

## Praktische Aspekte beim Einsatz von ANC-Systemen in PKW

Rolf Schirmacher, Roland Lippold, Frank Steinbach und Florian Walter

Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Straße 11, 82152 Planegg, Deutschland, Email: Rolf.Schirmacher@MuellerBBM.de

### Einleitung

Die Reduzierung des Motorengeräusches in einem PKW-Innenraum gilt als eine der klassischen Anwendungen von Active Noise Control. Erste experimentelle Demonstratoren sind seit mehr als 15 Jahren verfügbar. Soll die Technologie jedoch in der Serienfertigung eingesetzt werden, sind zahlreiche Anforderungen zu erfüllen, die bei ersten Demonstratoren vernachlässigt werden können. Hierzu zählen beispielsweise Fragen der Stabilität und Robustheit bei Änderungen der Randbedingungen im Fahrzeug (Temperatur, Besetzungszustand) oder die Qualität und Verfügbarkeit von Motordaten. Dieser Beitrag stellt einige dieser Aufgabenstellungen mit typischen praktischen Bandbreiten vor und zeigt den Stand der Entwicklung für solche ANC-Systeme auf.

### Systembeschreibung

Im weiteren wird von einem ANC-System zur Minderung des ordnungsbezogenen Motorgeräusches im Fahrzeug ausgegangen. Dabei wird ein Feed-Forward-Ansatz verfolgt, in dem im Kern ein Filtered-X-LMS in gemischter Zeit-Frequenzbereichsimplementation eingesetzt wird. Eine typische Systemkonfiguration besteht aus 4-5 Lautsprechern und bis zu 6 Mikrofonen. Damit werden 4-5 Motorordnungen im Arbeitsfrequenzbereich von 30 – 250 Hz gemindert.

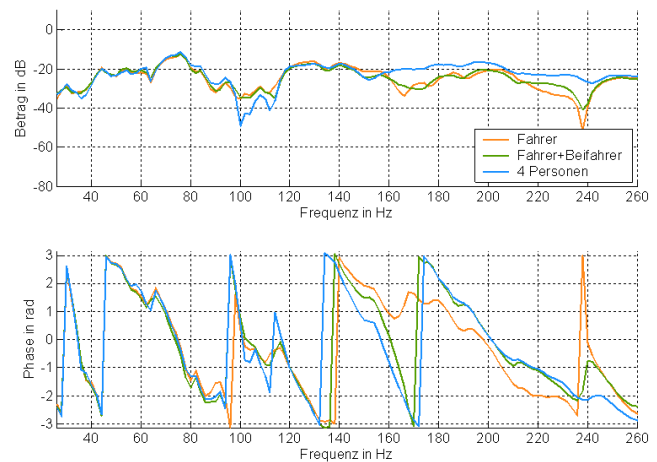
Für den Filtered-X-Ansatz wird eine Schätzung der Sekundärstrecken benötigt. Die reale Sekundärstrecke und die Schätzung bzw. die Schätzfehler bestimmt wesentliche Eigenschaften des Algorithmus wie Stabilität, Konvergenzgeschwindigkeit und Schleifenverstärkung des Reglers. Als klassisches Stabilitätskriterium für den Filtered-X gilt im einkanalen Fall ein maximaler Phasenfehler von  $90^\circ$  der Schätzung.

### Akustische Sekundärstrecke

Im Frequenzbereich unter 300 Hz lässt sich das Schallfeld in einem PKW-Innenraum modal beschreiben. Führt man eine Modalanalyse des Luftschallfelds durch, so ergibt sich folgendes:

- Der Innenraum ist stark bedämpft, die modalen Dämpfungen liegen zwischen 2 und 5 %, im Einzelfall auch deutlich höher.
- Die Modenzahl steigt proportional der Frequenz  $f$  und nicht  $f^3$  (wie bei schallharten Volumen).
- Die Moden sind teilweise durch starke Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) mit der Karosserie und ihren Komponenten geprägt.

- Die Öffnung von Fenstern o.ä. führt zum Auftreten einer zusätzlichen Helmholtz-Resonanz sowie zu einer Verschiebung der Eigenfrequenzen und Änderungen der Modenformen (Schalldruckverteilungen).
- Die Moden reagieren verschieden auf die Änderung der Luftschall-Randbedingungen (u.a. von der Relevanz der FSI für die Mode abhängig).



