

## Simulation musikangeregter Störgeräusche bei Fahrzeugtüren

Stratos Boutloukos<sup>1</sup>, Marinus Luegmair<sup>2</sup>, Christian Triebel

<sup>1</sup> ARRK Engineering, Berechnung NVH, 70563 Stuttgart, E-Mail: stratos.boutloukos@arrk-engineering.com

<sup>2</sup> ARRK Engineering, CoC Akustik, 80807 München, E-Mail: marinus.luegmair@arrk-engineering.com

### Einleitung

Die Störgeräuschanalyse ist in den letzten Jahren ein fester Bestandteil bei der Entwicklung neuer Fahrzeugmodelle geworden, was vor allem den stetig steigenden Kundenansprüchen hinsichtlich Qualität und Komfort und der Reduzierung der Hauptgeräuschquellen der Fahrzeuge (Abroll-, Wind- und Antriebsgeräusche) geschuldet ist. Durch immer kürzere Entwicklungszeiten gewinnt insbesondere die Simulation von möglichen Klapper- und Knarzstellen weiter an Bedeutung. Werden potentielle Störgeräusche schon in frühen Projektphasen erkannt, können diese verhältnismäßig günstig und einfach behoben werden [1].

Störgeräusche entstehen im Allgemeinen durch die Relativbewegung und den Kontakt zwischen zwei schwingenden Bauteilen und können bezüglich ihrer Entstehungsart in Anschlag- („Klappern“) und Stick-Slip-Geräusche („Knarzen“) unterteilt werden. Die zugrunde liegenden Bauteilschwingungen können nicht nur durch Straßen- oder Antriebsvibrationen, sondern auch durch die Anregung der Struktur über die Audioanlage verursacht werden.

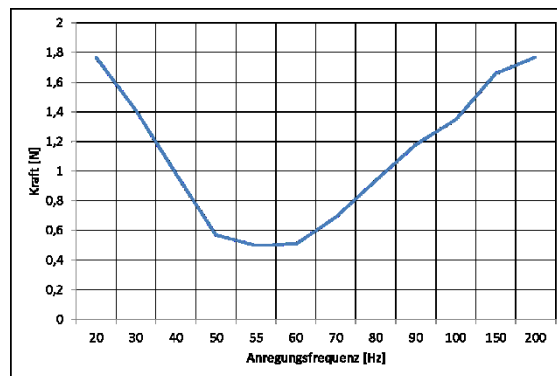
Im Folgenden wird eine effiziente Methode zur Simulation der Störgeräuschneigung bei Musikanregung beispielhaft an einer Fahrzeugtüre gezeigt. Diese Methode beinhaltet die Modellierung des Lautsprechers innerhalb der Struktur-FEM und die Abbildung des Türrohbaus inklusive innenliegendem Fluid und der relevanten Verkleidungsteile. Um den Simulations- und Auswertungsaufwand für schnelle Reaktionszeiten gering zu halten werden nur Relativbewegungen der Bauteile und keine Schalldruckpegel untersucht, was für die virtuelle Entwicklung auch ausreichend ist.

### Modellierung des Lautsprechers

Die Modellierung des Lautsprechers kann innerhalb der FEM mit sehr hoher physikalischer Güte erfolgen und alle auftretenden elektrischen Felder sowie mechanische Kopplungen inklusive Nichtlinearitäten abbilden [2]. Da dies zu einem sehr hohen Modellierungsaufwand und langen Rechenzeit führt, wird im Folgenden ein rein linearer und mechanischer Ansatz gewählt. Hierdurch ist eine Simulation im Frequenzbereich möglich, was die Rechenzeiten weiter reduziert. Diese kurzen Zeiten sind nötig, da im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung Designvarianten sehr schnell bewertet werden müssen.

Die Modellierung des elektromagnetischen Teils und des rückwirkenden Teils der Mechanik des Lautsprechers erfolgt über ein elektrisches Ersatzschaltbild. Hierzu werden die

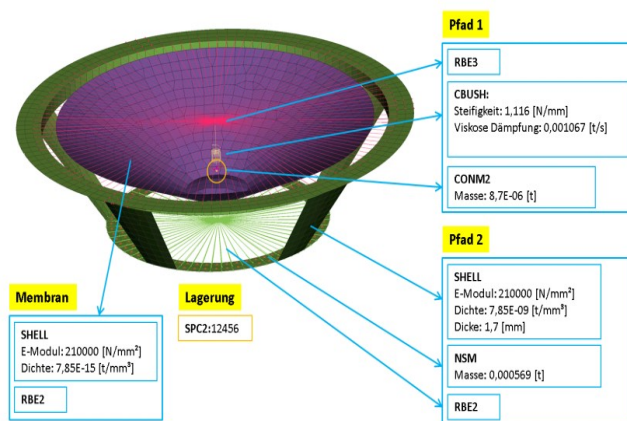
Thiele-Small-Parameter genutzt welche standardmäßig vom Lautsprecherhersteller zur Verfügung gestellt werden [2]. Aus dieser Analyse ergibt sich dann die anregende Kraft des Lautsprechers, wie in Abbildung 1 exemplarisch für ein weißes Rauschen als Eingangssignal gezeigt.



