

Aktive Geräuschminderung und Active Sound Design in PKW-Innenräumen

Rolf Schirmacher, Fabian Evert und Roland Lippold

Müller-BBM, Robert-Koch-Straße 11, 82110 Planegg, Deutschland, Email: RSchirmacher@MuellerBBM.de

Einleitung

Eine viel diskutierte Anwendung für Active Noise Control (ANC) und Active Sound Design (ASD) stellt der Fahrzeuginnenraum von PKW dar. Leider geraten bei der Begeisterung über die Technologien die harten akustischen Randbedingungen für ihre Anwendbarkeit oft in den Hintergrund. Dieser Beitrag diskutiert anhand einfacher Abschätzungen die typischen akustischen Eigenschaften von PKW-Innenräumen, von relevanten Geräuschen im PKW-Innenraum sowie die jeweilige Anwendbarkeit von ANC und ASD. Ziel dabei ist, ein vertieftes Verständnis der akustischen Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung dieser Technologien zu geben.

Akustik von PKW-Innenräumen

Qualitativ lassen sich die akustischen Eigenschaften von PKW-Innenräumen grob in 3 Bereiche unterteilen.

Tieffrequent wird das Schallfeld im Fahrzeug bei jeder Frequenz durch einzelne, dominante Moden bestimmt. Diese Moden sind mitunter relativ schwach bedämpft. Mittelfrequent steigt die Modendichte an. Da auch die Wirksamkeit des im Fahrzeug verbauten Absorptionsmaterials zunimmt, werden die Moden über der Frequenz immer breiter und die modale Überappung bei jeder Frequenz nimmt zu.

Hochfrequent stellt ein PKW-Innenraum einen stark bedämpften Raum mit einigen guten Reflektoren (z.B. Scheiben) dar.

Im Weiteren sei versucht, diese qualitativen Bereiche anhand einfacher akustischer Modellvorstellungen quantitativ genauer zu fassen.

Modale Beschreibung

Im tieffrequenten Bereich bietet sich die modale Beschreibung des Innenraums an. Dazu sei der Fahrzeuginnenraum als Quader mit (PKW-typischen) Kantenlängen von 3m, 1,5m und 1m beschrieben. Abbildung 1 zeigt für diesen Raum die Zahl der akustischen Moden über der Frequenz. Neben der Raumgröße ist eine korrekte Annahme der Dämpfungseigenschaften des Raumes für die akustischen Eigenschaften relevant. Hier sei eine PKW-typische Nachhallzeit angenommen (Abbildung 2). Mit dieser Nachhallzeit ergibt sich für die einzelnen Moden die in Abbildung 3 gezeigte 3 dB-Bandbreite. Aus dieser Bandbreite und der Modenzahl folgt die in Abbildung 4 gezeigte Anzahl der innerhalb ihrer 3dB-Bandbreite überlappenden Moden. Die 3dB-Bandbreite ist eine sehr vorsichtige Abschätzung der Anzahl der für das Schallfeld bei der jeweiligen Frequenz relevant bei-

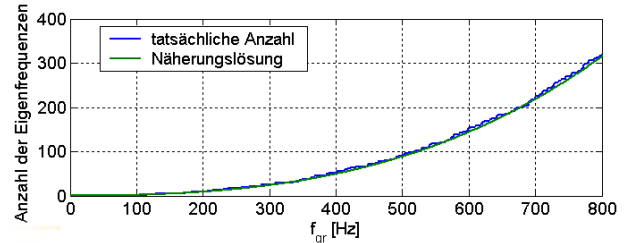


Abbildung 1: Anzahl der Moden in einem $3 \times 1,5 \times 1m^3$ Quaderraum als Modell für einen PKW-Innenraum.

