

# Entwurf eines Equivalent Sound Pressure zur Abschätzung der akustischen Abstrahlung in Innenräume

Marinus Luegmair, Florian Lerchl

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

## Einleitung

Im Rahmen der simulativen Auslegung von technischen Strukturen in der virtuellen Phase der Entwicklung sind oftmals schnelle Ergebnisse mit grundsätzlicher Aussage wichtiger als die langwierige Berechnung exakter Bewertungen. Dies gilt besonders für Optimierungen, die sehr viele Rechenläufe benötigen [1] und in der frühen Phase der Entwicklung, in der oft die geforderten Reaktionszeiten sehr kurz sind. Im Fall der frühen Phase ist die Modellgüte zudem oft so gering, dass genaue Aussagen nicht möglich und somit vereinfachte Größen zielführender sind.

Typisches Beispiel für eine solche Größe ist der ERP (Equivalent Radiated Power) der entsprechend oft als Auswertegröße von FEM-Berechnungen eingesetzt wird. Jedoch besitzt der ERP den Nachteil, dass er eine Schalleistung abschätzt, in der Auslegung aber typischerweise der Schalldruck in Messung und Simulation als Zielgröße verwendet wird. [2]

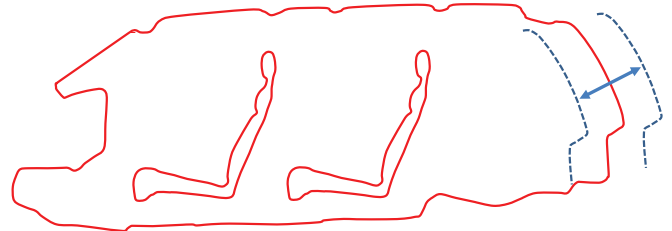
Dieser Nachteil wird im Folgenden umgangen indem eine Größe entwickelt wird, welche, wie der ERP, rein aus strukturdynamischen Ergebnissen berechnet werden kann, als physikalische Einheit aber einen Schalldruck besitzt. Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit gegeben.

## Konzept

Die Effizienz des ERP – sowie seine Ungenauigkeiten – ergeben sich dadurch, dass er rein aus strukturdynamischen Größen berechnet wird. Daraus ergibt es sich, dass die Modellierung des Innenraumfluid nicht erfolgen und für die Berechnung keine Fluid-Struktur-Kopplung berücksichtigt werden muss. Das führt zu entsprechend reduzierten Modellerstellungs- und Rechenzeiten [2].

Deshalb ist es das Ziel des Equivalent Sound Pressure (ESP) diese Effizienz beizubehalten, aber gleichzeitig als physikalische Einheit den Schalldruck zu besitzen. Vor allem da in der Fahrzeugentwicklung sowohl in der Simulation als auch im Versuch der Schalldruck die typische Bewertungsgröße ist. Der ERP stellt eine Leistungsgröße dar und ist somit nicht direkt vergleichbar.

Um eine Schalldruckgröße als Ergebnis der Berechnung zu bekommen wird die Volumenänderung des Innenraumfluid verwendet, welche sich durch die Strukturschwingung ergibt. In Abbildung 1 ist dies exemplarisch für die Heckklappe gezeigt, welche mit ihrer Schwingung z.B. oftmals zu Dröhnphänomenen führt.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Fahrzeuginnenraumvolumens und der Volumenänderung durch die Schwingung der Heckklappe.

