Simulation der Fahrzeugakustik in der frühen Entwicklungsphase

Marinus Luegmair

ARRK|P+Z Engineering, CoC Akustik, 80807 München. E-Mail: m.luegmair@puz.de

Einleitung

Die Simulation ist seit Langem ein fester Bestandteil der Fahrzeugentwicklung und nimmt einen immer größeren Stellenwert ein. Dies gilt - getrieben durch die immer kürzeren Entwicklungszyklen und die höhere Anzahl der Derivate - auch für die Fahrzeugakustik, wie in Abbildung 1 gezeigt.

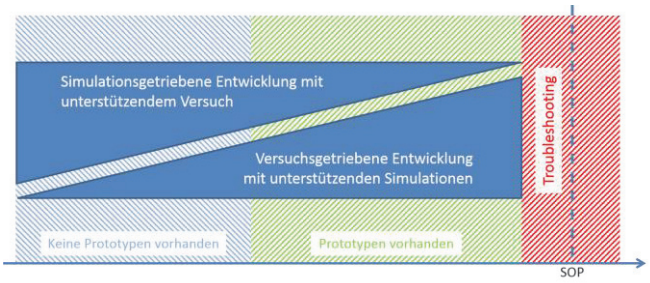

Abbildung 1: Vereinfachte Übersicht über den Akustikentwicklungsprozess im Fahrzeugbau

In der Simulation sind aber zwei entgegen gerichtete Trends erkennbar. Zum einen der Trend zu aufwändigen Berechnungen mit immer größerer physikalischer Tiefe und zum anderen der Trend zu schnellen und einfachen Simulationen für die Konzeptphase und die grundlegende Auslegung.

Dieser Trend zeichnet sich auch in der Akustikentwicklung der letzten Jahre ab (wie in Abbildung 2 skizziert) und führt zu entsprechenden Herausforderungen.

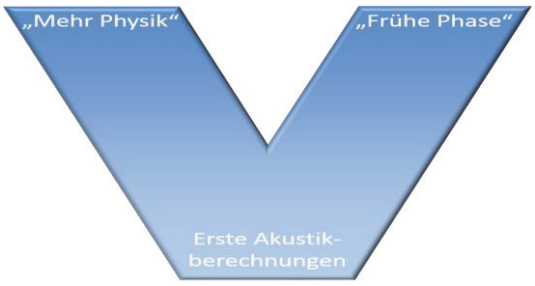

Abbildung 2: Beginnend mit den ersten Akustikberechnungen in der Automobilentwicklung ergibt sich eine fortlaufende Separation von zwei Trends

Die beiden Entwicklungen in der Fahrzeugakustiksimulation

Durch den immer größer werdenden virtuellen Anteil in der Entwicklung, muss die Vorhersagequalität der Simulationen immer besser werden. Hierdurch ausgelöst wurde und wird sehr viel geforscht um durch ein „Mehr“ an physikalischer Güte diese Qualität zu erlangen.

Gleichzeitig steigt durch die immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten der Bedarf an Simulationen die mit ihren Ergebnissen schnell eine Entscheidungshilfe liefern. Denn gerade in der frühen Entwicklungsphase müssen grundlegende Entscheidungen mit weitreichendem Einfluss auf das Produkt, basierend auf oftmals sehr wenigen und ungenauen Informationen, getroffen werden. Hier sind spezielle Berechnungsstrategien nötig um diesen Wiederspruch auflösen zu können.

Trend „Mehr Physik“

In der Akustiksimulation geht die Entwicklung auf den ersten Blick ausschließlich in Richtung immer höherer Frequenzen. Dahinter liegt aber der Trend zu immer besserer physikalischer Modellierung, der in verschiedene Facetten aufgeteilt werden kann

Verbesserte Modellierung und Elementansätze: Der seit Langem verfolgte Weg immer besserer Modellierungen und Elementansätze ist natürlich immer noch Teil der Entwicklung hat aber nicht mehr die grundlegenden Konsequenzen wie noch vor Jahren [1]. Trotzdem birgt er aber im Detail noch hohes Verbesserungspotential für spezielle Themen [2], wie in Abbildung 3 anhand der Modellierung von Anti-Dröhn-Belägen gezeigt.