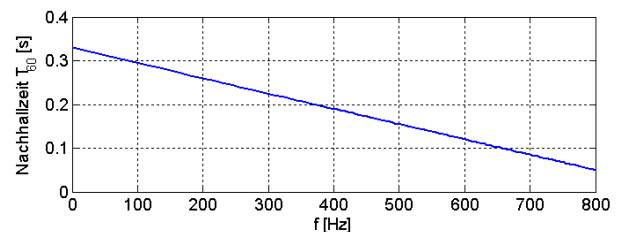


Abbildung 2: Angenommene Nachhallzeit T_{60} eines typischen PKW-Innenraumes.

tragenden Moden, eine daraus abgeleitete Abschätzung der Anzahl der für ANC benötigten unabhängigen Aktor- und Fehlersensorkanäle ist also eher zu niedrig. Es zeigt sich jedoch sehr klar, dass unter Verwendung der heutzutage in einem PKW typischerweise eingesetzten 4 bis 6 Tief-/Mitteltonlautsprecher ein ANC-System nur bis ca. 300 Hz eine über den modalen Ansatz beschreibbare globale Minderung im Innenraum erreichen kann.

Freifeld-Beschreibung

Für eine alternative Betrachtung des hochfrequenten Bereiches bietet sich als akustisches Modell aufgrund der starken Absorption zunächst eine Freifeld-Beschreibung an.

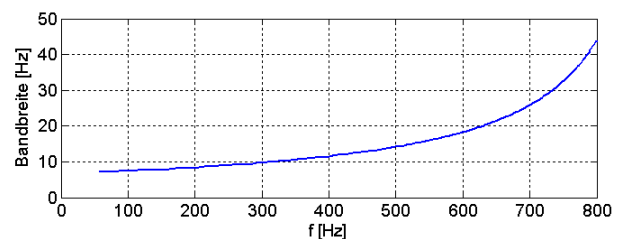


Abbildung 3: 3 dB-Bandbreite der Moden unter der Annahme einer Nachhallzeit wie in Abbildung 2 dargestellt.

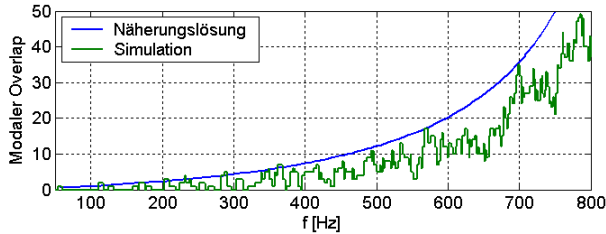


Abbildung 4: Anzahl der sich mit ihrer 3 dB-Bandbreite im beschriebenen PKW-Innenraummodell überlappenden Moden, grün anhand der Simulation ausgezählt und blau nach der Näherungsformel aus [1].

Für ANC-Systeme im Freifeld wird für Modellierungen von zwei unabhängigen Schallquellen ausgegangen, die so eingestellt werden, dass sich an einem Fehlersensor perfekte Auslöschung ergibt. Dann bildet sich entsprechend der destruktiven Interferenz der beiden Felder ein Ruhebereich heraus. Nimmt man für diesen Ruhebereich eine Minderung um 10 dB an, so ergibt sich dafür (ungefähr) eine Ausdehnung von $\lambda/10$. Abbildung 5 zeigt diese Grenze aufgetragen über der Frequenz. Es zeigt sich, dass unter Anwendung dieser Freifeldannahmen im PKW-Innenraum für eine 10 dB-Abnahme bei 300 Hz ein Fehlersensor-Abstand von bis zu 10 cm zulässig wäre. Eine Umsetzung ist im PKW für den gesamten (relevanten) Innenraum nicht vernünftig. Im Ergebnis bedeutet dies, dass bis ca. 300 Hz die Modendichte im PKW globale ANC-/ASD-Systeme ermöglicht, für höhere Frequenzen die akustischen Randbedingungen jedoch einen nicht realistischen Aufwand erzwingen würden.

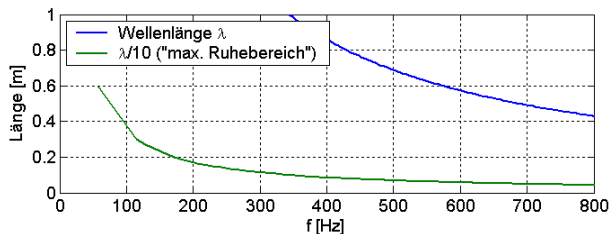


Abbildung 5: Freifeld-Wellenlänge λ und sich daraus mit der „Daumenregel“ $\lambda/10$ ergebender Ruhebereich um ein Fehlermikrofon bei ANC-Anwendungen.