**Abbildung 1:** Exemplarische Impedanzkurve zur Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften des Lautsprechers bei der Berechnung der Anregungskraft.

Diese Kraft multipliziert mit dem Anregungsspektrum ergibt dann die Eingangsgröße für die FEM-Simulation.

Der mechanische Teil des Lautsprechers wird wie in Abbildung 2 gezeigt modelliert.

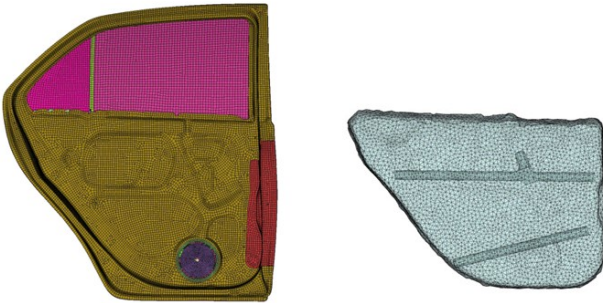


**Abbildung 2:** Modellierung des Lautsprechers (mechanischer Teil) in der FEM mit den verwendeten Elementen (NASTRAN) und Parametern.

Hierbei werden alle Teile die sowohl relevante Masse als auch Steifigkeit besitzen als Schalen (SHELL) modelliert. Teile die keine relevante Masse besitzen werden über Rigid-Body-Elemente (RBE) abgebildet. Zuletzt werden Teile mit vernachlässigbarer Steifigkeit nur durch ihre diskrete Masse abgebildet (CONM2 und NSM). Dadurch ergeben sich ein geringer Modellaufwand und eine geringe Anzahl an Freiheitsgraden.

## Modellierung der Tür

Die Tür wird mit üblicher Genauigkeit und Elementansätzen der industriellen Anwendung vernetzt. Dadurch können vorhandene Programme und Vorgehensweisen, bzw. vorhandene Netze, genutzt werden. Zusätzlich zur Türstruktur mit dem beschriebenen Lautsprechermodell in Abbildung 3, wird die komplette Innenverkleidung als Ort der Störgeräuschenstehung und das Fluid innerhalb der Tür abgebildet.

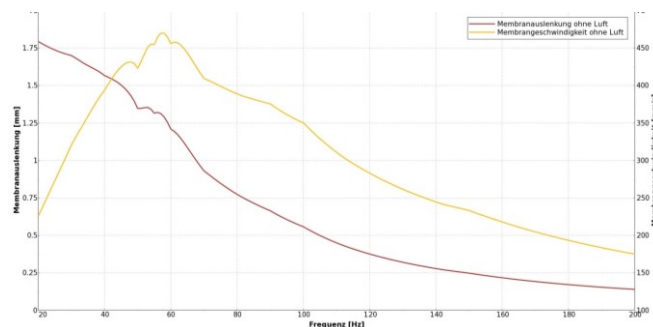


**Abbildung 3:** Links: Modell der Tür inklusive Lautsprecher (Ohne Verkleidung). Rechts: Netz des Türfluid für die gekoppelte Simulation.

Das Fluid wird mit Volumenelementen und die Türverkleidung mit Schalen abgebildet. Bei der Verkleidung ist zudem wichtig, dass die Anbindungen detailliert und mit dem richtigen Verhalten modelliert werden. Denn nur durch eine realistische Abbildung der Verbindungstechnik kann die Störgeräuschneigung gut vorhergesagt werden.

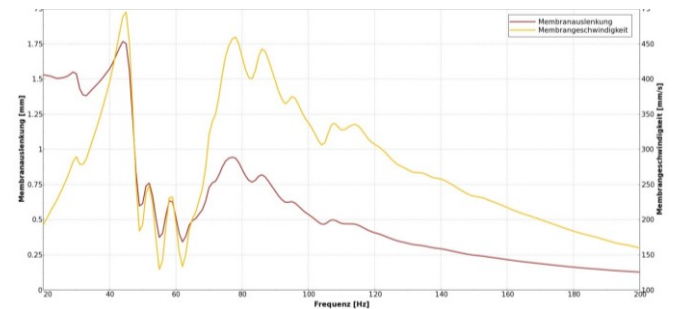
## Berechnungsablauf

Wie bereits erläutert wird die Simulation aus effizienzgründen im Frequenzbereich durchgeführt. Die betrachteten Frequenzen liegen dabei im Bereich von 20 Hz bis einige Hundert Hertz. Die entstehenden Störgeräusche sind durch ihren transienten Charakter meist in einem höheren Frequenzbereich angesiedelt und, die Ursache der Störgeräusche liegt aber in den niederfrequenten Schwingungen der ersten Moden der Verkleidungsteile. Da das Ziel nicht die Abbildung des Geräusches, sondern die Vermeidung der Ursachen ist, reicht dieser niedrige Frequenzbereich für die Entwicklung von Abhilfemaßnahmen aus.



