

Zukünftige Strategien zur Abstimmung von Systemen für die aktive Geräuschbeeinflussung in Serienfahrzeugen

Stefan Kerber und Rolf Schirmacher

Müller-BBM Active Sound Technology GmbH., Robert-Koch-Str. 11, 82152 Planegg,
E-Mail: [Stefan.Kerber, Rolf.Schirmacher]@mbbm.com

Einleitung

Systeme zur aktiven Geräuschbeeinflussung sind heute nicht mehr ein Privileg für Fahrer von hochpreisigen Fahrzeugen sondern sie sind im Massenmarkt angekommen. Das gilt sowohl für Systeme zur aktiven Geräuschminderung (ANC) als auch für solche zum aktiven Geräuschdesign. Beide Systeme beruhen prinzipiell darauf, dass über die Audioanlage im Fahrzeug gezielt Schalle zugespielt werden die sich mit dem natürlichen Innengeräusch überlagern und so erlauben das Klangbild des Fahrzeuges gezielt zu formen [1][3].

Systeme zur aktiven Geräuschbeeinflussung sind heute üblicherweise Softwarebibliotheken die, um optimal funktionieren zu können an ein Fahrzeug angepasst werden müssen („Tuning“). Eingangparameter sind die akustischen Eigenschaften des Fahrzeuginnenraums zusammen mit den Eigenschaften der Audio-Anlage, sowie die Motorisierung. Erstere werden als Übertragungsfunktionen spezifiziert und sind relevant für das Klangbild und, im Fall von ANC, die Stabilität der Algorithmen. Die Motorisierung hingegen definiert die Anregung im Innenraum ohne ANC und ist damit wichtig um die zusätzliche Audioausgabe des Algorithmus zu definieren.

Werden ANC Systeme heute breit in der Serie eingesetzt, so entstehen durch die beschriebenen Begebenheiten einige Herausforderungen. So kann die Variantenzahl für Tunings schnell sehr hoch werden, da im Prinzip für jede Kombination aus Fahrzeugbauform, Motorisierung und Audioanlage ein eigenes Tuning notwendig wird. Bei drei Bauformen, drei Motorisierungen und drei verschiedenen Audioanlagen ergeben sich bereits 27 Tunings. Unter der optimistischen Annahme, dass ein Tuning ein Fahrzeug für nur eine Woche bindet entsteht hier bereits ein Aufwand von ca. einem halben Mannjahr.

Erschwerend kommt hinzu, dass Fahrzeugtunings vernünftigerweise erst dann durchgeführt werden können, wenn die Fahrzeuge in einem akustisch fertigen Zustand zur Verfügung stehen. Es führt offensichtlich zu Problemen, wenn nach der ANC Abstimmung am Fahrzeug nochmal Baumaßnahmen durchgeführt werden, die sich auf einen der Eingangparameter des ANC Systems auswirken, wie das z.B. durchs verbauen einer geänderten Abgasanlage der Fall wäre. Umgekehrt heißt das aber, dass ANC Systeme erst spät im Serienentwicklungsprozess abgestimmt werden können, zu einem Zeitpunkt wo Fahrzeugverfügbarkeit ohnehin sehr limitiert ist und möglicherweise gar nicht mehr genügend Zeit vor SOP vorhanden ist um alle Varianten ausführlich abzustimmen.

Eine Möglichkeit die geschilderten Probleme zu entschärfen ist es, Teile des Tuningprozesses aus dem Fahrzeug an den Rechnerarbeitsplatz zu verlegen. Dafür werden geeignete Algorithmen benötigt, die es erlauben einzelne Tuningschritte mit angemessener Genauigkeit und erträglicher Rechenzeit durchzuführen. Dieser Artikel stellt das Prinzip eines solches Verfahren für ein reines ANC System dar und vergleicht real gemessene Daten aus einem Tuningprozess mit denen aus einer Simulation. Ausgehend von einer Beschreibung der Prozessschritte die wir heute für ein Serientuning für notwendig erachten wird die Methodik knapp eingeführt, um dann Ergebnisse einzelner Tuningschritte direkt zu vergleichen.

