

Verbesserte Equivalent Radiated Power (ERP) -Berechnung

Marinus Luegmair¹, Hannes Münch

¹ ARRK|P+Z Engineering, Center of Competence Akustik, 80807 München, Deutschland, Email: m.luegmair@puz.de

Motivation der ERP-Berechnung

Um trotz steigender Zahl an Varianten die Anzahl an Prototypen gleich zu halten oder gar zu reduzieren, ist in allen Zweigen der Industrie die Simulation ein wichtiger Teil der Produktentwicklung.

Dieser Trend gilt auch für die Berechnung des akustischen Verhaltens von Fahrzeugen, obwohl hier der Aufwand im Vergleich zu anderen Disziplinen immer noch relativ hoch ist [1, 2, 3]. Zum einen steigert die Berücksichtigung des Fluids die Komplexität des Modells, zum anderen erhöht sich der Rechenaufwand durch die akustische Fluid-Struktur-Kopplung [4, 5].

Trotz steigender Rechnerleistungen treibt dieser Mehraufwand die Rechenzeit spürbar in die Höhe. Dies ist vor allem in der frühen Entwicklungsphase industrieller Produkte ein Problem, in der der Fokus weniger auf exakten Ergebnissen, sondern auf qualitativen Aussagen liegt. Auch bei numerischen Optimierungen spielt die Simulationszeit eine kritische Rolle, da durch die Vielzahl an zu berechnenden Variationen die gesamte Rechenzeit proportional steigt.

Eine mögliche Lösung hierfür ist der ERP, der rein aus der Bewegung der Struktur berechnet wird und somit ohne die Modellierung und Berechnung des Fluids auskommt [6, 7]. Gerade in der Optimierung wird er sehr gerne als Zielgröße verwendet, da trotz der vereinfachten Berechnung eine Abschätzung der Bereiche mit der höchsten akustischen Abstrahlung möglich ist [1, 8, 9].

Zugrundeliegende Theorie

Ausgehend von der allgemeinen Gleichung der akustischen Leistung

$$P = \Re \left\{ \int_A \vec{I} d\vec{A} \right\} \quad (1)$$

mit Intensität I und Fläche A , lässt sich der ERP als eine Näherung für die tatsächliche von einer Struktur abgestrahlte Leistung herleiten.

Annahme der ebenen Wellenausbreitung

Die Intensität lässt sich bekanntermaßen durch die Multiplikation von Schalldruck p und Schallschnelle v bestimmen

$$\vec{I} = p \vec{v} . \quad (2)$$

Für die Vereinfachung der Berechnung wird vorausgesetzt, dass sich die betrachtete Fläche ideal starr

verhält und wesentlich größer ist als die abgestrahlte Wellenlänge. Dies lässt sich einfach in der Annahme der ebenen Wellenabstrahlung zusammenfassen. Dadurch sind sowohl Schalldruck als auch Schallschnelle reell und die Darstellung kann in einer Dimension erfolgen. Somit vereinfacht sich Formel (2) zu

$$I = p v . \quad (3)$$

Nutzt man dies und die Kennimpedanz von Luft

$$Z = \frac{p}{v} = \rho_L c_L , \quad (4)$$

mit der Dichte von Luft ρ_L und der Schallgeschwindigkeit in Luft c_L , die genau für den Fall der ebenen Wellenausbreitung gültig ist, ergibt sich schließlich

$$P = \int_A \rho_L c_L v^2 d\vec{A} \quad (5)$$

aus Formel (1).

Gleichheit von Struktur- und Schallschnelle

Die vereinfachte Leistungsberechnung aus Gleichung (5) benötigt aber immer noch die Schallschnelle und somit eine Fluidgröße. Um hier eine rein Struktur basierte Größe abzuleiten, wird die Schallschnelle v der Normalenschnelle $v_{S,n}$ der Struktur gleichgesetzt.

Dies gilt für Flächen mit hoher Impedanz wie etwa Blechen sehr gut. Bei akustisch wirksamen Oberflächen - wie sie etwa oft in Fahrzeugen in Form von Teppichen verbaut werden - gilt dies aber nur bedingt.

Mit dieser letzten Annahme ergibt sich dann die klassische ERP-Gleichung

$$ERP = \rho_L c_L \int_A |\hat{v}_{S,n}|^2 dA , \quad (6)$$

welche nur noch von Konstanten und der Normalenschnelle der Struktur abhängt.

Unzulänglichkeiten der klassischen ERP-Berechnung

Wie in [10] gezeigt, besitzt die klassische ERP-Berechnung aufgrund der enthaltenen Annahmen einige Beschränkungen.

Diese sind zusammengefasst folgende:

Realer Abstrahlgrad

Wie im folgenden Abschnitt zu sehen ist, besitzt der Abstrahlgrad besonders im niederfrequenten Bereich einen hohen Einfluss auf die tatsächlich abgestrahlte Leistung.

