

Multiphysikalische Simulationsmethoden für Lautsprecher – eine (un)endliche Geschichte?

Alfred J. Svobodnik

Konzept-X GmbH, Karlsruhe, Deutschland

1 Einleitung

Wie viele andere Industriezweige auch ist die Audioindustrie gefordert ihre Effizienz in der Produktentwicklung stetig zu verbessern. Computer Aided Engineering (CAE) basierend auf Simulation und Analyse der funktionalen Performance von Produkten spielt dabei bereits seit über 20 Jahren eine Schlüsselrolle. Heutzutage werden CAE Methoden in jeder Phase der Produktentwicklung, von ersten Konzeptstudien bis zu Detailanalysen für die finale Produkteinführung (inklusive der Modellierung von Fertigungsprozessen), eingesetzt. Da in jüngster Zeit CAE Technologien immer früher im Entwicklungsprozess eingesetzt werden, hat sich der Begriff „frontloaded Virtual Product Development (VPD)“ etabliert. Die Vorteile dieser Entwicklung sind:

- Mehr Freiheit bei Konstruktionsänderungen
- Konstruktionsänderungen sind mit niedrigeren Kosten verbunden

Diese Vorteile unterstützen aber auch ganz allgemein die Forderung nach Effizienzsteigerung im Produktentwicklungsprozess (Fakten aus der Automobilindustrie sind in [1] nachzulesen).

Dieser „frontloaded“ Ansatz wurde erstmals erfolgreich in der Automobil- und Luftfahrtindustrie eingesetzt. Ein gutes Beispiel für VPD ist die Entwicklung von Fahrzeugstrukturen optimiert hinsichtlich Crash, Betriebsfestigkeit und Schwingungen. Heutzutage ist VPD praktisch für alle Industriezweige eine zwingende Anforderung.

Die hier vorliegende Arbeit betrachtet überblicksartig die fortschrittliche Modellierung für realistische Simulationen von Lautsprechern. Ausgehend von einer Beschreibung der grundlegenden Theorie der Modellierung des multiphysikalischen Verhaltens von elektrodynamischen Lautsprechern mittels Finiter und Randelemente wird anhand eines industriellen Beispiels die Effizienz, insbesondere im Sinne der Genauigkeit, demonstriert. Abschließend werden die numerischen Verfahren für jedes wesentliche physikalische Gebiet (Elektromagnetismus, Strukturmechanik und Luftschall) diskutiert.

2 Theorie der multiphysikalischen Modellierung von Lautsprechern

Bereits seit mehreren Jahrzehnten werden Lautsprecher als multiphysikalische Bauteile betrachtet. Schon in den frühen 1970ern wurden im Rahmen von diversen AES Veranstaltungen mehrere Veröffentlichungen präsentiert [2], die schließlich in die sogenannten, und mittlerweile als Industriestandard etablierten, „Thiele-Small Parameter“ mündeten. A.N. Thiele und R.H. Small entwickelten einen Satz von Parametern und eindimensionalen Gleichungen die das Verhalten eines Lautsprechers in Wechselwirkung mit einem Gehäuse und der daraus resultierenden Schallabstrahlung beschreiben. Diese ersten Lumped Parameter Modelle wurden über Jahrzehnte stetig weiterentwickelt, und werden auch heute noch, wenn auch in erweiterter Form, insbesondere für die Vorauslegung, verwendet. Vor allem die Erweiterungen von W. Klippel [3] zum Großsignalverhalten müssen hier erwähnt werden.

Diese Lumped Parameter Modelle haben allerdings alle den Nachteil dass sie auf eindimensionalen, skalaren Gleichungen basieren, um ein physikalisches Gebiet zu beschreiben. Für den Bereich des Elektromagnetismus hat sich dies als sehr effizient herausgestellt. Für das mechanische und akustische (Luftschall) Gebiet ergeben sich allerdings einige wesentliche Einschränkungen. Für das mechanische System können damit beispielsweise nur kolbenförmige Bewegungen beschrieben werden. Damit ist der anwendbare Frequenzbereich stark limitiert. Bei höheren Frequenzen ist das Schwingverhalten nicht mehr kolbenförmig, und es muss ein multidimensionaler Modellierungsansatz verwendet werden.

