

# Active Path Tracking - Eine neue Methode zur Identifikation von strukturbedingten Geräuschpfaden eines Fahrzeuges

Martin Pflüger, Alfred Rust

AVL List GmbH, Graz, Austria

## ABSTRACT

Der Geräuschpegel und die Geräuschqualität in Fahrzeugen wird häufig von den Geräuschen des Antriebsstrangs dominiert, wobei die Einleitung meist über strukturbedingte Übertragungspfade erfolgt. Um diese Geräusche effizient bearbeiten zu können, ist daher ein einfach und rasch anwendbares System zur Geräuschpfadanalyse vorteilhaft. Zu diesem Zweck wurde das sogenannte "Active Path Tracking" System entwickelt, dessen methodischer Ansatz auf dem Prinzip der aktiven Geräuschauslöschung ("Active Noise Cancellation") aufbaut. Mit diesem System können strukturbedingte Geräuschpfade bis zu einer Frequenz von etwa 800 Hz analysiert werden, ohne den Antriebsstrang vom Fahrzeug trennen oder gar ausbauen zu müssen. Als potentielle Geräuschpfade können dabei alle Verbindungsstellen zwischen Antriebsstrang und Fahrzeugkarosserie wie beispielsweise Aggregatlager, Auspuffaufhängungspunkte und Radaufhängungsstellen berücksichtigt werden. Schließlich bietet das System auch die Möglichkeit für eine rasche Verifizierung der Analyseergebnisse mit Hilfe der Methode der aktiven Schwingungsauslöschung.

## 1. EINLEITUNG

Das Fahrzeuginnengeräusch wird – bis ungefähr 800 Hz - häufig von jenem Körperschall maßgeblich beeinflusst, der vom Antriebsstrang des Fahrzeugs herrührt. Meist werden dabei sowohl der Geräuschpegel als auch positive oder negative Geräuscheigenschaften wie beispielsweise "sportlich", "kraftvoll", „rau“ oder „lästig“ durch eine günstige oder ungünstige Mischung von Motorordnungen bestimmt [1, 2]. Um im Rahmen der Fahrzeuggeräuschentwicklung rasch einen tieferen Einblick in die spezifischen Mixturen von Motorordnungen zu ermöglichen, wären schnelle und doch verlässliche Methoden zur Identifizierung von ordnungsbezogenen Geräuschkomponenten vorteilhaft. Die derzeit existierenden Methoden für Transferpfadanalysen sind meist zeitaufwändig und erfordern vielfach auch umfangreiche Ausbaurbeiten am Fahrzeug; zudem besteht meist keine Möglichkeit, die Relevanz der erzielten Ergebnisse unmittelbar zu überprüfen.

Deshalb wurde mit „Active Path Tracking“ eine neue Methode [3] mit der folgenden Zielsetzung entwickelt:

- einfach und schnell in der Anwendung
- verlässliche Ergebnisse
- Frequenzbereich bis 800 Hz
- schnelle Verifikation der Ergebnisse mittels aktiver Schwingungsauslöschung

## 2. TECHNISCHER ANSATZ

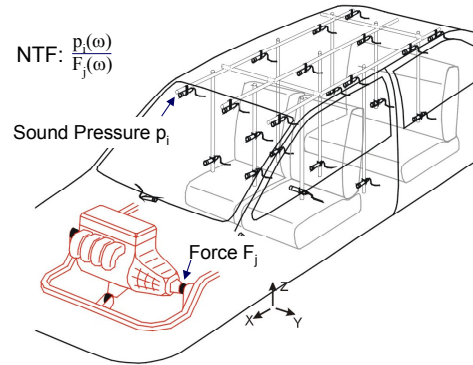
Die Methode für die Geräuschpfadidentifizierung basiert auf einer Adaptierung jener analytischen Algorithmen, die üblicherweise für die aktive Schwingungs- und Geräuschauslöschung in Fahrzeugkabinen und Flugzeugen verwendet werden.

