Identifikation sensitiver Parameter zur Systemabstimmung in der niederfrequenten Fahrzeugakustik

Lukas Berk[1,2], Christian Adams[2], Elena Slomski-Vetter[2], Tobias Melz[2,3]

[1] BMW AG, 80788 München, E-Mail: lukas.berk@bmw.de
[2] Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, 64289 Darmstadt
[3] Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt

Einleitung

Die niederfrequente Fahrzeugakustik befindet sich in einem komplexen Spannungsfeld aus kundenspezifischen Produkteigenschaften und den Anforderungen des Leichtbaus. Die hör- und fühlbaren Eigenschaften beginnen beim Eindruck der Produktwertigkeit und können im ungünstigsten Fall zu Ermüdungserscheinungen oder Konzentrationsschwäche des Fahrers führen. Maßnahmen für ein angenehmes Innenraumgeräusch sind in der Regel mit einer Einbringung von zusätzlichem Gewicht in das System verbunden. Um gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich der Emissionen gerecht zu werden, ist neben dem Leichtbau die Vermeidung gewichtsintensiver Akustikmaßnahmen erforderlich. Umgekehrt haben die Leichtbaumaßnahmen eine Auswirkung auf niederfrequente Akustikeigenschaften, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen. Für eine vernetzte Auslegung der Disziplinen sollen beiderseits Potenziale offengelegt werden, um eine synergetische Lösung zu erarbeiten. Substitutionsmaßnahmen aus dem Leichtbau stellen dabei die Schlüsseltechnologie dar, um Bauteilparameter wie Masse, Steifigkeit oder Dämpfung unabhängig voneinander zu variieren.

In einer Studie des Fraunhofer ISI [1] wird das Leichtbaupotenzial durch metallische Leichtbausubstitutionen in der Automobilindustrie auf 33 % beziffert. Tisza [2] nennt ein Potenzial durch Aluminiumsubstitution von 30–50%. Auch wenn dies nicht gleichbedeutend auf Komponentenebene heruntergebrochen werden kann, macht es dennoch deutlich, dass jenseits der konventionellen Stahlbauweise Handlungsspielraum für gezielte Eigenschaftsänderungen existiert. Neben der Massereduzierung kann die Substitution auch zur Steifigkeitserhöhung genutzt werden. Gewichtsneutrale Modifikationen wie die Veränderung der Anbindungssteifigkeit von Klappen und Türen bieten zudem Potenzial zur akustischen Systemverstimmung.

In diesem Beitrag wird eine Methode entwickelt, um den Handlungsspielraum aus dem Leichtbau hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit bewerten zu können. Dazu werden Bauteile ermittelt, bei denen sich durch die Änderung von Dämpfung, Steifigkeit oder Masse eine signifikante Modifikation der akustischen Eigenschaften in der niederfrequenten Wirkkette erzielen lässt. Diese als sensitiv geltenden Parameter werden hinsichtlich ihrer Justierbarkeit bewertet. Sind die Sensitivität und die Justierbarkeit sichergestellt, so spielt dieser Parameter eine wichtige Rolle für die leichtbaugerechte und effiziente akustische Systemgestaltung.

Designparameter im Akustik-Modell

Das in Abbildung 1 dargestellte Fluid-Struktur-Modell besitzt vordefinierte Designparameter, deren variable Eigenschaften einen noch unbekannten Einfluss auf das gekoppelte akustische System besitzen. Die Krafteinleitung erfolgt an einem Ende der Tragstruktur und wird für einen Frequenzbereich zwischen 20 und 80 Hz mit 1 N vorgegeben. Die Übertragungsfunktion wird mittels Nastran-Solver 111 berechnet. Die beiden Platten stehen stellvertretend für die an der Fahrzeugkarosserie befestigten Flächenbeitragsleister, wie Klappen, Scheiben oder große Flächenbauteile. Die Phasenbeziehungen der Beitragsleister spielen in der niederfrequenten Akustik eine besonders wichtige Rolle. Um diese zu berücksichtigen sind für den einfachsten Fall zwei Beitragsleister im Modell dargestellt. Ihre Anbindung an die Tragstruktur ist durch CBUSH Elemente realisiert. Der Transferpfad verläuft somit ausgehend von der Balkenstruktur über die Federelemente in die beiden Platten. Durch die beiden Beitragsleister wird das ansonsten starr berandete Fluid angeregt. Um die Akustik in einer skalaren Zielgröße zu erfassen, wird der Schalldrucksummenpegel an vordefinierten Mikrofonpunkten ermittelt. Es werden bauteilspezifische Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen als Variablen definiert.

