, K., Bray, W. R.: "Prediction of Sound and Vibration in a Virtual Automobile", Sound & Vibration Magazin, Ausgabe Juli 2002, USA
- [3] Philippen, B.: "Driving Sound Simulator – a Universal Tool in the Development Process", Fortschritte der Akustik DAGA 2019
- [4] Merchel, S., Altinsoy, E., Leppin, A.: „Multisensorische Interaktion im Fahrzeug: Audio-Taktile Intensitäts-wahrnehmung“, Fortschritte der Akustik DAGA 2010
- [5] Lucas, S., Hoffmann, M., Bauer, D., Jürgens, F., Philippen, B.: "From Test Rig to Road – Experience Virtual Vehicle Acoustics on Powertrain Test Bench BTPA", Motor- und Aggregate-Akustik 11. Magdeburg Symposium 2021
- [6] Maarten V. van der Seijs, Dennis de Klerk, Daniel J. Rixen: "General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques", Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 68–69, 2016, Pages 217-244, ISSN 0888-3270
- [7] Genuit, K. and Poggenburg, J.: "The Design of Vehicle Interior Noise Using Binaural Transfer Path Analysis," SAE Technical Paper 1999-01-1808, 1999
- [8] Sottek, R. and Philippen, B.: "An Unusual Way to Improve TPA for Strongly-Coupled Systems," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 6(2):1325-1333, 2013
- [9] Genuit, K., Philippen, B.: „Die Bedeutung der Transferpfadanalyse und Auralisation für die weiteren Entwicklungen innerhalb der Fahrzeugakustik“, HdT Essen, 5. Tagung Fahrzeugakustik, 9. - 10. Juni 2015
- [10] Jürgens, F., Nettelbeck, C., & Sellerbeck, P.: „Can I trust my TPA results?“, Proceedings of the ICA 2019 and EAA Euroregio: 23rd International Congress on Acoustics, integrating 4th EAA Euroregio 2019: 9-13 September 2019, Aachen
- [11] Wernsen, M., Van der Seijs, M. & Klerk, D.: "An indicator sensor criterion for in-situ characterisation of source vibrations.", Conference: 35th International Modal Analysis Conference (IMAC XXXV), At Los Angeles (2017)
- [12] Anisovich, S., Sottek, R. & Wegerhoff, M.: "Analysis of a vibrating structure as an airborne sound source by means of matrix inversion.", Proceedings of the ICA 2019 and EAA Euroregio: 23rd International Congress on Acoustics, integrating 4th EAA Euroregio 2019: 9-13 September 2019, Aachen
- [13] Wegerhoff M., Sottek R., Brücher H.: „Eine Brückentechnologie zur Kombination von Versuch und Simulation mittels In-situ-TPA“ Fortschritte der Akustik DAGA 2020
- [14] R. Sottek and B. Philippen, "Tire-Road Noise Analysis of On-Road Measurements under Dynamic Driving Conditions," SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, vol. 5, 2012, pp. 1116–1123