

# Bewertung der Gültigkeit von ERP-Berechnungen in der Fahrzeugakustik

Marinus Luegmair, Hannes Münch

Akustik Center of Competence, P+Z engineering GmbH München, m.luegmair@puz.de

## Anwendungsgebiete des ERP

Seit vielen Jahren wird der ERP (Equivalent Radiated Power) in der Fahrzeugakustiksimulation für verschiedenste Fragestellungen als Kenn- und Zielgröße verwendet [1,2]. Sein Charme liegt darin, dass er eine Aussage liefert, ohne das Fluid in der Berechnung abbilden zu müssen. Dies reduziert die Modellierungs- und Rechenzeit, da nur das - oft bereits vorhandene - Strukturmodell nötig ist. Aus diesem Grunde wird der ERP auch sehr gerne für Optimierungen des akustischen Verhaltens verwendet [3-5].

Oft findet er aber auch Anwendung obwohl sein durch die zugrundeliegenden Annahmen eingeschränkter Gültigkeitsbereich nicht geprüft wurde. Diese Grenzen lassen sich zum Teil bereits aus der zugrundeliegenden Theorie erkennen.

## Theoretische Grundlagen

Ausgehend von der Theorie des starren Kolbenstrahlers ([1,6]) lässt sich für die abgestrahlte Schallleistung der folgende frequenzabhängige Zusammenhang herleiten

$$P = v_n^2 R^2 \pi \rho_0 c \left( 1 - \frac{J_1(2kR)}{kR} \right), \quad (1)$$

mit der Kolbenschnelle  $v$ , dem Kolbenradius  $R$ , der Dichte  $\rho$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  der Luft, der Wellenzahl  $k$  sowie der Besselfunktion erster Art und Ordnung  $J$ . Die bereits berücksichtigte Integration der Abstrahlung über den Halbraum liefert die zu dieser Seite abgestrahlte Schallleistung, welche als ortsunabhängige, akustische Größe die Richtcharakteristik vernachlässigt.

Als nächster Schritt wird für den ERP der frequenz- und geometrieabhängige Abstrahlgrad - Klammerterm in Gleichung (1), dargestellt in Abbildung 1 - gleich 1 gesetzt.

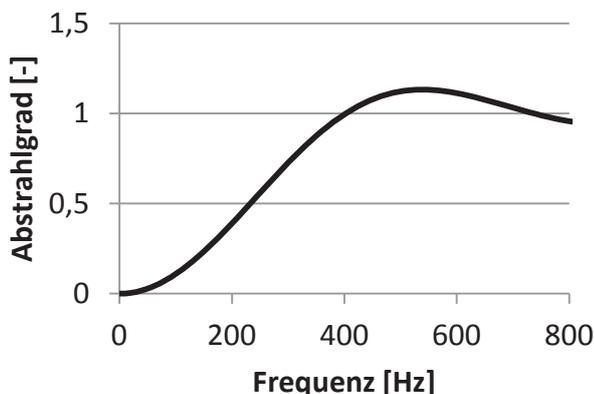


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung des Abstrahlgrades eines Kolbenstrahlers mit  $R=0,5$  m

Es ist offensichtlich, dass hierdurch gerade im niedrigen Frequenzbereich ein massiver Fehler bei der Amplitude der abgestrahlten Schallleistung vorliegt. Zudem bestimmt die Größe des betrachteten Panels auch den Frequenzbereich in dem sich der tatsächliche Abstrahlgrad im Bereich der Näherung 1 befindet.