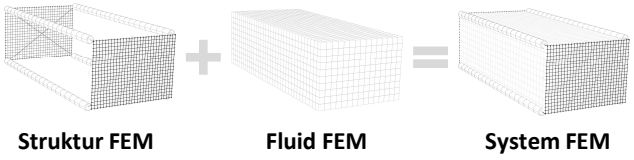

Abbildung 1: Fluid-Struktur-Modell

Ob ein Parameter für eine Akustik-Leichtbau-Auslegung geeignet ist hängt von seinen Haupt- und Wechselwirkungseffekten sowie von der Funktionscharakteristik im betrachteten Intervall ab. Insbesondere bei einer gleichzeitigen Änderung mehrerer Parameter mit Wechselwirkung unterscheidet sich der Gesamteffekt stark bezüglich der Summe der Haupteffekte. Die Parameter sind damit nicht additiv. Ein nicht monotoner Parameter könnte sich in einem ungünstigen Teilintervall negativ auf den Schalldrucksummenpegel auswirken. Um innerhalb des Parameterintervalls eine gute Justierbarkeit zu erreichen, sind niedrige Wechselwirkungen und ein möglichst linearer Funktionsverlauf das Ziel. Die Größe des Eingangsintervalls und die Ausprägung des daraus resultierenden Effektes sind zudem wichtig zur Bewertung der Justierbarkeit eines Parameters.

Die mechanisch-akustische Bewegungsgleichung zeigt, dass die Steifigkeits-, Dämpfungs- und Masseeinträge gekoppelt und damit nicht additiv sind. Da der Schalldruck gegenüber der Frequenz nicht linear und ggf. auch nicht monoton ist, gilt dies auch für die entsprechenden Parameterintervalle. Folglich liegt aufgrund der Nichtlinearität und den Wechselwirkungseffekten eine hohe Komplexität vor.

$$\begin{bmatrix} K_s & -K_c \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} + \mathrm{i}\omega \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ M_c & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ \rho \dot{q} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

mit K - Steifigkeitsmatrix; D - Dämpfungsmatrix; M - Massematrix; Indizes: s - Struktur, f - Fluid, c - Kopplung; x - Strukturverschiebung, p - Schalldruck, ρ - Fluiddichte; q - Volumenbeschleunigung

Zur Abstimmung eines Systems sind diejenigen Designparameter geeignet, welche einen großen Effekt innerhalb eines großen Intervalls besitzen. Die starke Kopplung des niederfrequenten akustischen Systems impliziert, dass alle Bauteile Wechselwirkung besitzen. Dennoch soll geprüft werden, ob es Designparameter gibt, die stärker oder schwächer interagieren als andere. Zudem soll eine Bewertung der Justierbarkeit durch den Parameterverlauf im Intervall möglich sein.

Globale Sensitivitätsanalyse und Parameterscreening

Um über die Bedeutung einzelner Parameter innerhalb ihres gesamten Intervalls entscheiden zu können, wird eine globale Sensitivitätsanalyse (SA) angewendet. Die Auswahl einer geeigneten SA Methode richtet sich nach der Modellkomplexität, dem Rechenaufwand erforderlichen Bewertungskriterien. Die Notwendigkeit einer qualitativen oder quantitativen Aussage sowie die Einbeziehung der Wechselwirkungseffekte erster oder höherer Ordnung spielen gemeinsam mit der Komplexität der Zielfunktion eine fundamentale Rolle. Abbildung 2 zeigt einen Auszug an Sensitivitätsmethoden, welche für die Auswahl zur Verfügung stehen [3].

