

## Numerische Auslegung von Infotainment-Systemen in Fahrzeugen

Sören Keuchel<sup>1</sup>, Olgierd Zaleski<sup>1</sup>, Otto von Estorff<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novicos GmbH, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: keuchel@novicos.de

### Einleitung

In heutigen Premium-Fahrzeugen wird eine immer größere Anzahl von Lautsprechern installiert, um die Anforderungen an einen raumfüllenden Klang zu erfüllen. Hierbei spielen einerseits die eingesetzten Lautsprecher und andererseits die Umgebung im Fahrzeug eine wichtige Rolle. Um alle physikalischen Gegebenheiten abzubilden müssen die verschiedenen Disziplinen korrekt miteinander gekoppelt werden. Es werden daher unterschiedliche Vorgehensweisen für die einzelnen Stufen der Modellierung benötigt, um die richtige Übertragungsfunktion vom Spannungseingangssignal bis zum Schalldruck an der Hörposition zu ermitteln.

Die numerische Abbildung beginnt mit dem Lautsprecher der die Übertragung vom Elektromagnetismus über ein Strukturmodell zur akustisch abstrahlenden Membran realisiert. Eine Möglichkeit zur kompletten Abbildung dieser Wirkungskette bietet das 1D Modell der Thiele-Small Parameter [1, 2], bei dem sogar die abgestrahlte Akustik über eine analytische Lösung eines Kolbenstrahlers integriert werden kann. Je nach benötigtem Detailgrad ist es auch möglich komplexere Analysen des Lautsprechers einzusetzen, sowohl bei der Disziplin Elektromagnetismus als auch beim Strukturmodell des Lautsprechers.

Neben der Modellierung der Lautsprecher ist die akustische Abstrahlung in den Fahrzeuginnenraum die zweite, große Herausforderung bei der numerischen Vorhersage des Gesamtsystems. Aufgrund der geringen Abmessungen der Fahrzeugkabine und der unterschiedlichsten Materialien stellt diese Umgebung besondere Anforderungen an das Berechnungsmodell. Soll zudem der gesamte, akustisch relevante Frequenzbereich analysiert werden, müssen für eine effiziente Simulation unterschiedliche Methoden verwendet werden. Im unteren bis mittleren Frequenzbereich bieten sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Boundary-Elemente-Methode (BEM) an, die im oberen Frequenzbereich über energiebasierte Verfahren, wie die Energie FEM (EFEM), ergänzt werden können. Neue Formulierungen erlauben zudem die schnelle Verbindung von Computer Aided Design (CAD) zum Computer Aided Engineering (CAE). Hierbei ermöglicht eine Isogeometrische BEM [3] die direkte Berechnung der akustischen Unbekannten auf den Oberflächen des CAD-Modells ohne dass eine klassische Diskretisierung mit Lagrange-Polynomen notwendig ist. Neben der Methodik ist die Vorgabe der Randbedingungen von enormer Bedeutung [4]. Die unterschiedlichen Materialien benötigen jeweils verschiedene Materialmodelle um die Gegebenheiten des Fahrzeuginnenraums gut wiederzugeben.

### Modellierung von Lautsprechern im Fahrzeuginnenraum

Die Modellierung der gesamten Wirkungskette vom Spannungssignal bis zum Schalldruck an der Hörposition erfordert die Kombination verschiedener physikalischer Disziplinen, die mit jeweils unterschiedlichen Verfahren modelliert werden. Die Verfahren reichen von simplen 1D-Modellen bis hin zu sehr komplexen 3D-Modellen. Die Wirkungsmechanismen und deren numerische Umsetzung sind in Abbildung 1 aufgeführt.

### Multiphysikalisches Lautsprecher-Modell

Eine Möglichkeit zur Beschreibung eines Lautsprechers bilden die Thiele-Small Parameter [1, 2], die es erlauben die Wirkungskette vom Spannungssignal bis zur Akustik darzustellen. Das gesamte elektrische Ersatzschaltbild ist in [5] ausführlich beschrieben. Als Akustikmodell wird ein Kolbenstrahler in einer halbunendlichen Wand verwendet. Dieses analytische Modell für die Akustik verliert in Abhängigkeit der Umgebung des Lautsprechers seine Gültigkeit. Insbesondere in einem komplexen Fahrzeuginnenraum kann dieses Modell nicht mehr zu validen Ergebnissen führen. Daher wird nur ein Teilmodell der Thiele-Small Parameter eingesetzt und die Akustik-Simulation mit einem detaillierteren Modell durchgeführt. Die Beschreibung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Lautsprechers haben eine breitere Gültigkeit im Frequenzbereich und erlauben valide Ergebnisse. Für besonders genaue Analysen kann das Modell auch durch ein komplexeres Strukturmodell ersetzt werden, um beispielsweise Teilschwingungen der Membran oder Wechselwirkungen des Lautsprechers mit der Karosserie oder dem Gehäuse-Volumen zu realisieren.