**Abbildung 1:** Übertragungsfunktion zwischen Türlautsprecher und Mikrophon im Dachhimmel in Abhängigkeit vom Besetzungszustand eines Fahrzeugs

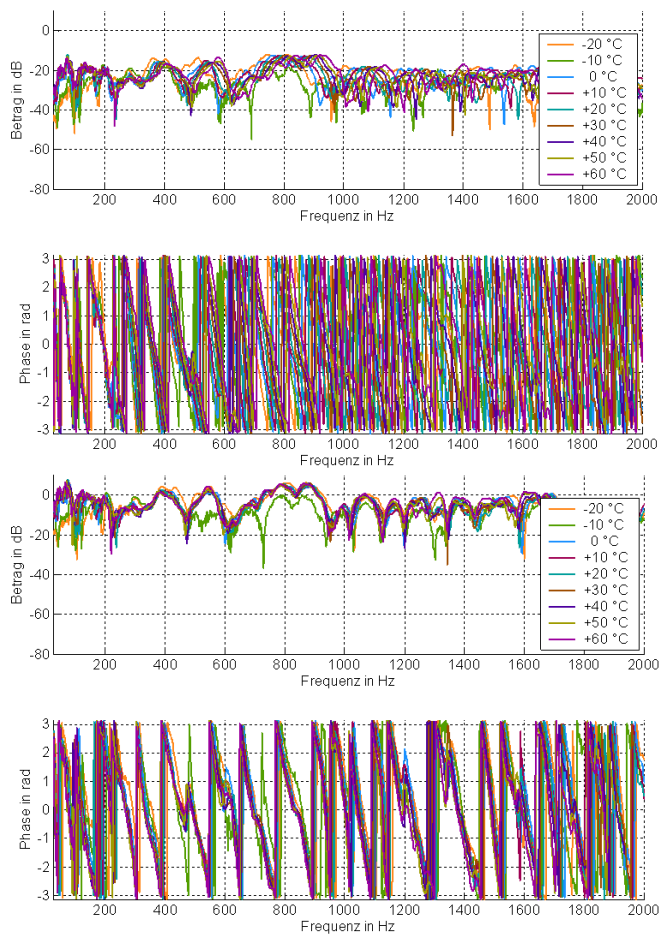
Die Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der Übertragungsfunktion zwischen einem Türlautsprecher und einem Mikrophon im Dachhimmel von der Besetzung in einem PKW. Die Streubreiten für Fensteröffnungen liegen ähnlich.

Eine weitere relevante Größe ist die Temperatur. Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine Übertragungsfunktion für den Temperaturbereich von  $-20$  bis  $+60^\circ\text{C}$ . Dabei ergeben die reinen Messdaten ein recht verwirrendes Bild (oben), das sich aber durch eine Korrektur proportional  $\sqrt{T}$  schnell lichtet (unten). Für tiefe Frequenzen passt dieses einfache Modell jedoch offensichtlich nicht.

### Schleifenverstärkung

Für die Anwendung eines ANC-Systems ist neben der Minderung bei den Motorordnungen die gesamte akustische Wirkung des Systems entscheidend. Es darf zu keiner Beeinflussung von Sprach- oder Musiksignalen oder anderen klanglichen Artefakten kommen. Diese können jedoch bei ungeschickter Gestaltung der Algorithmen und Parametrierung durchaus auftreten.

Zur Untersuchung des Gesamtsystemverhaltens ist es hilfreich, das ANC-System nicht als adaptive Steuerung, sondern als durch die Drehzahl gesteuerte Regelung zu



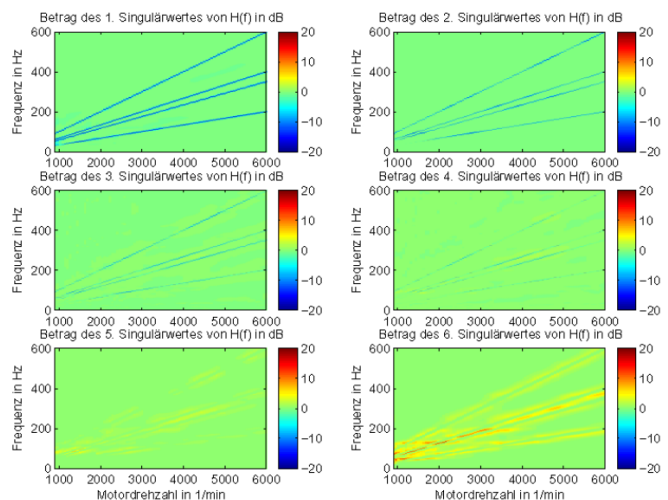
**Abbildung 2:** Übertragungsfunktion zwischen Türlautsprecher und Mikrofon im Dachhimmel in Abhängigkeit von der Temperatur des Fahrzeugs, oben: unkorrigiert, unten: auf 20 °C korrigiert