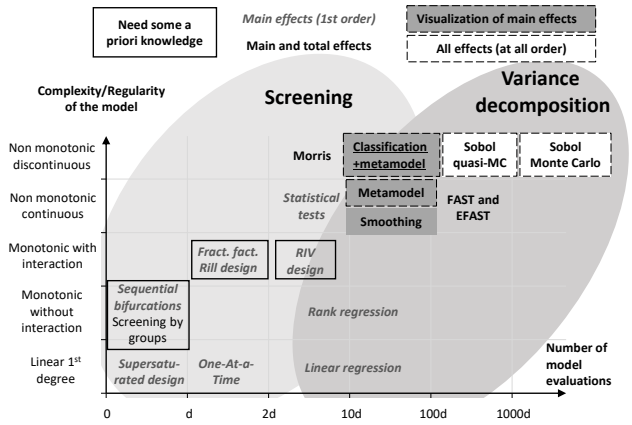

Abbildung 2: Auswahl SA-Methoden [3]

Im Falle der niederfrequenten Akustik handelt es sich um ein stetiges, aber nicht monotones Problem. Neben der Bedeutung der Haupteffekte soll eine Bewertung der Wechselwirkungseffekte möglich sein. Hinzu kommen eine Bewertung der Monotonie und ein qualitatives Ranking aller Parameter. Durch den ohnehin hohen Berechnungsaufwand von Fahrzeugmodellen wird eine Methode mit geringer Evaluationsanzahl gesucht. Auf Basis dieser Rahmenbedingungen wird im Folgenden eine SA anhand der Morris-Methode durchgeführt.

Die Morris-Methode

Die Morris-Methode [4,5] ist ein Screeningverfahren und dient hauptsächlich dazu herauszufinden, welche Parameter in einem Modell einflussreicher als andere sind. Dabei können die Parameter in die Gruppen (a) unbedeutend, (b) linear und additiv oder (c) nicht linear und nicht additiv eingeteilt werden. Zudem ist durch eine Erweiterung [6], eine Einteilung der Parameter in (d) nicht monoton und nicht additiv möglich. Die Methode basiert auf der Berechnung parameterspezifischer Elementareffekte auf Basis eines Trajektorienverfahrens innerhalb des Parameterraums.

$$EE_i(x) = \frac{[y(x_1 \dots x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(x)]}{\Delta} \quad (2)$$

mit EE_i Elementareffekt des i-ten Parameters; x_1, x_2.. x_k Punkt im Parameterraum, Δ Schrittweite

Durch den Mittelwert der Elementareffekte, die zu einem Parameter gehören, wird der Gesamteinfluss bezüglich der Ergebnisgröße ermittelt. Die Standardabweichung der Elementareffekte beschreibt die Wechselwirkung mit anderen Parametern sowie die Nichtlinearität. Entscheidend für eine angemessene Repräsentation des Modells durch die Morris-Methode ist die Qualität des zugrundeliegenden Samplings. Ausgehend von den Startpunkten der Trajektorien wird durch das Sampling die Verteilung aller Stichproben innerhalb des Parameterraums festgelegt.