### Akustisches Modell

Bei der Abstrahlung des Lautsprechers hat das akustische Modell einen sehr großen Einfluss auf die Güte der Ergebnisse. Das zuvor erwähnte 1D Akustikmodell [6] besitzt nur eine begrenzte Verwendungsmöglichkeit bei der Auslegung von Infotainment-Systemen. Im niedrigen bis mittleren Frequenzbereich führt, neben der FEM, die BEM zu sehr guten Ergebnissen. Der effiziente Einsatzbereich kann durch die Verwendung der Fast-Multipole-Methode [7] noch erhöht werden.

Bei der Simulation von Tieftönern ist die Wechselwirkung mit der Struktur zu berücksichtigen, da die großen Abmessungen der Chassis auch die Karosserie oder die Verkleidung in Schwingung versetzen können. Hieraus ergeben sich sekundäre Schallpfade, die zu störenden Effekten führen. Wird ein solches Problem erst beim realen Prototypen festgestellt, so sind die Gegenmaßnahmen nur

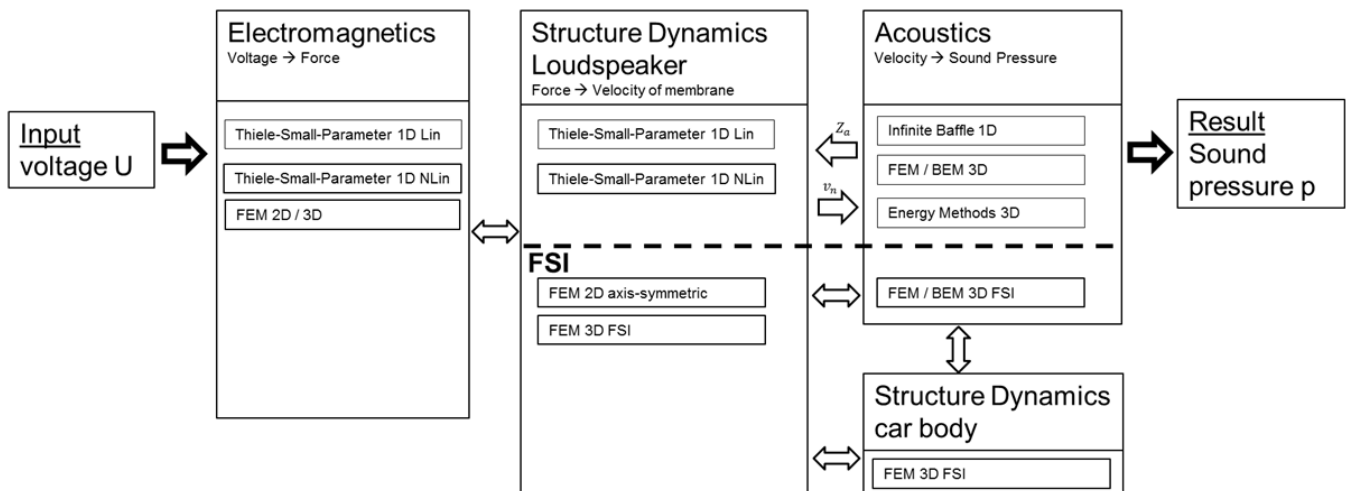


Abbildung 1: Darstellung der physikalischen Disziplinen und den möglichen Methoden

noch schwer umzusetzen oder sehr teuer. Hier hilft das frühe Wissen über die strukturelle Wechselwirkung, um kostengünstige Maßnahmen noch umzusetzen.

Eine besondere Herausforderung im Mitteltonbereich ist die korrekte Abbildung der Materialien im Innenraum. Es besteht die Möglichkeit simple Modelle, wie zum Beispiel eine Impedanz, vorzugeben oder aber auch detailliertere Modelle, wie zum Beispiel die Materialbeschreibung über die Biot-Parameter. Falls die genauen Daten noch nicht vorliegen, da der Entwicklungsstand noch sehr früh ist, kann auch eine Unsicherheiten-Analyse durchgeführt werden. Anstelle einer einzelnen Ergebniskurve ergibt sich als Resultat ein Vertrauensintervall.