## Herleitung des ESP

Ausgehend von der Volumenänderung  $\Delta V$  eines eingeschlossenen Luftvolumens  $V$ , etwa im Fahrzeuginnenraum, kann mittels der Hydrostatik die Druckänderung berechnet werden

$$\frac{\Delta V}{V} = -\chi \Delta p \quad (1)$$

Der Kompressibilitätskoeffizient  $\chi$  wird im Folgenden durch den Kompressibilitätsmodul  $K$  ersetzt und die Gleichung nach der gesuchten Größe Druckänderung  $\Delta p$  umgestellt, wodurch sich

$$\Delta p = -\frac{K}{V} \Delta V \quad (2)$$

ergibt. Die Volumenänderung lässt sich zerlegen in die Fläche  $A$  des anregenden Panels und die Verschiebung der Struktur senkrecht zur Oberfläche  $u_{S,n}$  wodurch sich eine Größe ergibt die außer von Konstanten nur von der Strukturschwingung abhängt

$$\Delta p = -\frac{K}{V} A u_{S,n} \quad (3)$$

Diese statische Gleichung kann unter Vernachlässigung entsprechender physikalischer Phänomene auch im Frequenzbereich verwendet werden, da die Strukturschwingung dynamisch simuliert und in die ESP Formel

$$\Delta p(\omega) = -\frac{K}{V} A u_{S,n}(\omega) \quad (4)$$

eingesetzt werden kann.

## Diskussion der Annahmen

Die in der ESP-Formel

$$ESP_{(\omega)} = -\frac{K}{V} A u_{S,n}(\omega) \quad (5)$$

steckenden Annahmen führen zur Vernachlässigung einiger physikalischer Effekte. Diese Annahmen sind zusammengefasst folgende:

- Das Strukturpanel verhält sich ideal starr (keine elastischen Moden) was bis zur ersten Eigenfrequenz grob gegeben ist
- Der Abstrahlgrad des Panels ist für alle Frequenzen gleich 1 und die Abstrahlung besitzt keine Richtcharakteristik
- Es tritt kein akustischer Kurzschluss auf
- Die Fluidmoden des Innenraum haben keinen Einfluss auf den resultierenden Druck

Das führt zu entsprechenden Ungenauigkeiten, die aber bewusst in Kauf genommen werden um die Effizienz der rein strukturdynamischen Größe nicht zu verlieren. Zudem gelten für den breit im Einsatz befindlichen ERP die gleichen Annahmen [2].

Ergänzend muss erwähnt werden, dass der ESP durch die Abhängigkeit vom Volumen der Kavität nur für Innenräume und nicht für die Abstrahlung ins Freifeld berechnet werden kann.

## Beispiele

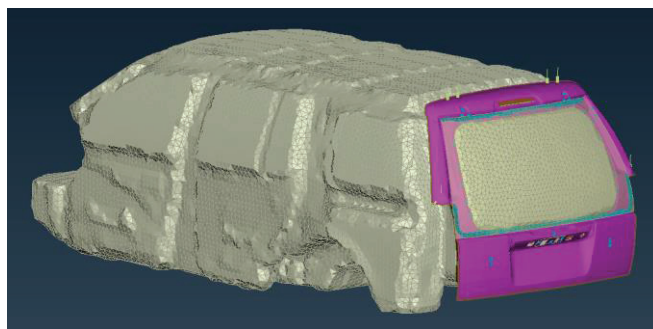
Um die Einschränkungen aus den Annahmen auf die industrielle Anwendung quantifizieren zu können werden im Folgenden zwei Fahrzeuge verschiedener Klassen exemplarisch untersucht. Der untersuchte Frequenzbereich bis 400Hz entspricht hierbei dem typischen sinnvollen Bereich der simulativen Karosserieauslegung in der Akustik. Die Auswertung wurde im Rahmen des Postprocessings für die hier gezeigte Untersuchung automatisiert.

Beide Fahrzeuge basieren auf Open-Source Crash-FE-Modellen [3] und werden für die Akustiksimulation entsprechend umgebaut und erweitert.

Als Referenz werden mittels Fluid-Struktur-Kopplung berechnete Schalldruckkurven an verschiedenen Positionen im Innenraum verwendet. Auf die simulierten Kurven wird zurückgegriffen, da in der frühen Entwicklungsphase – für die der ESP entwickelt wird – mangels Prototypen keine gemessenen Schalldruckkurven vorhanden sind.