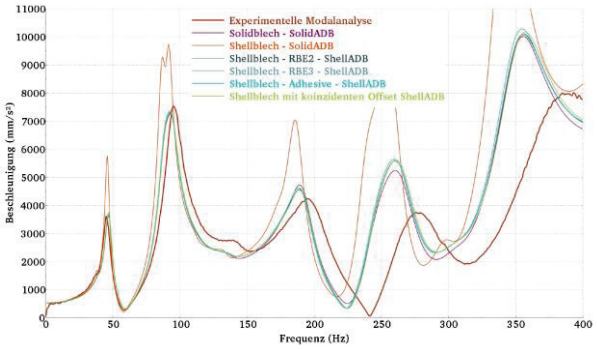

Abbildung 3: Beispiel zum Einfluss der Modellierung von Anti-Dröhn-Belägen auf die resultierenden Beschleunigungen [2]

Neue akustische Effekte: Ein weiterer Teilaspekt ist die Abbildung von zusätzlichen akustischen Effekten innerhalb kommerzieller Software. Oftmals ist die zugrundeliegende Theorie bereits viele Jahre alt, bis aber eine stabile und leistungsoptimierte Umsetzung in kommerziellen Simulationsprogrammen erfolgt vergeht immer ein gewisser

Zeitraum. Als zwei große Themen der letzten Jahre sind hier die Infiniten Elemente und Perfectly Matched Layer (PML) für die Abbildung der Abstrahlung ins Freifeld [3] und die Poro-elastischen Materialien (PEM) für die Abbildung der passiven akustischen Maßnahmen innerhalb des Fahrzeuginnenraums zu nennen [4].

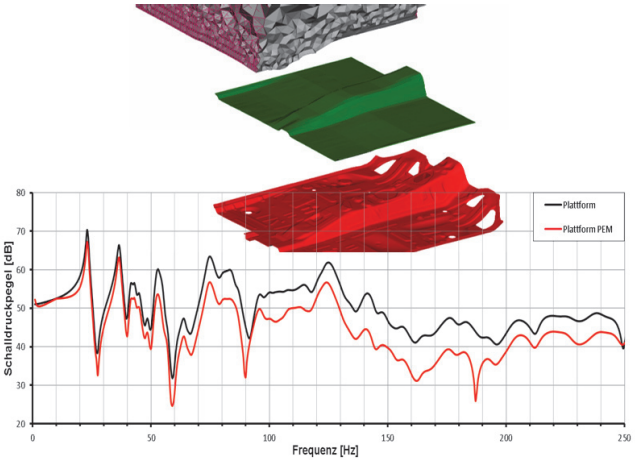

Abbildung 4: Exemplarische Darstellung des Einflusses einer poro-elastischen Schicht (dargestellt in grün) in der Simulation der akustischen Abstrahlung eines Fahrzeugbodenbleches (dargestellt in rot) [4]

Gekoppelte Berechnungsverfahren: Da akustische Phänomene verschiedenartigste Ursachen haben können, bzw. mit verschiedensten physikalischen Effekten verknüpft sind, werden immer mehr gekoppelte Simulationen durchgeführt. Auch die Verbindung von niederfrequenten modal dominierten Effekten und hochfrequenten statistisch dominierten Bereichen wird oftmals durch die Kombination zweier Verfahren gelöst. Exemplarisch ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier erwähnt:

- (akustische) Fluid und Strukturkopplung
- Kopplung von MKS (Mehr-Körper-Simulation) und FEM (Finite-Elemente-Methode)
- Verbindung von FEM und SEA (Statistical Energy Method)
- CAA (Computational Aero-Acoustics)
- Co-Simulation von MKS und 1-D
- FEM und Ray-Tracing

Trotz all dieser Bemühungen muss explizit darauf hingewiesen werden, dass ein ersatzloses Streichen des Versuches in der Akustikentwicklung noch in weiter Ferne liegt. Gerade wegen der Vielzahl von, für die Simulation herausfordernden, physikalischen Effekten wird der Versuch noch viele Jahre von grundlegender Bedeutung sein. Beispiele hierzu sind.:

- Der hörbare Frequenzbereich bis zu 20 kHz führt zu extrem kleinen Wellenlängen und extrem hoher Abhängigkeit von kleinen Änderungen und somit hoher Anforderung an die Berechnungsmodelle
- Fahrzeugakustik ist immer auch ein Gesamtfahrzeugthema und entsprechend aufwändig ist es Vorhersagen in der Simulation zu machen
- Das finale Kriterium ist immer die subjektive Bewertung mit dem Ohr durch eine Vielzahl von Kunden
- Ein schnelles und effizientes Troubleshooting in der späten Phase rund um den SOP (Start of Production) kann nicht durchgeführt werden wenn der Aufbau von Berechnungsmodellen Wochen dauert und die Ergebnisgüte nicht für eine subjektive Bewertung ausreicht

Ganz grundlegend zusammengefasst sollte das Ziel auch nicht die Abschaffung des Versuches sein, sondern die gemeinsame Nutzung der jeweiligen Vorteile um die Akustikentwicklung optimal voranbringen zu können.