Samplingstrategie

Die ursprüngliche Elementareffektmethode [4], welche Morris vorgeschlagen hat, verwendet eine Reihe von Trajektorien mit unterschiedlichen Ausgangspunkten. Bei dieser Methode werden die Startpunkte zufällig ausgewählt, was die Gefahr birgt, dass der Parameterraum nicht so gleichmäßig wie nötig abgetastet wird. Bei einer großen Anzahl von Eingangsfaktoren führt dies zu Problemen. Um die Samplingqualität zu verbessern schlägt Campolongo [6] die folgende Strategie vor: Es beginnt mit der Generierung von 500-1000 Trajektorien, aus denen letztlich eine gewünschte Anzahl von r Trajektorien selektiert wird. Basierend auf einem definierten Entfernungsmaß d_{ij} wird ein Satz von r Trajektorien mit einem maximalen, kombinierten Abstandswert ausgewählt. Dieser Satz stellt das am gleichmäßigsten verteilte Sampling innerhalb des Parameterraumes dar. Die Strategie stellt eine solide Verbesserung dar. Mit zunehmender Anzahl der Trajektorien steigt allerdings der Berechnungsaufwand der am gleichmäßigsten verbreiteten Stichprobe erheblich. Eine Vereinfachung der in [1] beschriebenen Methode wird verwendet, um die Generierung des Samplings zu beschleunigen.

Die vorgeschlagene Strategie erfordert die Annahme eines minimalen, akzeptablen Qualitätsparameters p_{limit} für eine zufallsbasierte Probennahme. Durch diesen wird die akzeptierte Häufigkeit der jeweiligen Intervallstufe abweichend von der idealen Verteilung definiert. Es ist sinnvoll, dass p_{limit} kleiner gewählt wird als der optimale Wert im Falle einer Gleichverteilung p_{opt}, da jede Abweichung von der Gleichverteilung ansonsten dazu führen würde, dass bei einigen Stufen weniger als p_{opt} Werte auftreten und es somit nur eine gültige Lösung gäbe. In Abbildung 3 ist ein Beispiel aus [1] dargestellt, bei dem eine Morris-Stichprobe mit 20 Trajektorien bei vier Stufen für ein Modell mit vier Eingangsvariablen erzeugt wird. X_2, X_3, X_4 sind im Beispiel mit $p_{opt} = 5$ gleichverteilt, während bei X_1 die Ebenen 0 und 2/3 vierfach vorkommen. Die Prozessparameter für den vorliegenden Fall könnten durch die vorgeschlagene Methode mit $p_{limit} = 4$ und $r = 20$ erreicht werden.

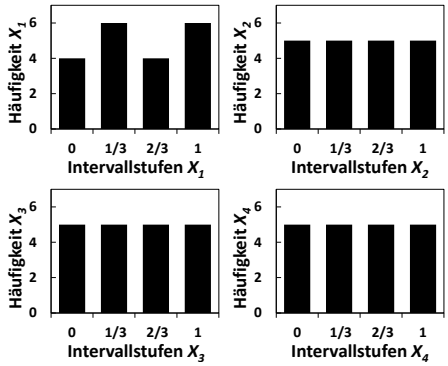

Abbildung 3: Beispiel mit $r = 20$, Samplingwerte für vier Variablen X_1, X_2, X_3, X_4

Durch den Pseudocode in Abbildung 4 wird der Algorithmus zur Erstellung des Samplings beschrieben. Der vorgestellte Ansatz bietet die Möglichkeit, manuell eine Mindestqualität festzulegen, sowie die Option der parallelen Ausführung. Die Leistungsfähigkeit hängt vom gewählten p_{limit}-Wert ab. Je näher dieser an p_{opt} liegt, desto länger dauert die Berechnung.

Algorithm 1 Optimal Morris Sampling

```
1: procedure GENERATE SAMPLE (L Bound,U Bound, r, factors, p_limit)
2:     Optimal ← 0
3:     repeat
4:         Sample ← Sampler(L Bound,U Bound, r, factors, levels)
5:         for variable in Sample do
6:             if variable has a level sampling < p_limit then
7:                 Optimal ← 0              ►A level is not adequately sampled
8:                 break
9:             else
10:                Optimal ← 1              ►All levels are adequately sampled
11:            end if
12:        end for
13:    until Optimal
14:    return Sample
15: end procedure
```