Der technische Ansatz umfasst folgende Schritte:

1. Berechnung von „sekundären“ Kräften (an den Antriebsstrangverbindungsstellen zur Karosserie), die ein „sekundäres“ Schallfeld im Fahrzeuginnenraum erzeugen, welches am besten mit dem „primären“ (d.h. im Fahrbetrieb gemessenen) Schallfeld übereinstimmt.
2. Identifizierung der signifikantesten Kräfte aufgrund der berechneten Geräuschreduzierungs-effekte aller sekundärer Kräfte auf das primäre Schallfeld.
3. Vorhersage der Geräuschreduktion durch rechnerische Eliminierung der signifikantesten Kräfte.
4. Verifizierung der vorhergesagten Geräuschreduktion mittels aktiver Schwingungsauslöschung

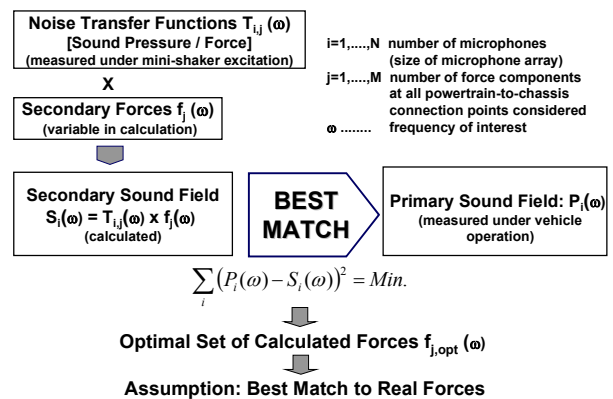
## 2.1. Berechnung

Die Basis für die Berechnung bilden das primäre Schallfeld im Fahrzeuginnenraum (im Fahrbetrieb gemessen mit bis zu 30 Mikrofonen) und die Geräuschübertragungsfunktionen von den Antriebsstrangverbindungsstellen zu den Mikrofonen im Fahrzeug (gemessen unter Shaker-Anregung) – **Bild 1**.



**Bild 1.** Mikrofonfeld für die Messung des primären Schallfeldes und der Geräuschübertragungsfunktionen NTF

Für die Identifizierung der signifikanten Geräuschübertragungspfade (Verbindungsstellen zwischen dem Antriebsstrang und der Karosserie) werden grundsätzlich für alle potenziellen Übertragungsstellen Amplituden und Phasen jener „sekundären“ Kräfte gerechnet, die ein „sekundäres“ Schallfeld im Fahrgastraum liefern, welches die im Sinne der „kleinsten Fehlerquadrate“ beste Approximation an das gemessene „primäre“ Schallfeld ergibt. Diesen Berechnungsansatz, der für jede interessante Motorordnungsfrequenz einzeln durchzuführen ist, zeigt schematisch **Bild 2**.



**Bild 2.** Berechnungsansatz der APT-Methode

Bei „guter“ Approximation kann man annehmen, dass die sekundären Kräfte jenem Satz von Kräften ähnlich ist, der das primäre Schallfeld verursacht. Die sekundären Kräfte sind daher ein Maß für jene Kräfte, die der Antriebsstrang an seinen Verbindungsstellen zur Karosserie bewirkt. Ist die Approximation nicht „gut“, dann muss das primäre Schallfeld von anderen Beiträgen dominiert werden wie beispielsweise von Luftschallbeiträgen oder Körperschallbeiträgen über andere, nicht berücksichtigte Übertragungspfade. Die Güte der Approximation zwischen dem primären und sekundären Schallfeld kann durch die so genannte „Abschwächung“ ausgedrückt werden. Dies ist die räumlich gemittelte Reduzierung des primären Schallfeldes in dB, die

sich durch die Subtraktion des Einflusses der betrachteten sekundären Kräfte auf das primäre Schallfeld ergibt.