Gleichzeitig muss auch gesagt werden, dass der Versuch nicht das Maß aller Dinge ist. Sowohl Versuch als auch Simulation haben ihre Schwächen und Grenzen welche berücksichtigt werden müssen. Auf der Seite des Versuches muss vor allem das Thema der Streuungen beachtet werden. Dies beginnt bereits bei der Instrumentierung des Versuches [5,6] und zieht sich durch bis zur Auswertung der gemessenen physikalischen Größen z.B. mit Verfahren der Psychoakustik [7]. Doch diese Streuung betrifft nicht nur die Messung als solches sondern bereits den Untersuchungsgegenstand. Fahrzeuge als technisch komplexe Systeme haben durch die Vielzahl an Fertigungstoleranzen eine entsprechende Vielzahl an möglichen akustischen Eigenschaften [8], so dass es die „eine richtige Messung“ gar nicht geben kann.

Trend „Frühe Phase“

Auf der anderen Seite soll immer schneller und immer genauer das akustische Verhalten vorhergesagt werden, da gerade in der frühen Phase die grundlegenden Entscheidungen für ein Konzept gefällt werden [9]. Dies stellt aus folgenden Gründen eine große Herausforderung für die Simulation dar:

- Der Modellstand ändert sich – auch getrieben von anderen Disziplinen – sehr oft und schnell
- Fertigungsdetails sind noch völlig unklar
- Die passiven akustischen Maßnahmen sind noch nicht festgelegt
- Die Informationen haben nicht die nötige Detailierung um eine akustische Aussage tätigen zu können
- Es sind keine Prototypen vorhanden, wodurch eine Kalibrierung von Simulationen nicht möglich ist

Um dieser Herausforderung begegnen zu können empfiehlt es sich die Berechnungen kompakt und einfach und somit schnell zu halten. Zudem sollte man sich davon lösen unbedingt absolute Aussagen als Ergebnis haben zu wollen.

Für eine Entscheidung kann eine relative Aussage „A ist besser als B“ völlig ausreichend sein. Oftmals empfiehlt es sich auch die Ergebnisse mit gemittelten Größen zu beurteilen, da die Unsicherheit für Detailaussagen typischerweise zu hoch ist. Einfachstes Beispiel ist hier die Analyse von Terzbändern.

Exemplarische Beispiele für diese Strategie sind:

- SEA Simulationen (Bestehen aus wenigen Subsystemen und betrachten gemittelte Spektren)
- 1-D Simulationen von Abgasanlagen (Nur grundlegende 1-D Theorie des Rohrs, keine höheren Moden)
- Einfache Ersatzmodelle auf Baugruppenebene welche durch Experimente an Vorgängern kalibriert werden
- Vereinfachte Berechnungsmethoden wie im Folgenden für die Karosserie gezeigt

Beispiel Karosserie

Die Karosserieentwicklung startet typischer Weise im BIW (Body in White) ohne Türen und Klappen und ohne Innenausstattung, wie in Abbildung 5 gezeigt. Somit fehlt ein Großteil der akustisch relevanten Baugruppen und Maßnahmen. Um trotzdem eine Bewertung der Karosserie vornehmen zu können, wird mit den einfachsten Analysen begonnen und dann schrittweise die Komplexität erhöht.

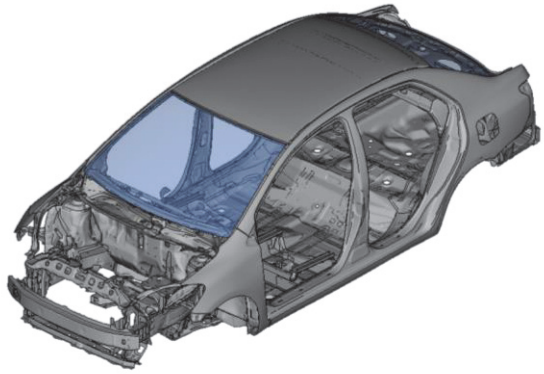

Abbildung 5: Typischer Umfang einer Body in White Karosserie, auf der basierend die Auslegung auch in der Akustik startet.

Typischer Start der Auslegung ist hierbei die statische Steifigkeit. Diese hat primär nichts mit den dynamischen Eigenschaften zu tun. Wenn man aber bedenkt dass sich die dynamische Steifigkeit als Summe der Moden mit ihren Beteiligungen bei gegebener Frequenz ergibt, ist es offensichtlich, dass dies auch bei 0 Hz als Grenzfall gilt, wodurch die statische Steifigkeit eine erste Grundaussage für die Dynamik liefert.