Interferenzen

Durch die Annahme der ebenen Wellenabstrahlung geht die Information über eventuelle Interferenzen, und somit über die Richtcharakteristik im akustischen Feld verloren. Diese resultiert zum einen aus der endlichen Größe der abstrahlenden Fläche, speziell im niederfrequenten Bereich, zum anderen aus der Tatsache, dass die reale Struktur sich nicht ideal starr verhält. Gerade beim Erreichen höherer Moden der Struktur haben die gegenphasig schwingenden Bereiche einen großen Einfluss auf die reale Abstrahlung.

Akustischer Kurzschluss

Wie sich aus dem vorherigen Punkt direkt ergibt, wird auch der akustische Kurzschluss durch die ERP-Vereinfachungen der starren Oberfläche vernachlässigt.

Fluidmoden

Da der ERP oft für Untersuchungen der Innenraumakustik verwendet wird, sind hier auch die vorhandenen Fluidmoden zu berücksichtigen. Sie haben einen großen Einfluss auf das resultierende akustische Feld, können aber vom ERP nicht abgebildet werden, da er nur auf Strukturgrößen basiert.

Entwicklung der verbesserten ERP-Berechnung

Durch eine Integration des Fluids in die Berechnung geht der Vorteil der reduzierten Modellierung und Rechenzeit verloren. Es bleibt somit nur der Schritt den analytisch korrekten Abstrahlgrad des Kolbenstrahlers, wie in [11] gezeigt, als Näherung des realen Abstrahlgrads in die Berechnung einzubauen.

Für diesen Fall ist der Abstrahlgrad

$$\sigma = \left(1 - \frac{J_1(2kR)}{kR}\right) \quad (7)$$

mit der Besselfunktion 1. Ordnung und Art, vergleiche Abbildung 1, gegeben. In den Abstrahlgrad geht somit die Fläche - bzw. der Radius R der äquivalenten Kreisfläche - und die Frequenz - über die Wellenzahl k - ein. Da dieser Faktor nicht vom Ort abhängt, kann er als Konstante in die ERP-Gleichung eingefügt werden.

Somit ergibt sich die Formel für den verbesserten ERP zu

$$ERP_{adv} = \left(1 - \frac{J_1(2kR)}{kR}\right) \rho_L c_L \int_A |\hat{v}_{S,n}|^2 dA \quad (8)$$

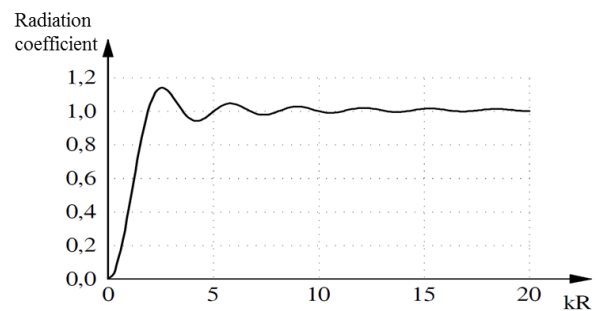


Abbildung 1: Abstrahlgrad σ in Abhängigkeit von der Helmholtzzahl $He = kR$

Vergleich der Verfahren

Vergleicht man den klassischen ERP mit dem verbesserten ERP (Abbildung 2), so erkennt man besonders den Einfluss im niederfrequenten Bereich. Da gerade dieser Bereich typischer Weise das in der Simulation betrachtete Frequenzband darstellt, ist die Verbesserung offensichtlich.

Im nächsten Schritt kann man den ERP-Wert, der einen Leistungspegel darstellt, auch direkt mit dem Schalldruckpegel vergleichen. Dies ist zwar ein Vergleich von zwei unterschiedlichen physikalischen Größen, aber sowohl in der Simulation als auch in der Messung stellt der Schalldruckpegel die typische relevante akustische Größe dar. Deshalb wird trotzdem oft versucht aus dem ERP eine Vorhersage für die Schalldruckpegel zu machen. Dieser direkte Vergleich (Abbildung 2) zeigt, dass auch hier zumindest eine qualitative Verbesserung möglich ist. Wie gezeigt erkennt man aber auch, dass der ERP niemals den Einfluss von Fluidmoden - in diesem Fall liegt die Erste bei 75 Hz - abbilden kann.

Empfehlungen für die ERP-Verwendung

Aufgrund seiner effizienten Berechnungsweise ist der ERP gerade in der frühen Phase der Produktentwicklung - in der viele Varianten schnell und grundsätzlich untersucht werden - und als Zielgröße für Optimierungen wertvoll.

Durch die Integration des korrekten analytischen Abstrahlgrades des Kolbenstrahlers ist seine Aussage gerade im niederfrequenten Bereich besser und näher an der Realität.

Trotz alledem steigt die Abweichung vom realen Abstrahlverhalten bei dünnen Strukturen durch die Annahme der starren Oberfläche sowie bei Innenraumproblemen, durch die Vernachlässigung des Fluids und seiner Moden. Auch kann der ERP als Leistungspegel nur indirekt eine Information zu den Schalldruckpegeln geben.

Im Umkehrschluss lässt sich zusammenfassen, dass der verbesserte ERP bei einer Anwendung auf steife Strukturen, wie z.B. Getriebegehäuse, und bei der Abstrahlung ins Freifeld, bei der keine Fluidmoden auftreten, die besten Näherungen für die tatsächliche abgestrahlte Schallleistung liefert.