Ablauf eines ANC Serientunings

Ein ANC Serientuning besteht heute aus verschiedenen Prozessschritten die in einer festen Reihenfolge abgearbeitet werden müssen:

1. Einbau von Tuning- und Messhardware
2. Bestandsaufnahme im Fahrzeug
3. Messung akustischer Innenraumeigenschaften
4. Definition und Feinschliff von Sound-Designs
5. Absicherung
6. Abnahmemessung und Dokumentation

Nach dem Einbau von Tuning- und Messhardware wird heute eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Diese dient vor allem dazu zu klären wie das Fahrzeug aktuell ohne ANC klingt, bei welchen Drehzahlen akustische Problembereiche liegen und welche zusätzlichen klangbestimmenden Funktionalitäten zu berücksichtigen sind (z.B. verschiedene Klangbilder durch Zylinderabschaltung). Dieser Schritt schließt mit einer Messung des akustischen Ist-Zustandes für alle ANC relevanten Betriebspunkte.

Unabhängig davon wird eine Vermessung der akustischen Eigenschaften des Fahrzeuginnenraums und der Audio-Anlage durchgeführt. Tatsächlich werden hier Übertragungsfunktionen von den Lautsprechern zu den Fehlermikrofonen, unter Berücksichtigung sämtlicher Wandler und Verstärkercharakteristiken durchgeführt. Diese Messungen werden mehrfach für verschiedene Konfigurationen des Fahrzeugs, wie beispielsweise Besetzungszustände durch Fahrzeuginsassen oder Kombinationen aus Fensteröffnungen gemacht. Das ist wichtig, um die Stabilität des Algorithmus für möglichst viele alltägliche Situationen sicherstellen zu können.

Es folgt der vierte Schritt, bei dem nun abhängig von den Ergebnissen aus 2.) und 3.) erste Sound-Design definiert, abgehört und vermessen werden. Das ist ein iterativer Prozess bei dem immer wieder Parameter des ANC Systems im Fahrzeug geändert werden bis das Klangbild auf dem Rollenprüfstand einem zuvor definierten groben Klangziel entspricht. Ist dieses Ziel am Rollenprüfstand erreicht, so wird es zusätzlich am Prüfgelände für möglichst viele Fahrzustände und Fahrzustandswechsel verifiziert und weiter verfeinert.

Für die Serienanwendung ist es anschließend wichtig das entstandene Sound-Design für den Alltagsgebrauch abzusichern. Dabei wird versucht die Parameter soweit anzupassen, dass bei gleichbleibendem Klangbild die Robustheit möglichst groß wird. Hier geht es darum für möglichst viele Betriebsfälle ein gleiches Klangbild ohne störende Artefakte sicherzustellen. Zusätzlich werden Abschaltbedingungen definiert um z.B. das ANC System abzuschalten wenn Stabilität nicht mehr garantiert werden kann (beispielsweise bei geöffneten Türen oder beim Verdecken von einzelnen Mikrofonen). Außerdem werden in diesem Schritt Lautsprecherpegel vermessen die bei regulärem ANC Betrieb für einzelne Ordnungen maximal auftreten (sogenannte „Soft-Clipping Level“). Diese Pegel werden anschließend dem ANC System als Datensatz zur Verfügung gestellt damit es bei Überschreiten dieser Pegel im regulären Betrieb angemessen reagieren kann.

Insbesondere das Messen von Soft-Clipping Leveln ist heute zeitaufwendig da dafür möglichst viele Betriebszustände eines Fahrzeugs auf einem entsprechenden Prüfgelände angefahren werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Messung für jede nachträgliche Änderung im Sound-Design wiederholt werden muss.

Jedes Tuning schließt damit den fertigen Zustand zu dokumentieren und die entstandenen Parameterdaten so aufzubereiten, dass sie im Serienprozess verfügbar gemacht werden können.

Grundprinzip der Simulation

Als Eingangsdaten für die Simulation dienen die in den ersten drei Prozessschritten des Tunings gemessenen Daten, d.h. Übertragungsfunktionen vom Fahrzeuginnenraum und Schalldruckpegel an den Positionen der Fehlermikrofone des ANC Systems. In der hier entwickelten Prototypimplementierung liegen letztere als Daten im ATFX Standardformat [2] vor. Im Prinzip wird die gleiche Berechnungsvorschrift wie im realen ANC System verwendet um dessen Performance zu simulieren, wobei die Übertragungsstrecken in der Simulation entsprechend modelliert werden müssen. Die Prototypimplementierung rechnet basierend auf diesen Daten und einer zuvor vorgegebenen ANC System Parametrisierung die Signale an den Fehlermikrofonen in die Signale um die bei eingeschaltetem ANC dort zu messen wären und schreibt diese wieder als Zeitrohdaten in Files im ATFX Format. Diese können dann wie reguläre Messdaten im Analyseprogramm, in unserem Fall Müller-BBM PAK, in gewohnter Form weiterverarbeitet und analysiert werden.