Als nächster Schritt werden die Moden bewertet. Auch wenn sie keine absoluten Ergebnisse erlauben und die auftretenden Lasten nicht berücksichtigen, kann man doch Aussagen über die dynamische Steifigkeit treffen und Schwachstellen mit entsprechender Erfahrung schon erkennen.

Als nächster Schritt empfiehlt sich die Analyse von Eingangsimpedanzen (oft als lokale dynamische Steifigkeiten bezeichnet) und Transferfunktionen der Schwingungsübertragung durch die Karosserie.

Alle diese Analysen haben als Ergebnis noch keine akustischen Quantitäten, sondern nur relative oder mechanische Größen. Der Schritt in die Akustik wird aufgrund der unzureichenden Ausgangsbasis auch nur sehr selten gegangen. Stattdessen werden „pseudoakustische Größen“ verwendet. Bekannteste Größe dieser Art ist der ERP (Equivalent Radiated Power) welcher eine rein strukturdynamische Größe darstellt, am Ende aber die physikalische Einheit der Schallleistung besitzt. Durch die rein auf strukturdynamischen Ergebnissen basierende Berechnung kann dieser Wert äußerst effektiv eine Abschätzung der akustischen Eigenschaften eines Bauteils liefern [10]. Ähnliche Größen welche vor kurzem entwickelt wurden sind der Verbesserte ERP [11] und der Equivalent Sound Pressure (ESP, physikalische Einheit Schalldruck) [12] die in Abbildung 6 exemplarisch verglichen werden.

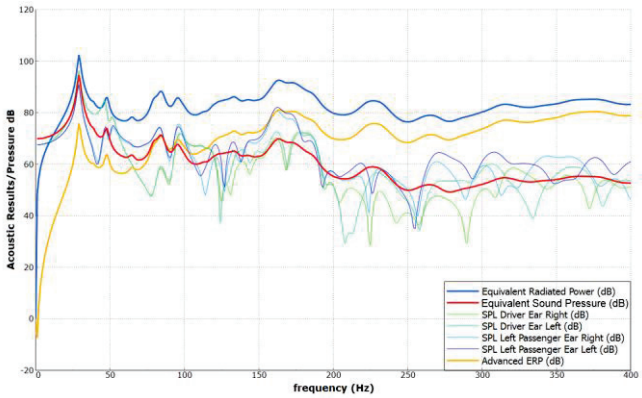

Abbildung 6: Vergleich von simulierten Schalldruckpegeln als Referenz innerhalb einer Fahrzeugkarosserie mit diversen pseudoakustischen Größen (Achtung, der ERP ist keine Druck-, sondern eine Leistungsgröße, ist hier aber trotzdem dargestellt.)

Die Ergebnisse der Berechnungen sollten auch mit entsprechender Sorgfalt ausgewählt und bewertet werden. Denn nicht immer ist die naheliegende Ausgabegröße die Richtige für das untersuchte Phänomen. Dies lässt sich exemplarisch an der Positionierung von Anti-Dröhn-Belägen (auch als Bitumenfolie, Schwermatte oder Dämpfungsbeläge bezeichnet) erläutern. Hier ist die Verschiebung bzw. die Schwingamplitude eine typische Auswertegröße bei der auch der Masseneffekt des Anti-Dröhn-Belags am besten wirkt. Gleichzeitig stellt die Dehnungsenergiedichte das bessere Maß für eine Wirksamkeit der Dämpfung des Anti-Dröhn-Belages dar, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die zentrale Frage ist nun welche der Beiden Größen für die Auslegung verwendet werden soll. Oder ist eine Verbindung der beiden Größen, eventuell mit einer zusätzlichen Gewichtung, am zielführendsten?

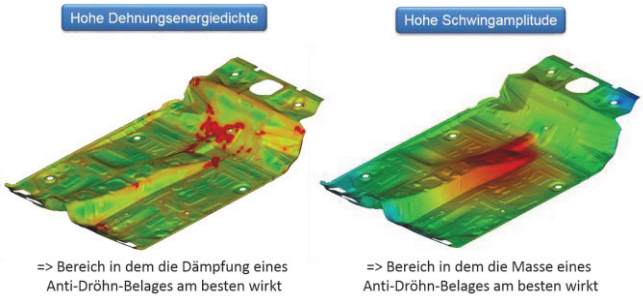

Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der verschiedenen Auswertegrößen einer Simulation zur Positionierung von Anti-Dröhn-Belägen und der damit verbundenen Frage: „Welche Zielgröße ist die Richtige“

Bei diesen spezialisierten Berechnungen muss immer auf die Gültigkeit der zugrunde liegenden Annahmen geachtet werden. Denn im Rahmen der Annahmen stellen sie ein äußerst wertvolles Verfahren dar um mit den genannten Herausforderungen umgehen zu können. Außerhalb der Gültigkeit liefern sie aber oftmals falsche Aussagen welche zu entsprechenden falschen Interpretationen führen.