Ergänzende Anmerkungen

Einige weitere Punkte, die sich aus der beschriebenen Art der akustischen Analyse für ANC- und ASD-Systeme ergeben, sollten ergänzend festgehalten werden:

- Die Bedämpfung des Innenraumes verhindert in der Regel scharfe Resonanzen und führt damit zu recht „gutwilligen“ Sekundärstrecken (Übertragungsfunktionen Lautsprecher – Fehlersensoren). Dies ist für Regelungsstrategien wichtig.
- Sekundärstrecken werden für hohe Frequenzen entsprechend der abnehmenden Wellenlänge empfindlicher gegen eine Änderung der geometrischen Rand-

bedingungen wie Besetzungsänderungen, Bewegungen, Sitzverschiebungen. Um ein ANC-System dagegen regelungstechnisch robust zu machen ergeben sich ergänzend Einschränkungen im Arbeitsfrequenzbereich.

- Für „gutwillige Hörer“ lässt sich für eingeschränkte Hörpositionen ein lokales ANC-/ASD-System sinnvoll bis ca. 500-600 Hz aufbauen. Dies findet z.B. in der Akustik-Entwicklung Anwendung.

Geräuschquellen

Betrachtet man vor dem Hintergrund der akustischen Einschränkungen die typischen Innengeräuschquellen bei PKW, so ergibt sich die folgende Situation:

Motor-/Antriebsstranggeräusche bestehen meist nur aus ganzen und „halben“ Vielfachen der (bekannten) Drehfrequenz. Die Signale sind gut präzifizierbar bzw. aus der rückkopplungsfreien Messung ableitbar. Allerdings sind sie hochdynamisch, die Drehzahlen liegen zwischen 600 1/min und 7000 1/min, Hochläufe dauern meist unter 10 s, Lastwechsel erfolgen in Sekundenbruchteilen. Die typisch pegelbestimmenden Anteile liegen im unteren Frequenzbereich. Damit ist eine aktive Minderung sinnvoll möglich. Der Gesamteindruck des Klangcharakters wird zusätzlich durch höhere Harmonische geprägt, für die eine global wirksame Regelung nicht mehr möglich ist. Hier ist jedoch ein Zuspätschieben zur aktiven Klanggestaltung möglich und auch akustisch eine gute Lösung.

Rollgeräusche entstehen durch die Fahrbahnrauigkeit und sind schlecht präzifizierbar. Ein ANC-System muss also zeitlich kausal die Signalausbreitung modellieren. Ergänzend ist die Anzahl der unabhängigen Quellen mit 4 Rädern und jeweils mehreren Freiheitsgraden hoch, die Ausbreitung ist komplex. Spektral liegt das Rollgeräusch meist unter 300 Hz, allerdings gibt es bei Impulsanregung (Schlagloch, etc.) auch höhere relevante Anteile. Im Ergebnis ist ANC für Rollgeräusch mit großem Aufwand verbunden und liefert meist keine hohen Reduktionen (maximal einige dB). Ausnahmen stellen die aktive Bedämpfung der (ersten) Innenraummode dar, die beispielsweise über ein rückgekoppeltes System auch unabhängig von der Anregung erfolgen kann und dann auch für Rollgeräusche wirksam ist. Solche Systeme sind beispielsweise von Honda zwischenzeitlich in die Serie eingeführt.

Windgeräusche sind sehr breitbandig (bis einige kHz), stochastisch und entstehen verteilt über nahezu die gesamte Außenhaut des Fahrzeugs. Damit ist eine aktive Minderung im Innenraum im Allgemeinen nicht möglich (Ausnahme: Sonderprobleme wie periodische Wirbelablösungen oder „Buffeting“).

Literatur

- [1] S.J.Elloitt. Signal Processing for Active Control. Academic Press, London, 2001