**Abbildung 4:** Membranauslenkung und -geschwindigkeit des Lautsprechers, wenn die Rückkopplung des Fluid im Türinneren vernachlässigt wird.

Um den Einfluss der Fluid-Struktur-Kopplung auf die Schwingungsanalyse beziffern zu können, wurde eine Rechnung mit und ohne Fluid durchgeführt. In Abbildung 4 erkennt man die Membranauslenkung und -geschwindigkeit ohne Fluideinfluss. Der Vergleich mit Fluidkopplung ergibt sich über Abbildung 5.



**Abbildung 5:** Membranauslenkung und -geschwindigkeit des Lautsprechers, bei Berücksichtigung der Fluidstrukturkopplung innerhalb der Tür.

Es ist zu erkennen, dass die Fluidkopplung, für dieses Beispiel, im Bereich von 40 – 80 Hz einen großen Einfluss auf die Membranbewegung und somit eine Rückkopplung auf die Antriebskraft besitzt. Entsprechend sollte die Simulation mit Fluid-Struktur-Kopplung durchgeführt werden.

Als Anregesignal kann natürlich weißes Rauschen verwendet werden um eine grundlegende Systemcharakterisierung zu erhalten. Anwendungsnäher ist es mit Spektren von realen Anregungssignalen – wie etwa kritischen Musikstücken oder Telefonie-Beispielen – zu arbeiten. Durch die Simulation im Frequenzbereich können entsprechende Spektren direkt in das anregende Kraftspektrum umgewandelt und verwendet werden.

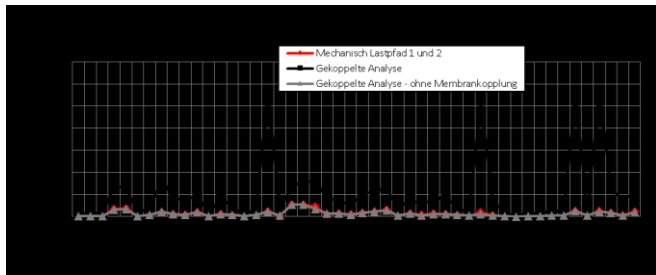
## Ergebnisanalyse

Für die Ergebnisanalyse werden nicht die absoluten Wege sondern die Relativen bewertet. Dies begründet sich darin, dass eine Relativbewegung nötig ist damit ein Störgeräusch entstehen kann. Da zwischen allen Knoten des Modelles eine Relativverschiebung berechnet werden kann, ist es nötig die Möglichkeiten einzuschränken um die Berechnungszeit gering zu halten. Hierzu wird die Verkleidung in Bereiche eingeteilt, so dass in einem entsprechenden Auswertalgorithmus nur die Relativverschiebungen von Knoten von Bauteilpaaren, die auch kollidieren können, berücksichtigt werden [3].

Theoretisch muss auch der Ausgangsabstand der Teile ohne die Schwingbewegung berücksichtigt werden, da ein Kontakt nur entstehen kann wenn dieser Abstand von der Relativbewegung überbrückt wird. Praktisch kann dies aber problematisch sein, da die Modellstände der Einzelteile nicht immer stimmig sind und durch die Mittelflächenvernetzung der Bauteile zusätzliche Abweichungen in den Abständen entstehen.

Vergleicht man nun für die gewählten Bauteilpaarungen die maximale Relativverschiebung aus allen Knoten erhält man

ein Maß für die Störgeräuschneigung wie in Abbildung 6 für das Türmodell gezeigt.

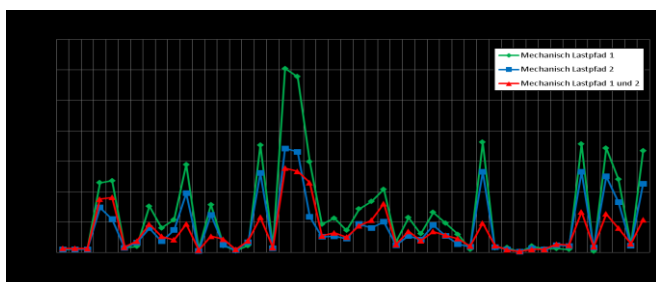


**Abbildung 6:** Vergleich der maximalen relativen Knotenverschiebung zwischen den Bauteilpaaren, die in Kontakt kommen können, als Maß für die Störgeräuschneigung.