### Ford Explorer Heckklappe

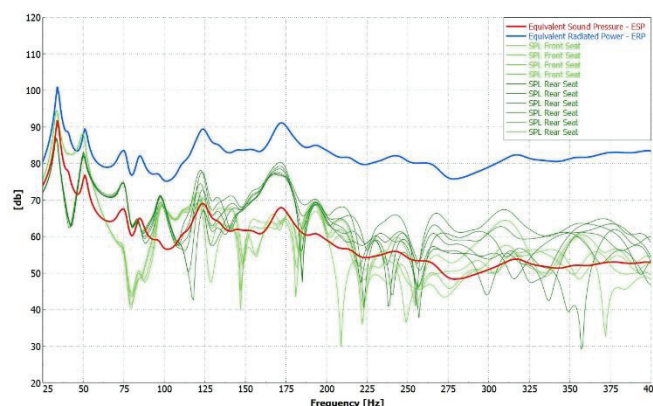
Motiviert aus den erwähnten Dröhnphänomenen wird am Explorer nur die Heckklappe und der resultierende ESP-Wert untersucht, wie in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Simulationsmodell mit der Heckklappe als Strukturmodell und dem Fluid für die Berechnung der Referenzschalldrücke (Ford Explorer).

Für realistische Randbedingungen werden Scharnieren und Schloss entsprechend gelagert. Die Anregung erfolgt mit einer konstanten Kraft mittig auf der Heckklappe.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der simulierten Referenzschalldrücke und dem ESP. Zusätzlich findet sich dort auch die ERP Kurve, wobei hier auf den nicht physikalischen Vergleich von Druckgrößen (Schalldrücke und ESP) und Leistungsgröße (ERP) hingewiesen werden muss. Dies ist durch die gleiche Einheit dB machbar, soll aber nur der Information dienen.



**Abbildung 3:** Vergleich der simulierten Schalldruckkurven mit dem ESP und dem ERP (Leistungsgröße) für die Ford Explorer Heckklappe.

Es ist zu erkennen, dass im niederfrequenten Bereich bis ca. 60 Hz die Kurven – sowohl ESP als auch ERP – sehr gut die beiden vorhandenen Resonanzen abbilden. Somit ist der ESP für dieses Beispiel auch geeignet Dröhnphänomene vorherzusagen. Im Bereich über 60Hz ergibt sich dann eine größere Abweichung. Der ERP bleibt auf einem relativ konstanten Niveau entfernt sich aber immer weiter von den Referenzschalldrücken. Der ESP im Gegenzug folgt dem grundsätzlichen Verlauf der Schalldrücke sehr gut. Trotz der Annahmen – die gerade im hochfrequenten Bereich theoretisch einen immer größeren Einfluss bekommen – zeigt sich diese gute Übereinstimmung.

## Toyota Yaris Karosserie

Zusätzlich zum ESP eines großen einzelnen Panels wird nun am Yaris untersucht wie sich der ESP verhält wenn mehrere Panels und somit fast die gesamte in den Innenraum abstrahlende Oberfläche berücksichtigt wird (schematisch dargestellt in Abbildung 4).

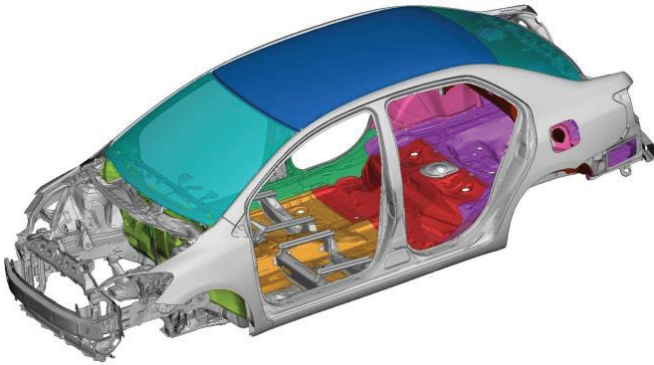


Abbildung 4: Simulationsmodell der Karosserie ohne Referenzfluid (Toyota Yaris)

Die in Abbildung 5 gezeigten Kurven zeigen abermals zwei zu unterscheidende Bereiche. Hierbei zeigt sich, dass der Bereich unter 120 Hz sowohl für den ESP als auch für den ERP eine schlechte Übereinstimmung mit den simulierten Referenzschalldrücken ergibt. Der Bereich über 120 Hz zeigt aber abermals die Eigenschaft, dass der ERP relativ konstant auf seinem Niveau bleibt und der ESP sehr gut den Abfall der Schalldrücke abbildet.