Mit Vernachlässigung des Abstrahlgrades und Verallgemeinerung der Fläche zu  $A$  ergibt sich

$$P = A \rho_0 c v_n^2. \quad (2)$$

Da sich im Rahmen der FE-Simulation ein Panel aus einer Vielzahl von Elementen zusammensetzt, wird die Normalenschnelle der einzelnen Elemente über die Fläche integriert und gemittelt wodurch sich der ERP als

$$ERP = \rho_0 c \int_A |v_n|^2 dA \quad (3)$$

ergibt. Die Betragsbildung ist nötig, da sich durch das flexible Panel Auslöschungen der Teilschnellen ergeben können. Dies entspricht wiederum der Annahme der starren Strukturoberfläche, was nur bis zur ersten Eigenfrequenz des Panels eine gültige Näherung ist. Höherfrequente Schwingformen mit ihrer Richtcharakteristik und der ebenfalls für höhere Frequenzen auftretende akustische Kurzschluss sind somit im ERP nicht berücksichtigt.

Bei genauerer Betrachtung der Gleichung (3) wird deutlich, dass der ERP durch die konstanten Parameter für Luft und die konstante Fläche je Panel für eine einzelne Frequenz nur von der Normalenschnelle  $v$  abhängt

$$ERP \propto v_n^2. \quad (4)$$

Da die Normalenschnelle eines Blechpanels vor allem in den Eigenfrequenzen besonders groß und die Schnelle im Frequenzbereich sehr einfach mit der Verschiebung  $u$  bzw. der Beschleunigung  $a$  gekoppelt ist

$$\begin{aligned} ERP &\propto \omega^2 \cdot u_n^2 \\ ERP &\propto v_n^2 \\ ERP &\propto \frac{a^2}{\omega^2} \end{aligned} \quad (5)$$

folgt eindeutig, dass sich Verschiebung, Schnelle, Beschleunigung und ERP sehr stark ähneln. Gerade die Überhöhungen der Resonanzen sind in allen Strukturgrößen in Gleichung (5) immer gut zu erkennen.

## Probleme aus den Annahmen

Durch die gezeigten Annahmen und Zusammenhänge ergibt sich in der Praxis das Problem, dass der Einsatzbereich nicht eindeutig angegeben werden kann.

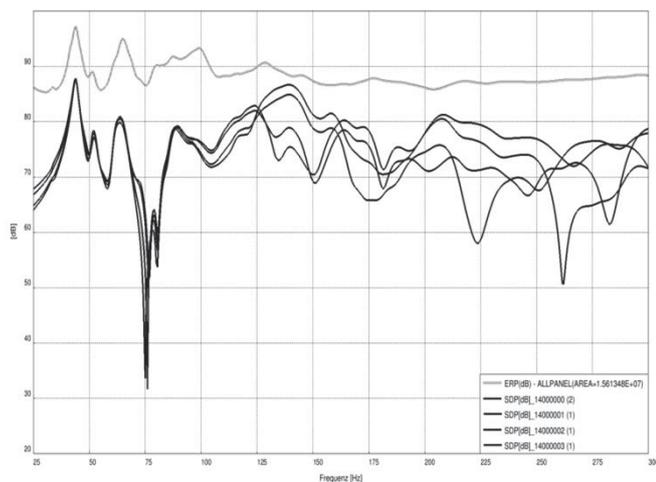
Zum einen ist die Vernachlässigung des Abstrahlgrades nur für höhere Frequenzen zulässig, zum anderen kann die Annahme des starren Panels nur bis zur ersten Eigenfrequenz als richtig betrachtet werden. Dieser Widerspruch lässt sich auch nicht auflösen.

Oftmals liegt bei der Verwendung des ERP aber lediglich das Ziel darin, nur die Frequenzen der Resonanzen zu finden und die Amplituden in diesen Resonanzen zu reduzieren. Hierdurch besitzt die genaue Amplitude keine direkte Relevanz, da hierzu eine relative Amplitudenaussage ausreichend ist. Umgekehrt kann man eine Aussage über den mittleren Pegel im hochfrequenten Bereich relativ gut treffen, da hier die Amplitude auch ohne exakten Abstrahlgrad stimmt und die Resonanzen nicht korrekt sein müssen, aber nur falls der Einfluss von Fluidmoden vernachlässigbar ist.