Im Hochtonbereich ist die Rechenzeit das entscheidende Kriterium, da eine genaue Abbildung aller Wellenphänomene nicht mehr effizient möglich ist. Um trotzdem eine Aussage über die Qualität des Infotainment-Systems liefern zu können, werden energiebasierte Verfahren eingesetzt. Bekannte Vertreter sind hierbei das Ray-Tracing oder auch die Statistische Energie Analyse (SEA). In diesem Beitrag wird die Energie FEM verwendet. Diese basiert auch auf den energetischen Annahmen, aber erlaubt die Berechnung auf einer klassischen FEM-Diskretisierung. Die Berechnung kann somit im gesamten Frequenzbereich mit der gleichen Elementgröße durchgeführt werden.

### Numerische Beispiele

Die Beispiele basieren auf einem generischen Fahrzeuginnenraum. Die Diskretisierung ist mit einer Kantenlänge von  $l = 24$  mm realisiert und wird in Abbildung 2 dargestellt. Das Modell ist daher bis ca. 2.000 Hz einsetzbar, unter der Annahme von 6-10 Elementen pro Wellenlänge.

Der Aufbau erlaubt die Platzierung von 14 Lautsprechern, die aus verschiedenen Chassis bestehen können. Im Beispielfall werden folgende Lautsprecher verwendet und entsprechend nummeriert:

- Center: 1. Mitteltöner,

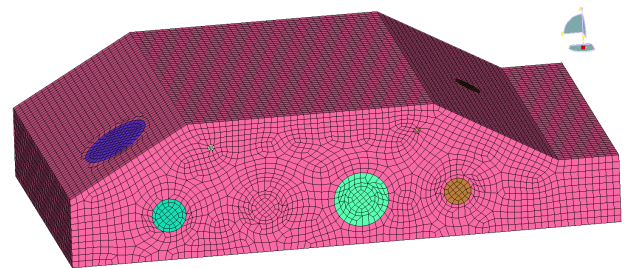
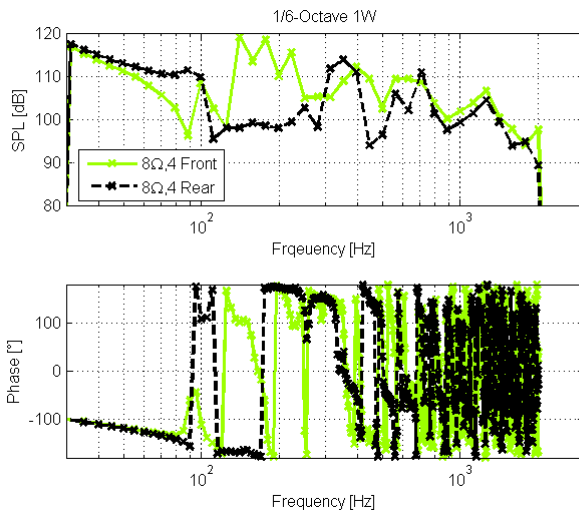


Abbildung 2: Diskretisierung des Fahrzeuginnenraums mit einer Elementgröße  $l = 24$  mm

- Vordere Tür: 2. Hochtöner,
- Vordere Tür: 3. Mitteltöner,
- Vordere Tür: 4. Tieftöner,
- Hintere Tür: 5. Hochtöner,
- Vordere Tür: 7. Tieftöner,
- Kofferraum: 8. Subwoofer.

Die Thiele-Small Parameter entsprechen charakteristischen Werten für die einzelnen Chassis-Klassen. Die Randbedingungen sind im Innenraum als reellwertige Impedanz mit einer Absorption von  $\alpha = 0,05$  vorgeschrieben. Diese Werte müssen bei einem realen Fahrzeug den entsprechenden Materialien der Verkleidung angepasst werden. Im Folgenden wird zunächst das Ergebnis eines Lautsprechers im Frequenzbereich bis 2.000 Hz dargestellt. Anschließend wird die Möglichkeit des Tunings erläutert und abschließend die Modellierung im gesamten Frequenzbereich mithilfe der EFEM gezeigt.

Die Simulation eines Lautsprechers ist in Abbildung 3 gezeigt. Das Bode-Diagramm stellt den Schalldruckpegel an den zwei Hörpositionen „Front“ und „Rear“ dar und erlaubt die Bestimmung der Phase, die im späteren Verlauf aufgrund der kohärenten Überlagerung der Quellen relevant wird. Diese Informationen werden benötigt um Auslöschungseffekte in Abhängigkeit der Position zu erklären und Gegenmaßnahmen zu entwickeln.