## 2.2. Testverfahren

Das gesamte APT-Testverfahren unterteilt sich in die drei Phasen Messung, Berechnung und Verifizierung.

Messung:

- Innengeräusch im Fahrbetrieb zum Identifizieren der kritischen Betriebspunkte und Frequenzen (Motorordnungen)
- primäres Schallfeld bei den kritischen Betriebspunkten
- Geräuschübertragungsfunktionen von den Antriebsstrangverbindungspunkten zu den Mikrofonen im Fahrzeuginnenraum (unter Shaker-Anregung)

Berechnung:

- optimale Sätze von sekundären Kräften mittels bester Approximation an das primäre Schallfeld
- Einfluss der sekundären Kräfte auf das primäre Schallfeld zwecks Identifizierung der signifikanten Geräuschübertragungspfade
- Vorhersage der Reduktion („Abschwächung“) des Schallfeldes im Fahrzeuginnenraum

Verifizierung:

- Aktive Schwingungsauslöschung an den Orten der signifikantesten Kräfte zur Bestätigung der vorhergesagten Abschwächung

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse, die während der Entwicklung der APT-Methodik erzielt wurden, beschrieben. Als Versuchsfahrzeug für diese Entwicklungsarbeiten wurde ein PKW der Kompaktklasse mit einem 4-Zylinder DI Dieselmotor gewählt, der als auffallendes Geräusch einen „Boom“ bei 128 Hz (= zweite Ordnung) bei 3840 UpM aufwies.

## 3. PRAKTISCHE ANWENDUNG UND ERGEBNISSE

### 3.1. Messphase

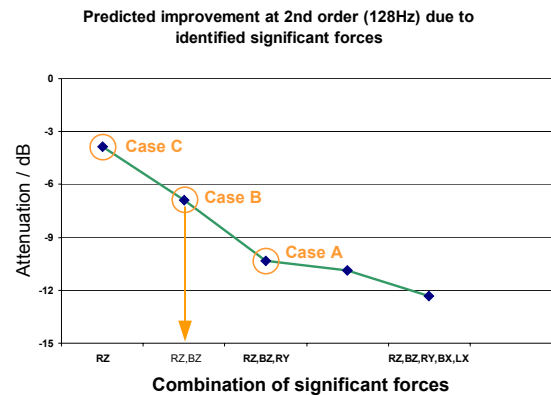
Bei der APT-Methode kommen für die Übertragungsfunktionsmessungen spezielle Hochleistungsminiatur-Shaker (Durchmesser nur 6 cm) zum Einsatz. Damit sind üblicherweise alle Antriebsstrangverbindungspunkte (in allen drei Raumrichtungen) erreichbar, ohne umfangreiches Ausbauen von Fahrzeugteilen (Motor etc.) vornehmen zu müssen, so dass der Einfluss des Motor-Getriebe-Gewichtes auf das Schwingungsverhalten der Karosserie erhalten bleibt. Das Nicht-Ausbauen des Aggregats hat zusätzlich den Vorteil, dass der Arbeits- und Zeitaufwand für diese Versuche relativ klein ist. Wenn die Installation aller Mikrofone im Fahrzeug vorbereitet ist, können die APT Messungen typischerweise in 2 bis 3 Tagen fertiggestellt werden.

### 3.2. Berechnungsphase

Die Verarbeitung der Messdaten wird für jede kritische Frequenz (Motorordnung) separat durchgeführt. Sie beginnt mit der Approximation des sekundären Schallfeldes an das primäre Schallfeld, woraus sich der optimale Satz von Kräften ergibt (vgl. Bild 2). Dieser Berechnungsschritt stellt den Kern der APT-Methode dar und beinhaltet eine neuartige Adaptierung von Algorithmen der aktiven Geräuschauslöschung für das Anpassen (Approximieren) von Schallfeldern. Bei diesem Approximationsprozess wird die Anzahl der Kräfte variiert, wobei pro Anzahl von Kräften alle möglichen Kombinationen gerechnet werden. Ist beispielsweise die Maximalanzahl  $M$  der Kräfte gleich 12, ergeben sich  $2^{12} - 1 = 4095$  Kombinationen, d.h. es ergeben sich 4095 best-approximierte sekundäre Schallfelder.