Abbildung 4: Samplingverfahren im Pseudocode

Prozessparameter

Ob eine adäquate Abtastung des Parameterraumes gegeben ist, hängt stark von dem Funktionsverlauf der Parameter innerhalb ihrer Intervalle ab. Verhalten sich alle Variablen linear und additiv, so ist eine Diskretisierung in zwei Stufen ausreichend, um mit der Morris-Methode ein valides Ergebnis zu erzielen. Bei komplexeren Verläufen muss eine feinere Abtastung vorgenommen werden, wodurch die Anzahl der Stichproben rapide ansteigt. Die Einbeziehung von Vorabinformationen bezüglich der Komplexität des zugrundeliegenden Problems ist somit bei der Wahl der richtigen Prozessparameter erforderlich. Ein Index hierfür ist das in [7] beschriebene Bestimmtheitsmaß, welches Abweichungen der Funktionsstützstellen gegenüber des linearen Zusammenhangs ihrer Regressionsgeraden aufzeigt. Der Koeffizient kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 einen perfekt linearen Zusammenhang beschreibt. Abbildung 5 zeigt die niedrigsten Bestimmtheitsmaße aus 19 Parameterintervallen auf Basis One-at-a-Time Variationen.

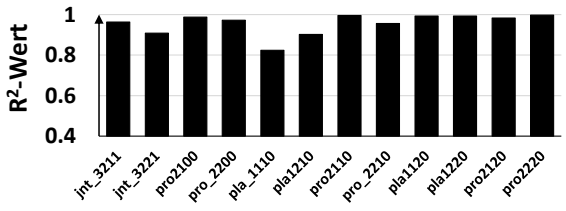

Abbildung 5: R^2-Werte ausgewählter Parameter

Im n-dimensionalen Hyperraum mehrerer Variablen kommen die Wechselwirkungseffekte erschwerend hinzu. Die R^2-Werte werden ausgehend von einem Startdesign durch die Variation von immer nur einem Parameter errechnet. Bei den niederfrequenten Eigenschaften von Fahrzeugen kann von einer starken Kopplung des Systems ausgegangen werden. Daher hängt die Charakteristik eines Parameterintervalls von der Niveaustufe der anderen Parameter ab. Eine solche Wechselwirkung wurde anhand der Steifigkeit der CBUSH-Elemente an der vorderen Platte jnt_3211 und der hinteren Platte jnt_3221 analysiert und in Abbildung 6 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass sich der Verlauf im Intervall von jnt_3211 abhängig von der minimalen bzw. maximalen Intervallgrenze von jnt_3221 ändert, sich jedoch in beiden Fällen ein nicht linearer aber monotoner Verlauf einstellt.

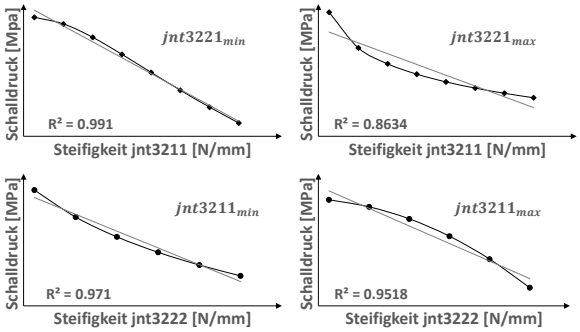

Abbildung 6: R^2-Werte und Wechselwirkungen

Im vorhandenen Modell wurden für Profile (pro) und Platten (pla) die Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen durch je eine Variable ersetzt. Zudem wurden die Anbindungssteifigkeiten (jnt) als Parameter definiert. Für die insgesamt 19 Parameter wurden reproduzierbare Sensitivitätswerte bei einer Diskretisierung der Intervalle in vier Niveaustufen, einer Schrittweite von $\Delta = 2$, einem p_{limit}-Wert von drei und einer Anzahl von Trajektorien von $r = 10$ erreicht. Die daraus resultierende Anzahl an Berechnungen beträgt 200. Bei steigender Anzahl der Parameter wird eine Vergrößerung der Trajektorienanzahl auf $r = 15$ empfohlen.