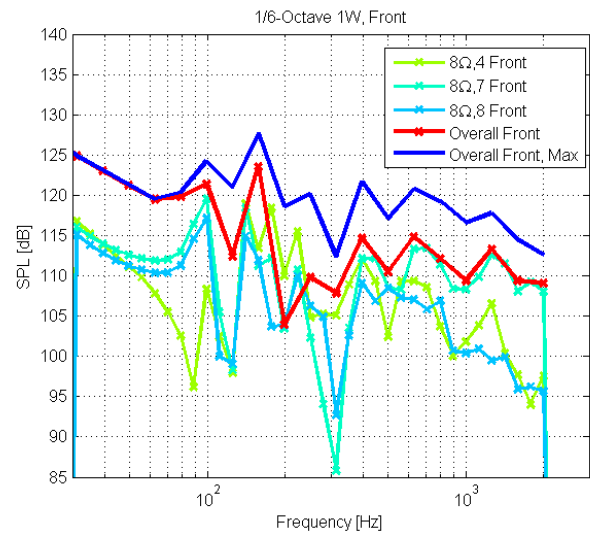


**Abbildung 3:** Bode-Diagramm für den Lautsprecher 4 von 30 Hz bis 2 kHz

Eine wichtige Stufe bei der Auslegung des Systems ist das Tuning der Lautsprecher. Digitale Filter erlauben die Nachjustierung der einzelnen Kanäle über verschiedene Mechanismen. Es lässt sich sowohl eine Verstärkung als auch eine Abschwächung des Signals realisieren, wobei die mögliche Erhöhung des Signals von den Reserven des eingesetzten Verstärkers abhängt. Alternativ können über ein Time-Delay auch die Phasen der einzelnen Lautsprecher zueinander verändert werden. Die erzeugte Interferenz erzeugt bei den Frequenzen unterschiedliche Schalldruck-Verteilungen im Innenraum, die an die Hörpositionen angepasst werden. Eine Änderung aller Parameter unter Berücksichtigung unterschiedlicher Hörpositionen ist für den Tonmeister eine zeitaufwändige Arbeit. Hierbei kann die numerische Auslegung unterstützend eingesetzt werden, um ein gewisses Basis-Tuning schon in einem frühen Entwicklungsstadium zu erzielen, sodass der Tonmeister mehr Zeit für das Fine-Tuning des Systems hat. Das simulierte Tuning beginnt nachdem die Position und Auswahl der Lautsprecher erfolgt ist. Hieraus ergibt sich für die jeweiligen Frequenzbereiche eine Überlagerung der einzelnen Lautsprecher. Für den Bass-Bereich ist diese Darstellung in Abbildung 4 aufgeführt.

Das System ohne Tuning weist nun die system-typischen Peaks und Dips auf, die aus der kohärenten Addition der Quellen entsteht. Zum einen ist der aktuelle Schalldruckpegel aller Bass-Lautsprecher und die einzelnen Beiträge der jeweiligen Lautsprecher und zum anderen der maximal mögliche Pegel bei einer phasengleichen Addition dargestellt. Diese Kurve stellt das Maximum dar, das bei gleich bleibender Leistung erzielt werden könnte. Ein Ziel ist es, einen möglichst linearen Verlauf zu erzeugen. Dieser erlaubt dann die Wiedergabe des Musikmaterials in der Form, wie es bei der Abmischung im Tonstudio gewünscht wurde.

Die Berechnung des Schalldruckpegels im gesamten Frequenzbereich ist nur mit dem Einsatz von energetischen