analysieren. Dies gestattet (für jede Drehzahl, Ordnungsauswahl, etc.) die Berechnung der geschlossenen Schleifenverstärkung über alle Frequenzen und damit die Betrachtung aller akustischen Einflüsse des Systems.

Abbildung 3 zeigt die 6 Singulärwerte eines schlecht parametrisierten ANC-Systems mit 4 Lautsprechern und 6 Mikrofonen. Gemindert werden die 2., 3., 4. und 6. Motorordnung. Die Minderung ist an den kleinen Singulärwerten gut erkennbar. Allerdings zeigt der größte Singulärwert das Auftreten von deutlich störenden Überhöhungen bei einigen festen Frequenzen, und *zwischen* den eng benachbarten Ordnungen. Diese hier analytisch ermittelten Effekte treten im Fahrzeug auch real auf und werden mitunter als Instabilitäten gedeutet.

## Motordaten

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der ANC-Anwendung im PKW ist die Bereitstellung von Drehzahlinformationen. Der traditionelle Ansatz besteht in der Verwendung eines analogen Pulssignals, das eine phasenstarre Kopplung des ANC-Systems an den Motor erlaubt. Dieser Ansatz ist in modernen Fahrzeugen mit digitalen Bussystemen allerdings wenig zweckmäßig. Hier sind CAN-Bussysteme (asynchrone, serielle Busse ohne



**Abbildung 3:** Singulärwerte der geschlossenen Schleifenübertragungsfunktion eines schlecht parametrisierten ANC-Systems.

garantiertes Antwortzeitverhalten) derzeit das Standard-Medium für die Motordatenübertragung. Dies bringt für ANC-Systeme neue Herausforderungen mit sich. Hinzu kommt die Aktualisierungsrate für die Drehzahldaten auf dem Bus. Während sie in Motornähe noch bei typisch 10 ms liegt, ist an typischen Einbaupositionen für Infotainment-Systeme wie den Kofferraumseitenwänden meist nur ein Karosserie-CAN mit 100 ms und dazu ggf. weiteren Verzögerungen durch Gateways anzutreffen. Dieses verlangt entsprechende Maßnahmen auf Seiten des ANC-Systems, um mit geringen Datenraten und bei Verzögerung gute Ergebnisse zu erzielen.

## Stand der ANC-Entwicklung

Mit aktuellen ANC-Systemen sind die aufgezeigten Problemstellungen beherrschbar. Die Bandbreite der Sekundärstreckenänderungen kann messtechnisch erfasst und teilweise auch modelliert werden. Auf dieser Grundlage können Regelalgorithmen so entworfen und parametrisiert werden, dass sie bei diesen Änderungen robust sind. Erfreulicherweise gelingt dies meist ohne nennenswerte Performance-Einbußen. Eine Ausnahmesituation ergibt sich nur beim Öffnen der Türen oder Heckklappe, in der ein System automatisch um- oder abschalten sollte.

Die Gesamtfunktion und akustische Wirkung des Systems ist sehr gut verstanden. Auf der Grundlage analytischer Simulationen kann z.B. die Algorithmusauswahl und -parametrisierung so bestimmt werden, dass akustische Artefakte sicher ausgeschlossen sind und gleichzeitig Performance-Einschränkungen vermindert werden.

Die für die Integration in ein Fahrzeug notwendige Anbindung an fahrzeugtypische Schnittstellen wie langsame CAN-Busse liefert Ergebnisse, die mit einer Pulsanbindung vergleichbar sind.

Durch die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der vergangenen Jahre ist damit ein Serieneinsatz von ANC-Systemen wesentlich vorbereitet worden.