Anwendung der Methode

Für einen besseren Überblick der Ergebnisse wurden für den Anwendungsfall die Designvariablen auf 19 beschränkt. Durch die in Abbildung 7 beschriebene Nomenklatur werden die Parameter bezüglich Bauteile, Elementbeschreibung und Eigenschaft definiert.

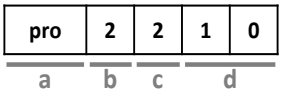

Abbildung 7: Nomenklatur der Designparameter (a) Name Bauteil; (b) Element FEM 1:Beam, 2:Shell; (c) Eigenschaft Parameter 1:Masse, 2:Steifigkeit, 3:Dämpfung; (d) Bauteil ID

Das Startdesign des Modells wurde so gewählt, dass die ersten Eigenmoden von Fluid und Struktur im Frequenzbereich zwischen 20-80 Hz liegen. Die Anbindungssteifigkeiten (jnt) besitzen aufgrund des hohen Änderungspotenzials ein Intervall von ±100%. Alle anderen Parameter können in einem Intervall von ±10% variiert werden. Wird jeder Parameter über den

durch die Elementareffekte berechneten Haupt- und Wechselwirkungseffekt aufgetragen, erhält man den in Abbildung 8 dargestellten Morris-Plot.

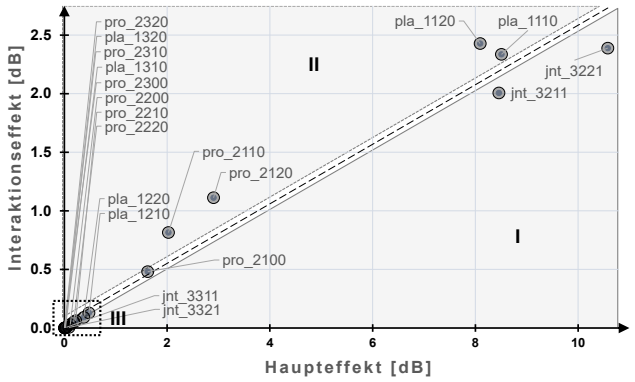

Abbildung 8: Morris-Plot zur Selektion (I) linearer und additiver, (II) nicht linearer und nicht additiver oder (III) unbedeutender Parameter

Die Parameter zeigen einen linearen Zusammenhang von Haupt- und Wechselwirkungseffekten. Ein besonders entkoppelter Parameter ist dadurch nicht zu erkennen. Parameter innerhalb des Bereiches III gelten als unbedeutend und sind für eine akustische Abstimmung somit nicht geeignet. In diesem Bereich lassen sich zwölf Parameter identifizieren, die ohne die Beeinflussung der Akustikeigenschaften innerhalb ihrer Intervallgrenzen, z.B. aufgrund von Leichtbauanforderungen, variiert werden können. Sieben Parameter im Bereich I und II können für eine akustische Optimierung genutzt werden. Wie stark nicht linear oder nicht monoton die Parameter sind, kann aus Abbildung 9 entnommen werden. Es handelt sich hierbei um die nach [6] definierte Abweichung von Absolut- und Mittelwert aus den Elementareffekten.

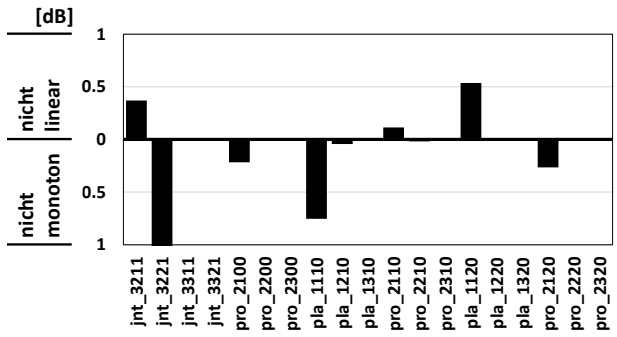

Abbildung 9: Nichtlinearität und Nichtmonotonie der Designparameter innerhalb des Intervalls