Aus dieser Darstellung erkennt man sofort die kritischen Bauteilpaarungen mit großen relativen Bewegungen. Diese Paarungen können nun weiter analysiert werden. Zum Beispiel bei welchen Frequenzen die maximalen Verschiebungen auftreten und welche Moden diesen Schwingungen zugrunde liegen. Für diese Analysen und daraus resultierende Gegenmaßnahmen benötigt man aber trotz Unterstützung durch spezialisierte Software (z.B. FARBE [3]) erfahrene Spezialisten die den Einfluss der Materialpaarung und des Ausgangsabstandes beurteilen können.

In Abbildung 6 ist zusätzlich der Einfluss des Fluid auf die Ergebnisse zu sehen. Wobei zu unterscheiden ist zwischen dem Einfluss des Fluid nur auf die Türschwingung – welcher vernachlässigbar ist – und der Einfluss des Fluids wenn dieses auch mit dem Lautsprecher gekoppelt ist und entsprechend angeregt wird. Hieraus ist ersichtlich, dass der größte Einfluss des Fluid im Türinneren über die Kopplung mit der Membran entsteht. Dies ist natürlich nur bei Lautsprechern gegeben welche nicht gekapselt sind.

Abbildung 7 zeigt als zusätzliche Detailanalyse die Relevanz der Strukturpfade ohne Fluideinfluss. Nur bei Berücksichtigung beider Pfade ergibt sich die reale Anregungssituation. In den starken Unterschieden der Kurven erkennt man den großen Einfluss der Abbildung und dass beide Pfade beachtet werden müssen.



**Abbildung 7:** Vergleich der maximalen relativen Knotenverschiebung für die verschiedenen Lastpfade und ihre Kombination ohne Fluideinfluss.

## Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf der Lautsprecherbeschreibung anhand Ersatzschaltbild und Thiele-Small-Parametern kann die anregende Kraft des Lautsprechers ermittelt werden. Mit dieser Kraft wird anschließend das Strukturmodell des Lautsprechers in der FEM-Simulation beaufschlagt.

Durch den Einbau des Lautsprechers in ein FEM-Modell der umgebenden Struktur – zum Beispiel die Tür – kann die Schwingungsantwort auf die Lautsprecheranregung simuliert werden. Hierbei ist zu beachten, dass für realitätsnahe Ergebnisse beide mechanischen Pfade und die Fluid-Struktur-Kopplung im Inneren der Tür berücksichtigt werden müssen. Auch die Verkleidungsteile müssen mit entsprechend hoher Qualität modelliert und angebunden werden, da hier die Störgeräusche auftreten und in diesem Bereich die Störgeräuschneigung über die Relativverschiebung bewertet werden kann.

Durch das komplett lineare FEM-Modell kann die Simulation im Frequenzbereich erfolgen, wodurch sich sehr kurze Rechenzeiten ergeben. Zudem kann mit weißem Rauschen oder Testspektren von z.B. kritischen Musikstücken als Anregung gearbeitet werden. Eine Ausgabe von Schalldruckpegeln ist hierbei nicht zielführend, da es nicht darum geht das Störgeräusch vorherzusagen, sondern den Entstehungsort zu kennen und Abhilfemaßnahmen zu entwickeln. Entsprechend wird nur die Verschiebung der Verkleidungsteile als Simulationsergebnis ausgegeben.

Basierend auf den Knotenverschiebungen lassen sich dann die maximalen Relativbewegungen zwischen relevanten Bauteilpaarungen berechnen. Diese geben direkt ein Maß für die Störgeräuschneigung an und das Risiko kann von den Spezialisten bewertet und Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

Dies stellt natürlich nur einen Schritt in der Entwicklung von störgeräuschfreien Produkten dar. Daneben gibt es als zusätzliche wichtige Punkte die Erstbewertung der CAD-Daten und die abschließenden Test von Komponenten auf geräuscharmen Shakern und im Fahrzeug. Jedoch wird das Potential der Simulation, kritische Störgeräuschthemen bereits in der virtuellen Phase zu identifizieren und abzustellen, bevor die teure Hardwarephase beginnt, noch zu wenig genutzt.

## Literatur

- [1] Trinkl, K.; Luegmair, M.: Methoden zur Störgeräuschprävention an PKWs. Fortschritte der Akustik – DAGA 2014, 102 – 103; Oldenburg
- [2] Rausch, M.: Numerische Analyse und Computeroptimierung von elektrodynamischen Aktoren am Beispiel eines elektrodynamischen Lautsprechers. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. 2001.
- [3] Burkart, T.; Luegmair, M.; Triebel, C.: Simulationsgestützter Entwicklungsprozess zur frühzeitigen Eliminierung von Störgeräuschen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2016, 863 – 865; Aachen