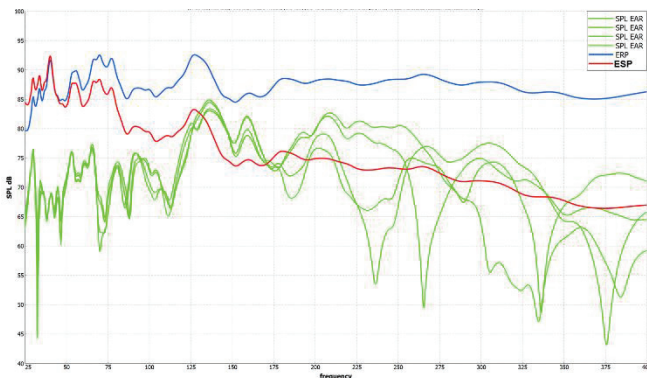


Abbildung 5: Vergleich der simulierten Schalldruckkurven mit dem ESP und dem ERP (Leistungsgröße) für die Toyota Yaris Karosserie.

Somit zeigt sich abermals – trotz der Annahmen – dass der ESP in der Lage ist das grundlegende hochfrequente Verhalten der Schalldrücke gut abzubilden.

## Fazit

Die Größe ESP liefert eine Auswertungsgröße mit dem Schalldruck als physikalische Einheit, wodurch die Vergleichbarkeit mit typischen Auslegungswerten aus Simulation und Versuch gegeben ist. Zudem besitzt sie die gleiche Effizienz wie der ERP durch die rein strukturdynamische Basis und kann somit sehr gut für die frühe virtuelle Auslegung und Optimierungsrechnungen verwendet werden.

Bei Betrachtung von nur einem Panel wie der Heckklappe werden die Schalldruckpegel sehr gut getroffen und der ESP kann sowohl im niederfrequenten für z.B. Dröhnen als auch im hochfrequenten Abschnitt des untersuchten Frequenzbandes benutzt werden. Bei Betrachtung von mehreren Panels zeigt der ESP aber keinen Vorteil gegenüber dem ERP und bildet die Schalldrücke ungenügend ab.

Zusätzlich liefert der ESP trotz der fehlenden physikalischen Effekte im Bereich über 100 Hz einen guten Wert für das grundsätzliche Verhalten der Schalldruckkurven im Innenraum. Ob dieser Wert einer Art von statistischen Mittelwert entspricht kann aufgrund der bisherigen Untersuchungen noch nicht gesagt werden.

Gerade die Untersuchung des ESP im Vergleich zum statistischen Mittel der Schalldrücke im Innenraum, sowie die weitere Überprüfung des Potentials an anderen Fahrzeugen bzw. Fahrzeugklassen stellen die Hauptpunkte für weitere Untersuchungen dar

## Danksagung

Die Autoren danken den Kollegen die bei der Umsetzung und Automatisierung der ESP-Auswertung für die gezeigten Modelle geholfen haben.

## Literatur

- [1] Diekmann, G.; Marburg, S.; Duddeck, F.: Objective Functions for Structural-Acoustic Optimization in Interior Acoustics. Fortschritte der Akustik – DAGA 2013, 373-376
- [2] Luegmair, M.; Münch, H.: Bewertung der Gültigkeit von ERP-Berechnungen in der Fahrzeugakustik. Fortschritte der Akustik – DAGA 2014, 100 – 101
- [3] National Crash Analysis Center, URL: <http://www.ncac.gwu.edu/ncac/vml/models.html>