Ausgehend von dem best-approximierten sekundären Schallfeld pro Kräftekombination werden in den nächsten Berechnungsschritten die signifikantesten Kräfte identifiziert. Die Signifikanz jeder einzelnen Kräftekombination wird anhand ihres Abschwächungseffektes auf das primäre Schallfeld ermittelt, wodurch die kritischen Kraftvektoren identifiziert werden können. In weiterer Folge kann das

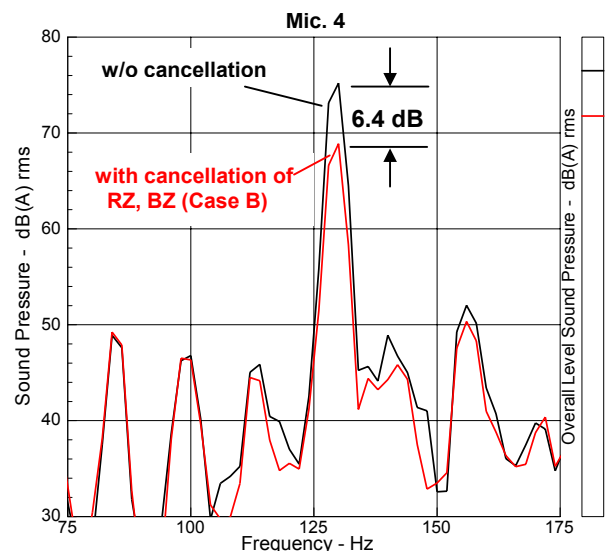
Geräuschreduktionspotenzial, das diese kritischen Kräfte (d.h. kritische Verbindungsstellen zwischen Antriebsstrang und Karosserie) aufweisen, vorausberechnet werden. Im Falle des Boom-Geräusches am Versuchsfahrzeug erwiesen sich das rechte Motorlager (vertikal/RZ und quer/RX) sowie das hintere Motorlager (vertikal/BZ) als die maßgebenden Übertragungspfade. **Bild 3** zeigt das Verbesserungspotenzial für einige Kombinationen dieser kritischen Kräfte.



**Bild 3.** Vorausberechnung der Innengeräuschabschwächung für verschiedene Kombinationen von Kräften

### 3.3. Aktive Schwingungsauslöschung zur schnellen Verifikation der identifizierten Kräfte

Mit dem APT-System können derzeit bis zu vier Miniatur-Schwingererregter zur Schwingungsauslöschung an den als am signifikantesten identifizierten Antriebsstrangverbindungspunkten betrieben werden. Damit lassen sich die vorhergesagten Pegelabschwächungen des Innengeräusches verifizieren. **Bild 4** zeigt die Abschwächung von 6,4 dB, die sich durch Schwingungsauslöschung an den Stellen RZ und BZ ergab. Dies stimmt gut mit dem vorausgerechneten Wert für den Fall B in Bild 3 überein.



**Bild 4.** Verifikation der vorausgerechneten Geräuschabschwächung durch aktive Schwingungsauslöschung (vgl. Fall B von Bild 3; zweite Ordnung, 3840 UpM)

## 5. LITERATUR

- [1] Brandl, F. K. und Biermayer, W., „A New Tool for the Onboard Objective Assessment of Vehicle Interior Noise Quality“. SAE 1999-01-1695.
- [2] Brandl, F., Thomann, S., Biermayer, W., Ishii, Y. und Yamashita, T.: „Objective Description of the Optimum Interior Sound Character of Sports Cars“. JSAE 20005320, Yokohama, 24-26 May 2000.
- [3] AVL, Europäisches Patent EP 0 825 358