Dieses noch nicht erwähnte Problem tritt bei der Anwendung des ERP auf die Innenraumakustik auf. Denn hier wird die Schallleistung, die an einer Mikrofonposition ankommt erheblich von den Fluidmoden beeinflusst, welche keinerlei Eingang in den ERP finden. Auch wird meist der Schalldruckpegel gemessen - der ERP stellt aber einen Leistungspegel dar, was dazu führt, dass gemessene Schalldruckpegel im Innenraum und simulierte ERP-Leistungspegel schwer zu korrelieren sind.

## Abgleich mit Schalldruckpegeln

Trotz der erläuterten Schwierigkeiten beim Abgleich von ERP und Schalldruckpegel, lässt sich dieser, gerade in dB, leicht durchführen und analysieren. In Abbildung 2 ist dies für ein Fahrzeug exemplarisch durchgeführt.



**Abbildung 2:** Vergleich von ERP-Gesamtleistungspegel und Schalldruckpegel an den Ohrpositionen für Fahrer und Beifahrer für ein Fahrzeug im niederfrequenten Bereich

Wie zu erkennen, wird sowohl der ERP als auch der Schalldruckpegel bis zur ersten Fluidmode bei 75 Hz von den Strukturmoden dominiert. Die Fluidmode repräsentiert der ERP nicht und in den darüber liegenden Frequenzen wird der Einfluss der Fluidmoden immer stärker und der

Verlauf des ERP korreliert entsprechend immer weniger mit dem der Schalldruckpegel.

## Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich folgende Effekte nennen die der ERP vernachlässigt oder unzureichend abbildet:

- Richtcharakteristik der Abstrahlung
- Frequenzabhängiger Abstrahlgrad
- Eigenformen bzw. Verformung des Panels
- Akustischer Kurzschluss
- Fluidmoden von eingeschlossenen Kavitäten

Trotzdem hat der ERP eine klare Daseinsberechtigung in der Praxis, solange er nicht als direkter Ersatz für den Schalldruckpegel verwendet wird und seine Grenzen beachtet werden.

Gerade in der frühen Phase der Produktentwicklung – in der die Simulation mit Fluid oft keinen Sinn macht – stellt der ERP eine effiziente Alternative für die grundlegende Auslegung dar. Auch für Variantenstudien oder Optimierungen kann der ERP als Vergleichsgröße mit geringerem numerischem Aufwand verwendet werden. Die fehlende Berücksichtigung der Fluidmoden ist gerade bei der Abstrahlung von Oberflächen ins Freifeld – wie oft bei Getriebegehäusen angenommen – kein Problem, wodurch der ERP hier besonders gut einsetzbar ist.

## Danksagung

Der Dank der Autoren gilt allen Kollegen aus dem Akustik Center of Competence und der Abteilung NVH von P+Z Engineering, die mit ihren Anregungen zum Entstehen dieser Veröffentlichung beigetragen haben.

## Literatur

- [1] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- [2] Luegmair, M.; Trost, M.: Status und Trends der NVH-Simulation im Automobilumfeld aus Anwendersicht. NAFEMS-Magazin – Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete, Band 24, 67 – 75, Dezember 2012
- [3] Reger, J.; Schneider, T.; Ehlert, C.: Optimization of Car Body Parts Regarding ERP Using a Genetic Algorithm and Morphing. 3<sup>rd</sup> ECCM, 2006, 641 - 650
- [4] Diekmann, G.; Marburg, S.; Duddeck, F.: Objective Functions for Structural-Acoustic Optimization in Interior Acoustics. AIA-DAGA 2013, 373 - 376
- [5] Klaerner, M.; Marburg, S.; Kroll, L.: Estimating Structure Borne Sound Radiation by the Kinetic Energy. AIA-DAGA 2013, 2235 - 2238
- [6] Kollmann, F. G.; Schösser, T. F.; Angert, R.: Praktische Maschinenakustik. Springer Verlag, Berlin, 2006