Ausblick

Abschließend lässt sich sagen, dass sich die beiden gezeigten Trends sicher fortsetzen um den Anforderungen an die virtuelle Akustikentwicklung gerecht zu werden.

Um aber einen Fortschritt zu erreichen muss es gelingen beide Strömungen zu verbinden, um die Erkenntnisse aus den aufwändigen Simulationen in der frühen Phase gewinnbringend einsetzen zu können (Abbildung 8).

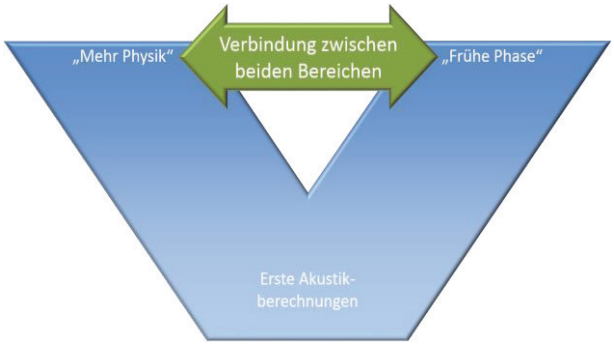

Abbildung 8: Zukünftig wird die Herausforderung in der virtuellen Akustikentwicklung sein die beiden Handlungsstränge wieder zu verbinden.

Ein w#eiterer Punkt wird es sein Versuch und Simulation nicht als Konkurrenten zu sehen, sondern die Vorteile beider zu verbinden um zukünftig die Fahrzeuge akustisch noch besser und technisch noch effizienter gestalten zu können.

Danksagung

Der Autor dankt allen aktuellen und ehemaligen Kollegen die mit den gemeinsamen Arbeiten dazu beigetragen haben die Grundlagen für diese Übersicht zu bereiten.

Literatur

[1] Luegmair, M.: Inadequacies of Beam theories and elements for description of high frequency bending wave propagation in car structures. Interaction of Simulation and Testing: New Requirements and New Opportunities in Structural Dynamics, NAFEMS Conference 2008, 12/1 – 12/11

[2] Herzog, M.; Luegmair, M.: Abbildung von Anti-Dröhn-Belägen in der FEM. Fortschritte der Akustik – DAGA 2015, 837 – 840

[3] Marburg, S.; Nolte, B.: Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids, Finite and Boundary Elements Methods. Springer 2007

[4] Lüsing, N.; Heesel, D.: Einfluss von poroelastischen Materialien auf die simulierte Akustik einer Fahrzeugplattform. Fortschritte der Akustik – DAGA 2016

[5] Mohamady, S.; Vorländer, M.: Statistical uncertainty analysis of an acoustic system. Fortschritte der Akustik – DAGA 2015, 1274 - 1277

[6] Vorländer, M.; Mohamady, S.: Evaluation of the uncertainties of TPA measurements with respect to placement accuracy of source and receiver position. Proceeding of the Aachener Acoustic Colloquium 2015, 187 - 193

[7] Mohamady, S.; Vorländer, M.: Psychoacoustic uncertainty analysis of an acoustical transfer. Fortschritte der Akustik – DAGA 2016

[8] Hills, E., Mace, B.R., Ferguson, N.S.: Acoustic response variability in automotive vehicles. Journal of Sound and Vibration, Volume 321, 2009, 286 - 304

[9] Luegmair; M.; Trost, M.: Status und Trends der NVH-Simulation im Automobilumfeld aus Anwendersicht. NAFEMS-Magazin – Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete 2009, Band 24, 67 – 75

[10] Luegmair, M.; Münch, H.: Bewertung der Gültigkeit von ERP-Berechnungen in der Fahrzeugakustik. Fortschritte der Akustik – DAGA 2014, 100 – 101

[11] Luegmair, M.; Münch, H.: Verbesserte Equivalent Radiated Power (ERP) Berechnung. Fortschritte der Akustik – DAGA 2015, 834 – 836

[12] Luegmair, M.; Lerchl, F.: Entwurf eines Equivalent Sound Pressure zur Abschätzung der akustischen Abstrahlung. Fortschritte der Akustik – DAGA 2016