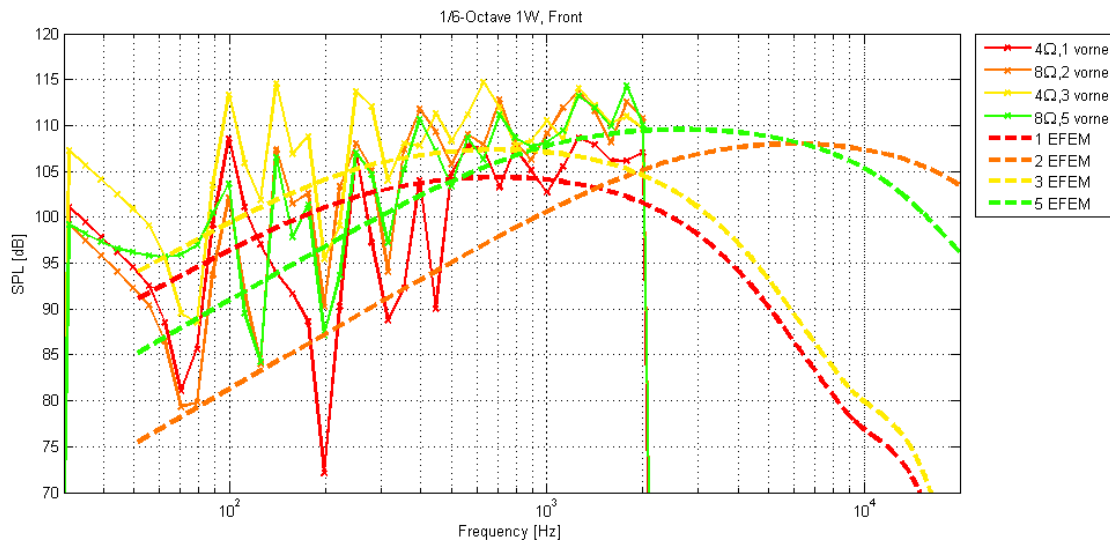
**Abbildung 4:** SPL, Beiträge der einzelnen Tieftöner und des maximal möglichen Pegels bei Phasen Anpassung von 30 Hz bis 2 kHz

Methode effizient möglich. In Abbildung 5 ist der Schalldruckpegel im gesamten, akustisch relevanten Frequenzbereich bis 20 kHz simuliert.

Hierbei werden die Mittel- und Hochtöner des Systems untersucht. Im unteren Frequenzbereich zeigt sich, dass die energetischen Verfahren einen Mittelwert der Kurven abbilden, die mit der konventionellen BEM berechnet wurden. Es ist außerdem zu sehen, dass die modal dominierten Effekte im Fahrzeuginnenraum in Richtung der hohen Frequenzen weniger deutlich werden. Dies bestätigt die Gültigkeit der energetischen Verfahren im hohen Frequenzbereich. Das Wissen über das Verhalten gesamten Frequenzbereich ist wichtig für die Auslegung des Systems, da die Wiedergabe von hohen Frequenzen eine entscheidende Rolle bei der Wertigkeit der Infotainment-Systeme spielt.

## Zusammenfassung

Der Beitrag stellt eine Methodik zur numerischen Auslegung von Infotainment-Systemen in Fahrzeugen vor. Hierbei müssen die verschiedenen physikalische Disziplinen miteinander gekoppelt werden, um die Wirkungskette vom Spannungssignal an den Lautsprecheranschlüssen bis zur Hörposition im Fahrzeuginnenraum wiederzugeben. Jede der Disziplinen stellt besondere Anforderungen an das mathematische Modell und dessen numerische Umsetzung. Für die Teildisziplinen wurden unterschiedliche Möglichkeiten aufgeführt und die Kopplung erläutert. Der gesamte Ablauf wird anhand eines generischen Fahrzeuginnenraums präsentiert und ein beispielhaftes Vorgehen zur Auslegung dargestellt. Es wird die Simulation einzelner Lautsprecher, die Kombination verschiedener Lautsprecher im gesamten Frequenzbereich und das digitale Tuning des Systems gezeigt.



**Abbildung 5:** SPL, BEM und EFEM Simulation der Mittel- und Hochtöner im gesamten, akustische relevanten Bereich bis 20 kHz

## Literatur

- [1] N. Thiele, Loudspeakers in Vented Boxes: Part 1, *Journal of the Audio Engineering Society* 19 (5) (1971) 382–392.
- [2] R. H. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems-Part 1: Analysis, *Journal of the Audio Engineering Society* 20 (10) (1972) 798–808.
- [3] S. Keuchel, N. Hagelstein, O. Zaleski, O. von Estorff: Evaluation of hypersingular and nearly singular Integrals in the Isogeometric Boundary Element Method for Acoustics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 325 (Supplement C) (2017) 488 – 504.
- [4] M. Aretz, M. Vorländer: Combined Wave and Ray based Room Acoustic Simulations of Audio Systems in Car Passenger Compartments, Part I: Boundary and source data, *Applied Acoustics* 76 (2014) 82–99.
- [5] L. Beranek, T. Mellow, *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, Elsevier Science, 2012.
- [6] P. M. Morse, K. U. Ingard: *Theoretical Acoustics*, Princeton University Press, 1968.
- [7] S. Keuchel, K. Vater, O. von Estorff: hp Fast Multipole Boundary Element Method for 3D Acoustics, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 110 (9) (2017) 842–861.