Diejenigen Werte, die sich aufgrund von Nichtmonotonie im Vorzeichen von Absolut- und Mittelwert unterscheiden, sind nach unten aufgetragen. Unter Berücksichtigung ihres Einflusses im Morris-Plot sind demnach jnt_3211, pla1120 und pro_2110 gut Justierbar, da sie auf dem Intervall monoton sind und akustischen Einfluss besitzen.

Validierung und Fallstudie

Zur Überprüfung von Typ-II-Fehlern werden alle unbedeutenden Parameter im Modell auf ihre untere Intervallgrenze gesetzt. Die Abweichung des Schalldrucksummenpegels liegt bei unter 0.1%, die Schalldruckkurve zeigt einen nahezu deckungsgleichen Verlauf bezüglich des Startdesigns. Unter denen als unbedeutend eingestuften Parametern befindet sich damit kein akustisch wirksamer Parameter. Außerdem wurde mit den sieben relevanten Parametern eine Optimierung des Schalldrucksummenpegels vorgenommen. Dadurch konnte eine Verbesserung des Modells im betrachteten Frequenzbereich um 70 % im Summenschalldruck (in Pascal) erzielt werden, ohne dabei das Gesamtgewicht zu erhöhen.

Fazit

Die Identifikation akustisch wirksamer Parameter kann durch die Morris-Methode realisiert werden. Um effizient und zuverlässig Ergebnisse generieren zu können, ist aufgrund der hohen Komplexität die Einbeziehung von a-priori Wissen erforderlich. Durch das qualitative Ranking sowie die Charakterisierung der Parameter auf ihrem Intervall kann die Justierbarkeit bewertet werden. Die symmetrischen Eigenschaften von Geometrie, Parameter und Anregung führen dazu, dass die auftretenden Schwingformen überwiegend gleichförmige, translatorische Bewegungen sind. Aufgrund der daraus resultierenden Plattenbewegungen wird der Schallpegel von Längsmoden dominiert. Alle Systemkomponenten in der Wirkkette haben eine klare und voneinander abhängige Funktion und somit hohe Wechselwirkungen. Ein Fahrzeugmodell besitzt eine deutlich höhere Komplexität bezüglich der Transferpfade und der Zusammensetzung des Schalldrucksummenpegels. Weich angebundene Beitragsleister, wie Türen und Klappen, zeigen in der Regel eine starke Überhöhung der Amplituden gegenüber der Tragstruktur. Der Schalldrucksummenpegel ist dadurch vor allem von den Phasenbeziehungen der Beitragsleister abhängig. Die Möglichkeit einer entkoppelten Phasenverstimmung anhand eines Parameters ist für komplexere Modelle zu prüfen.

Quellenverzeichnis

[1] **T. Bauer, N. Schmid und W. Seeliger**, „*Wertschöpfungspotenziale im Leichtbau*“, Leichtbau BW GmbH, Stuttgart, 2014.

[2] **M. Tisza und I. Czinege**, „*Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts*”, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 1(4), 2018, S.229-238.

[3] **B. Iooss, P. Lemaître**. „*A review on global sensitivity analysis methods*”. C. Meloni und G. Dellino. Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications, Springer, 2015.

[4] **M. D. Morris**, „*Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments*”, Technometrics”, 1991, 33(2) S.161-174.

[5] **A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo und M. Ratto**, „*Sensitivity Analysis in Practice*”, Chichester, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

[6] **F. Campolongo, J. Cariboni und A. Saltelli**, „*An effective screening design for sensitivity analysis of large models*“, Environmetal Modelling & Software 22(10), 2007, S.1509-1518.

[7] **L. Fahrmeir, T. Kneib, S. Lang**, „*Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen*“, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer 2009