Diese Tatsache führte schließlich zur Entwicklung von Matrizenverfahren für die Modellierung von Lautsprechern. Im den folgenden Abschnitten wird daher ein stark gekoppeltes elektro-mechano-akustisches Simulationsmodell präsentiert, welches auf einem Lumped Parameter Modell für den Elektromagnetismus, einem Finite Elemente Modell für die Mechanik und einem Finite bzw. Randelementemodell für den Luftschall basiert.

2.1 Elektromagnetismus des Motorsystems

Im Lumped Parameter Modell zur Beschreibung des Elektromagnetismus des Motorsystems ist die elektrische Kraft f_e die auf die Spule wirkt, unter Voraussetzung einer konstanten Spannung U , definiert als:

$$f^e = U \frac{Bl}{R + i\omega L} - \frac{(Bl)^2}{R + i\omega L} v^e = f^{e,L} + f^{e,EMF}$$

Dabei ist B die Flussdichte, l die Länge der Spule in B , R der Gleichstromwiderstand, L die Induktivität und v_e die Schnelle der Spule. $f^{e,L}$ ist die Lorentzkraft und $f^{e,EMF}$ ist die elektromagnetische Rückhaltekraft.

2.2 Strukturdynamik

Die beschreibenden Gleichungen für die mechanischen Schwingungen im Frequenzbereich, diskretisiert mittels Finiter Elemente, können wie folgt beschrieben werden:

$$(K^m + i\omega D^m - \omega^2 M^m) u^m = f^m$$

Auf den ersten Blick erscheinen Lumped Parameter Modell und Matrixmodell sehr ähnlich. Der große Unterschied liegt allerdings in der Dimension des Systems. Im Finiten Elemente Modell werden Steifigkeit, Masse und Dämpfung mittels Matrizen beschrieben. K^m ist die Steifigkeitsmatrix, D^m ist die Dämpfungsmatrix und M^m ist die Massenmatrix. u^m ist der Vektor der Verschiebungen und f^m ist der Vektor der mechanischen Kräfte, der das System anregt. ω ist die Kreisfrequenz. Typischerweise liegt die Dimension bei mehreren tausend Freiheitsgraden. Damit kann das Modell für den gesamten Hörbereich, also von 20 Hz bis 20 kHz, verwendet werden.

2.3 Luftschall

Matrizen zur Beschreibung eines physikalischen Gebietes werden auch für den Luftschall verwendet. Die Helmholtz Gleichung, diskretisiert mittels Finiter oder Randelemente, zur Beschreibung der dreidimensionalen Ausbreitung von Schallwellen im Frequenzbereich sieht dabei wie folgt aus:

$$B^a p^a = f^a$$

B^a ist dabei eine akustische Koeffizientenmatrix die den Zusammenhang zwischen dem Vektor des Schalldrucks p^a und dem Vektor der Effekte einfallender Schallwellen f^a beschreibt. Damit ist es möglich die Schallabstrahlung, inklusive Reflexion und Beugung, unter detaillierter Berücksichtigung der (CAD basierten) Geometrie zu beschreiben.

2.4 Das gekoppelte multiphysikalische System

Werden nun alle beschreibenden Gleichungen der verschiedenen physikalischen Gebiete miteinander verknüpft, so erhalten wir das folgende gekoppelte Gleichungssystem zur Beschreibung der Multiphysik von elektroakustischen Wandlern im Frequenzbereich:

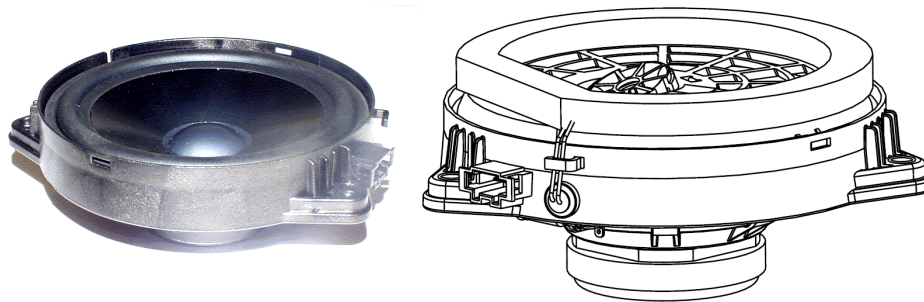
$$\begin{bmatrix} K^m + i\omega(D^m + D^e) - \omega^2 M^m & C^{ma} \\ C^{am} & B^a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^m \\ p^a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^{e,L} \\ f^a \end{Bmatrix}$$