Ergebnisse

Hochlaufmessung in der Messkabine

Die Simulation wurde in einem ersten Schritt in der Messkabine der Müller-BBM AST verifiziert. Es handelt sich hierbei um eine Messkabine deren Dimensionen denen eines Realfahrzeugs nachempfunden sind. In der Kabine sind an automobiltypischen Positionen Lautsprecher und Mikrofone angebracht.

In einem ersten Schritt wurden über ein System zur aktiven Geräuscherzeugung drehzahlabhängig einzelne Motorordnungen synthetisiert und über einen Lautsprecher wiedergegeben. Diese Motorordnungen wurden dann über ein parallel arbeitendes System zur aktiven Geräuschkürzung wieder im Pegel reduziert. Beide Systeme wurden mit gleicher Drehzahl gespeist. Die sich ergebenden Ordnungspegel über der Drehzahl wurden dann einmal vermessen und einmal simuliert. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 1.

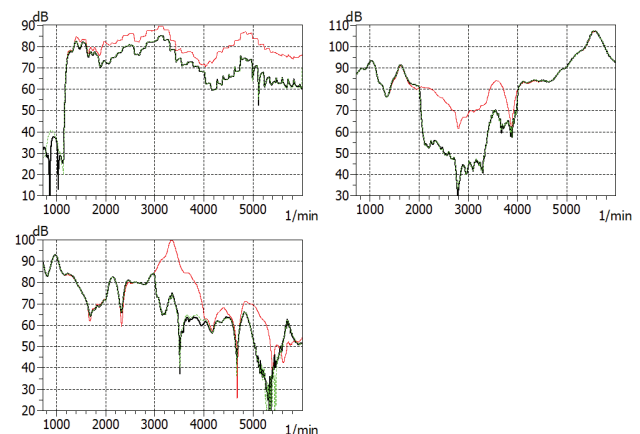


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Ordnungspegel über der Drehzahl in der AST Messkabine ohne ANC (rot), mit ANC gemessen (grün) und mit ANC simuliert (schwarz). Gezeigt sind von oben links im Uhrzeigersinn eine 1. Ordnung, 3. Ordnung und 5. Ordnung

Die roten Kurven in Abbildung 1 zeigen den Ordnungspegel für eine 1., 3. und 5. Motorordnung über der Drehzahl. Diese Pegel ergeben sich an einem der Fehlermikrofone des ausgeschalteten ANC Systems. Die grüne Kurve stellt die Verhältnisse am selben Fehlermikrofon bei eingeschaltetem ANC System dar. Die erzielten Minderungen liegen für alle Ordnungen in einem für solche Systeme typischen Bereiche (z.B. [3, Kapitel 10.15]). Es ist zu beachten, dass für die 3. und 5. Motorordnung ANC nur in den Drehzahlbereichen zwischen 2000-4000 RPM bzw. 3000-6000 RPM aktiviert war.

Die schwarze Kurve zeigt die Ordnungspegel wie sie vom Simulationstool berechnet wurden. Für diesen Laboraufbau stimmt diese qualitativ und quantitativ über weite Teile gut mit der Messung überein.

Soft-Clipping Level im Realfahrzeug

Die erste Evaluation in der Messkabine brachte hervorragende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Sie wurde allerdings unter sehr definierten Bedingungen im Labor wie sie im Realfahrzeug nie anzutreffen sind durchgeführt. Um zu realistischeren Anwendungen im Realfahrzeug zu kommen wurde die Prototypimplementierung der Simulation hinsichtlich der Performance in einem Realfahrzeug bei der Messung von Soft-Clipping Leveln untersucht.

Dazu wurde vorab ein Realtuning im Versuchsfahrzeug der Müller-BBM AST aufgebaut, und nachfolgend wurden mehrere Messfahrten zum Ermitteln von Soft-Clipping Leveln durchgeführt. Diese Messfahrten wurden sechsmal direkt mit eingeschaltetem ANC System gefahren, wobei die wiedergegebenen Ordnungspegel an den Lautsprechern aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurden sechs Messfahrten mit ausgeschaltetem ANC durchgeführt und die Schalldrücke an den Fehlermikrofonen aufgezeichnet. Diese Schalldrücke wurden anschließend zum Simulieren von Soft-Clipping Leveln mit der Prototypimplementierung des Simulationstools verwendet.