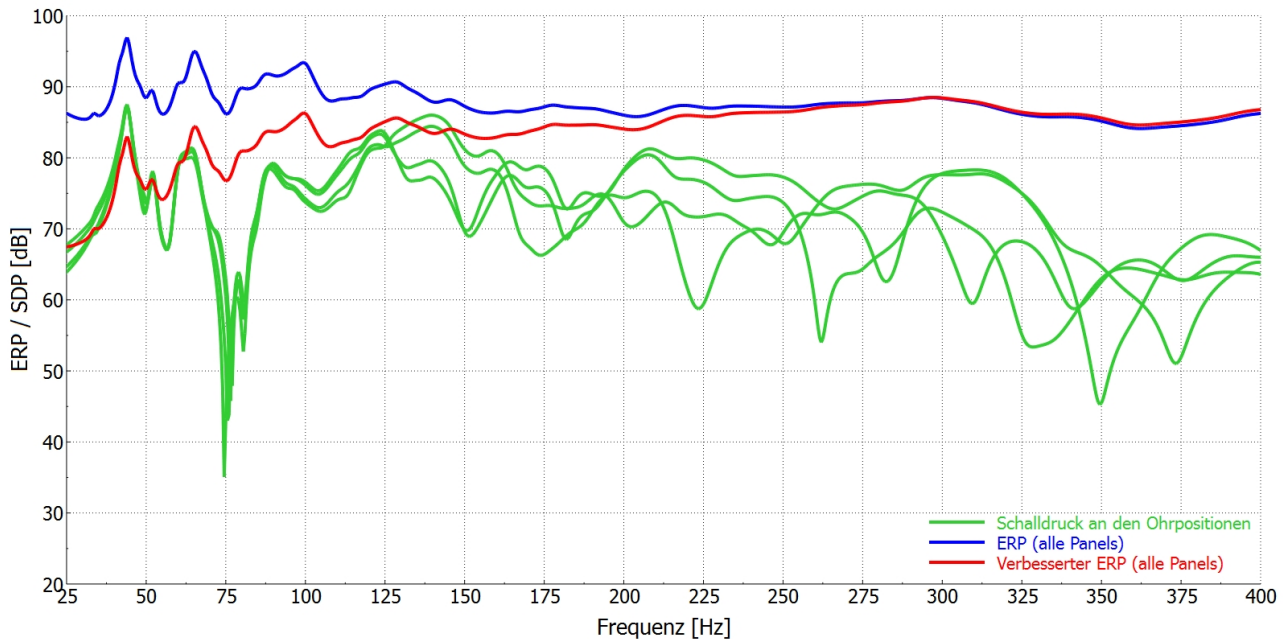


Abbildung 2: Vergleich von klassischem ERP, verbessertem ERP und ausgewählten Schalldruckpegeln (SDP) für eine Fahrzeugkarosserie

Danksagung

Die Autoren danken allen Kollegen des Center of Competence Akustik bei ARRK|P+Z Engineering die mit ihren Diskussionen und Anmerkungen diese Arbeit unterstützt haben.

Literatur

- [1] Reger, J.; Schneider, T.; Ehlert, C.: Optimization of Car Body Parts Regarding ERP Using a Genetic Algorithm and Morphing. Proceedings of the 3rd European Conference on Computational Mechanics, Lisbon, Portugal (2006)
- [2] Luegmair, M.; Trost, M.: Status und Trends der NVH-Simulation im Automobilumfeld aus Anwendersicht. NAFEMS Magazin - Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete 24 (2012), 67-75
- [3] Luegmair, M.; Kecalevic, N.: Simulation der Fahrzeugakustik - Von der Modalanalyse bis zum Schalldruckpegel. VDI Vorträge, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Deutschland (2014), 8. April
- [4] Ihlenburg, F.: Finite Element Analysis of Acoustic Scattering. Springer Verlag, Berlin, 1998
- [5] Marburg, S.; Nolte, B.: Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods. Springer Verlag, Berlin, 2007
- [6] Fritze, D.; Marburg, S.; Hardtke, H.J.: Estimation of Radiated Sound Power: A Case Study on Common Approximation Methods. Acta Acustica united with Acustica 95 (2009), 833-842
- [7] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [8] Diekmann, G.; Marburg, S.; Duddeck, F.: Objective Functions for Structural-Acoustic Optimization in Interior Acoustics. Fortschritte der Akustik - DAGA (2013), 373-376
- [9] Klaerner, M.; Marburg, S.; Kroll, L.: Kinetische Energie als Maß für die Schallabstrahlung. Fortschritte der Akustik - DAGA (2014), 126-127
- [10] Luegmair, M.; Münch, H.: Bewertung der Gültigkeit von ERP-Berechnungen in der Fahrzeugakustik Fortschritte der Akustik - DAGA (2014), 100-101
- [11] Münch, H.: Equivalent Radiated Power - Sensibilisierung für Grenzen und Potenziale einer akustischen Berechnungsmethode. Studienarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, 2014