C^{ma} und C^{am} sind Koppelmatrizen, die den mechanischen und akustischen Bereich verbinden, und entstehen unter der Annahme der Kontinuität von Schnelle und Druck im mechanischen und akustischen Gebiet in Normalrichtung zur Koppelfläche. D^e ist eine elektromagnetische Dämpfungsmatrix, welche von der elektromagnetischen Rückhaltekraft hergeleitet wurde. Nähere Details dieser Theorie können in [4] nachgelesen werden.

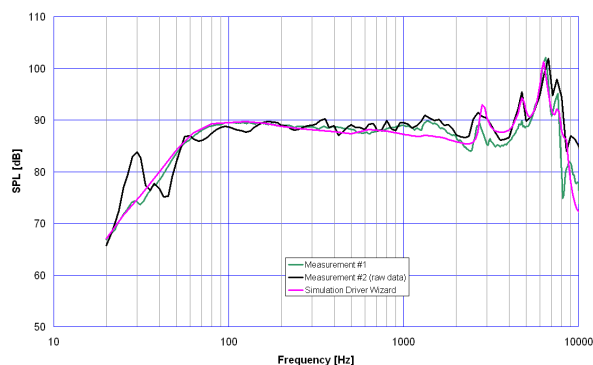
An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass alleine die Verwendung eines gekoppelten multiphysikalischen Modells noch nicht zu realistischen Simulationen führt. Zusätzlich werden genaue Beschreibungen der Materialeigenschaften im elektrischen und mechanischen Gebiet benötigt. Ein Schlüsselaspekt hier sind sicherlich speziell entwickelte Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen und mechanischen Materialparameter.

3 Ein industrielles Beispiel einer realistischen Lautsprechersimulation

Während im „realen“ Entwicklungsprozess ein „realer“ Lautsprecher im schalltoten Raum vermessen wird, wird in der „virtuellen“ Welt ähnlich vorgegangen. Ein Beispiel eines typischen Basslautsprechers für die Wiedergabe von tiefen Frequenzen ist in folgendem Bild ersichtlich:



Die nachstehende Grafik zeigt einen Vergleich von Messung und Simulation des abgestrahlten Schalldrucks auf Lautsprecherachse. Die Genauigkeit der Simulation basierend auf der zuvor dargestellten Theorie ist innerhalb der Fertigungstoleranzen – wir können dies daher als realistische Simulation bezeichnen.



4 Besondere Herausforderungen in den einzelnen physikalischen Gebieten

Die allgemein größte Herausforderung besteht sicherlich in der starken Koppelung aller beteiligten physikalischen Gebiete. Starke Koppelung bedeutet hier die bi-direktionale Interaktion aller Gebiete.

4.1 Elektromagnetismus

Das Motorsystem kann typischerweise als axisymmetrische Struktur betrachtet, und daher in den meisten Fällen 2D Modelle eingesetzt werden. Wichtig ist hier die starke Koppelung der Schwingspule, die sich im Luftspalt des Magnetsystems bewegt, zum mechanischen Schwingsystem des Lautsprechers. Für manche Motorstrukturen ist auch die Variation des magnetischen Feldes in axialer Richtung entscheidend. Es werden daher für die Entwicklung und Optimierung der Antriebssysteme typischerweise Finite Elemente Methoden eingesetzt.

Bei großen Bewegungen der Schwingspule, wenn also der Lautsprecher im Bereich der Nominalleistung betrieben wird, bewegt sich ein wesentlicher Teil der Spule außerhalb des Hauptfeldes, und es wird daher eine niedrigere mechanische Kraft induziert. Zusätzlich hängt die Induktivität der Spule ebenfalls von der Auslenkung ab. Diese nichtlinearen Effekte sind sehr wichtig, und die Ursache für unerwünschte Verzerrungen des abgestrahlten Schalldrucks. Damit werden nichtlineare Modelle für die Vorhersage des Lautsprecherverhaltens bei großen Signalen benötigt.