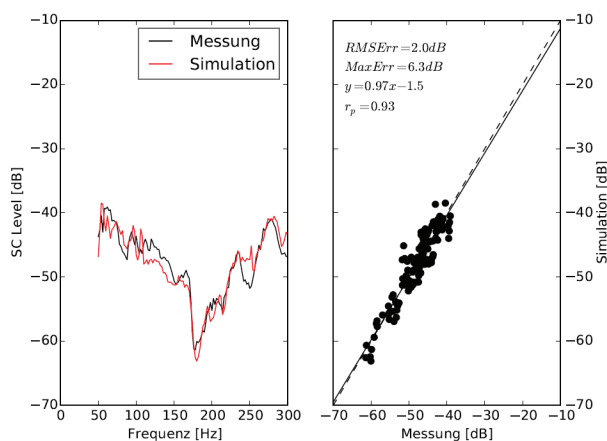


Abbildung 2: Gemessene und simulierte Soft-Clipping Level über der Ordnungsfrequenz (links) und gemessene vs. simulierte Soft Clipping Level (rechts). Zusätzlich sind rechts einige gängige Fehlermaße um Abweichungen zu quantifizieren. Lautsprechereingangspegel sind in dB re. Full Scale angegeben.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für einen Lautsprecher und eine Motorordnung. Diese Ergebnisse sind repräsentativ für die Ergebnisse an anderen Lautsprechern und für andere Motorordnungen.

Es zeigt sich, dass Messung und Simulation im Mittel um maximal 2 dB abweichen. Das liegt unterhalb der Wiederholgenauigkeit für einzelne Messungen, die mit ca. 10 dB beziffert werden kann. Simulation und Messung sind stark korreliert (Pearson Produkt Moment Korrelation, $r_p = 0.93$), ein linearer Fit an die Daten zeigt eine Steigung von 0.97 und ist damit nahe am Idealwert von 1.0.

Diskussion

In dieser Arbeit wurde untersucht inwieweit sich Messungen zur ANC Performance über ein Simulationstool vorhersagen

lassen. Dafür wurde ein Prototyp für ein Simulationstool implementiert. Ziel war es abzuschätzen ob es möglich ist Messzeit, die zur Abstimmung von ANC Systemen im Fahrzeug notwendig ist, an einen Rechnerarbeitsplatz zu verlegen. Erste Ergebnisse zeigen, dass sowohl Genauigkeit als auch Rechengeschwindigkeit der Simulation ausreichend sind dieses Ziel zu erreichen. Defacto war für die untersuchten Fälle am Realfahrzeug die mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung im Bereich der Wiederholgenauigkeit für einzelne Messungen. In einem nächsten Schritt soll das Simulationstool beim Tuning von Realfahrzeugen erprobt werden.

Es bleibt die Frage wie sich dieses Tool sinnvoll einsetzen lässt um tatsächlich einen effizienteren Tuningprozess zu erreichen. Zwei konkrete Anwendungsfälle stehen momentan dafür ins Auge:

- Mit der Simulation kann der rekursive Prozess der ersten Parametrisierung des ANC Algorithmus an den Rechnerarbeitsplatz verlegt werden. Es ist nicht mehr notwendig im Fahrzeug am Rollenprüfstand ein erstes Grobtuning zu erstellen, sondern dieses kann zukünftig am Rechner entstehen. Man gewinnt an Flexibilität da man nicht mehr an Verfügbarkeiten für Fahrzeuge und Infrastruktur gebunden ist. Das anschließende Feintuning am Prüfgelände wird sich aber durch die Simulation nicht ersetzen lassen.
- Insbesondere für baugleiche Fahrzeuge bei denen ANC über mehrere Audio-Levels integriert werden soll ist es nicht mehr notwendig Soft-Clipping Level für jede Audiovariante zu messen. Mit der Simulation ist es nun möglich die Schalldruckpegel für alle Fahrzustände einmal an den Fehlermikrofonen zu messen, und die Soft-Clipping Level für die verschiedenen Audio-Level anschließend zu simulieren. Aber auch bei Ausstattungen mit nur einem Audio-Level kann die Simulation helfen: Werden Soft-Clipping Level per-se über Simulationen ermittelt, so bedingen nachträgliche Änderungen im Sound-Design nicht mehr gezwungenermaßen eine neue zeitaufwändige Messung, sondern es reicht aus die neuen Soft-Clipping Level mit der geänderten Parametrisierung zu rechnen.

Literatur

- [1] Schirmacher, R., Kunkel, R. und Burghardt, M., Active Noise Control for the 4.0 TFSI with Cylinder on Demand Technology in Audi's S-Series. SAE Technical Paper 2012-01-1533, doi: 10.4271/2012-01-1533.
- [2] ASAM: Automotive Test Exchange Format. Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems, 2012.
- [3] Nelson, P.A. und Elliott, S.J.: Active Control of Sound. Academic Press London, 1992.