Für Betrachtungen auf System- oder Subsystemebene, ohne der Anforderung ein Motorsystem zu entwickeln und optimieren, können 1D Lumped Parameter Modelle, allerdings unter Berücksichtigung der wesentlichen Nichtlinearitäten, sehr effizient verwendet werden.

4.2 Strukturmechanik

Wie in Kapitel 2 erwähnt, muss der Strukturbereich mittels Finiter Elemente modelliert werden, um nicht-kolbenförmigen Schwingungen berücksichtigen zu können. Da auch umlaufende Biegeformen auftreten können, müssen 2D Modelle mit besonderer Vorsicht verwendet werden. In den meisten Fällen sollten daher 3D Modelle verwendet werden. Eine weitere Herausforderung stellen

dünnwandige Strukturen wie Membrane und Staubkappe (aber auch Sicke und Spinne) dar. Eine 3D Modellierung basierend auf Volumselementen führt hier zu äußerst unhandlichen Modellen. Es werden daher typischerweise Schalenmodelle für die Modellierung des Schwingensystems verwendet.

Bei großen Signalen, und damit großen Auslenkungen, entstehen wesentliche nichtlineare Effekte aufgrund des Materialverhaltens und der Veränderung der Geometrie, die zu einer deutlichen Änderung der mechanischen Steifigkeit führen, und zu Verzerrungen in der Schallabstrahlung führen. Auch wenn wir ein super-lineares Material verwenden würden, ohne jegliche materielle Nichtlinearitäten und damit ohne Änderung der materiellen Steifigkeit, würde die Änderung der sogenannten geometrischen Steifigkeit zu Verzerrungen führen. Zusätzlich kommt es durch die Änderung der geometrischen Steifigkeit zu Instabilitäten, wie Durchschlagen oder Verzweigen, die eine weitere Quelle starker Verzerrungen darstellt.

4.3 Luftschall

Die besondere Herausforderung in diesem Gebiet ist die starke Koppelung zum Strukturbereich. Dies bedeutet, dass die Bewegung des Schwingensystems einen Einfluss auf das akustische Medium, also Luft – Schallwellen werden erzeugt – und umgekehrt die umgebende Luft das Schwingverhalten der Membrane beeinflusst. Man spricht daher auch vom Effekt der zusätzlichen Masse und Steifigkeit.

Bei bestimmten Anwendungen, zum Beispiel kleine Wandler für mobile Geräte oder Hornlautsprecher für professionelle Beschallungsanlagen, müssen auch viskose Effekte der Luft berücksichtigt werden. Schallenergie wird hierbei in Wärmeenergie umgewandelt; man spricht auch von viskothermischen Effekten. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf das abgestrahlte Schallfeld, und stellt eine weitere Quelle für nichtlineare Effekte dar.

5 Ausblick

Nun sollten die besonderen Herausforderungen für realistische Lautsprechersimulationen bekannt sein – eine Menge wichtiger Details die Bestandteil des gesamten Puzzles sind. Für alle wesentlichen Herausforderungen existieren auch Lösungsmöglichkeiten. Diese sind nicht als Softwaresystem, sehr wohl aber als Prozessmodell, vom Autor entwickelt, verfügbar.

6 References

- [1] AUTOSIM Consortium, "Current & Future Technologies in Automotive Engineering Simulation", NAFEMS, 2008
- [2] R.E. Cooke, "Loudspeakers, An Anthology, Vol.1 – Vol.25 (1953-1977)", AES Audio Engineering Society, New York, 1978
- [3] W. Klippel, "Diagnosis and Remedy of Nonlinearities in Electrodynamical Transducers", 109th AES Convention, 2000
- [4] A.J. Svobodnik, et. al., "Fluid-Structure Interaction in Computational Acoustics Including Viscothermal Wave Propagation Using Finite and Boundary Elements", Fifth World Congress on Computational Mechanics, 2002