

# Anwendung des binauralen Schallsenders zur reziproken Transferpfadanalyse im Fahrzeug

Martin Klemenz\*, Philipp Sellerbeck\*, Tobias Kellert\*, Roland Sottek\*\*

\* Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, \*\* HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath

## 1. Einleitung

In [1] wurde ein binauraler Schallsender vorgestellt, der im Rahmen der BTPA/BTPS für die reziproke Messung von Übertragungsfunktionen im Fahrzeug eingesetzt werden soll. Nach der Vorstellung technischer Details in [1] werden in diesem Beitrag Anwendungsbeispiele aufgezeigt.

Das Ziel der BTPA/BTPS liegt bekanntlich darin, das Schall-drucksignal am Fahrerohr als Summe über alle Einzelpfade darzu-stellen [2], siehe Bild 1. Hierzu ist es notwendig, die Signalkette jeweils in primäre Quellsignale und Übertragungsfunktionen aufzu-teilen, d.h. Schnittstellen festzulegen.

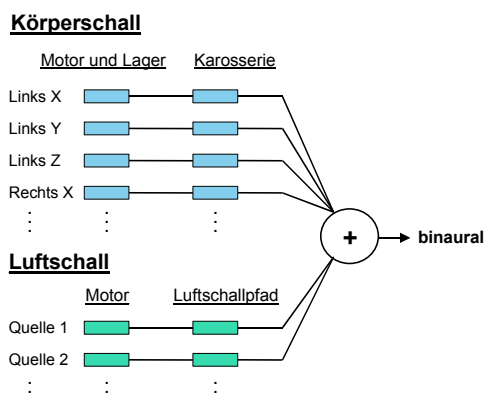


Bild 1: Schematische Darstellung der BTPA/BTPS

Es ist zu erkennen, dass sich die Pfade grob in zwei Kategorien einteilen lassen, nämlich den "Körperschallpfad" (Übertragung von Körperschall über diskrete Schnittstellen in die Karosserie, z.B. über Motorlager und anschließende Abstrahlung in den Innenraum) und den "Luftschallpfad" (Abstrahlung von schwingenden Elementen des Powertrains und die Übertragung von Luftschall bis hin zum Fahrerohr). Im Folgenden werden für beide Pfade bisherige und zukünftige Lösungswege vorgestellt. Es sei erwähnt, dass die bisherigen Techniken trotz ihrer Vereinfachungen durchaus plausible Ergebnisse liefern [2].

## 2. Körperschallpfad

### 2.1 Bisherige Vorgehensweise

Beim Körperschallpfad liegt die Schnittstelle in der Regel an den Motorlagern, siehe Bild 2. Der betreffende Frequenzbereich erstreckt sich bis etwa 2 kHz.

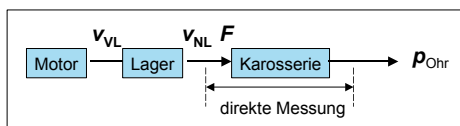


Bild 2: Bisherige Vorgehensweise beim Körperschallpfad

Die im Hochlauf gemessene Schnelle vor Lager ( $v_{VL}$ ) wird mit der Übertragungsfunktion zwischen Krafteinleitung und Schalldruck am Ohr ( $p_{Ohr}/F$ ) verknüpft. Hierzu wird zusätzlich die Lagerübertragungsfunktion ( $v_{NL}/v_{VL}$ ) und die Eingangsimpedanz  $Z_e (= F/v_{NL})$  benötigt, um  $p_{Ohr}$  wie folgt darzustellen:

$$p_{Ohr} = v_{VL} \cdot (v_{NL}/v_{VL}) \cdot Z_e \cdot (p_{Ohr}/F) \quad (1)$$

Zur Messung der Übertragungsfunktion ( $p_{Ohr}/F$ ) wird in der Regel an den Lagerpositionen mit einem Impulshammer angeregt und mit einem Kunstkopf im Innenraum gemessen. Die Erfassung von triaxialen Beschleunigungen an denselben Punkten erlaubt zusätzlich die Ermittlung der Eingangsimpedanzen.

### 2.2 Neue Ansätze

Zur exakteren Einbeziehung von Rückwirkungen sollen Vierpolansätze entwickelt werden. Ebenso empfiehlt es sich, die Übertragungsfunktion ( $p_{Ohr}/F$ ) reziprok zu messen, wobei die Vorteile im Folgenden aufgezeigt werden.

Wie schon in [1] erläutert, können die Funktionen ( $p_{Ohr}/F$ ) und ( $v/Q_{Ohr}$ ) als identisch angesehen werden. Im zweiten Fall wird der anregende Volumenfluss  $Q_{Ohr}$  mit Hilfe des binauralen Schallsenders [1] erzeugt. An den Lagerpositionen muss dann nur noch die Schnelle gemessen werden. Da der vorhandene Raum an den Motorlagern oft nicht ausreicht, um den Impulshammer präzise anwenden zu können, bietet die reziproke Messung vor allem Vorteile bezüglich der Genauigkeit. Ebenso wird der Messaufwand zur Bestimmung von ( $v/Q_{Ohr}$ ) reduziert, da alle Übertragungswege gleichzeitig angeregt werden können.

Der binaurale Sender liefert im Frequenzbereich ab ca. 200 Hz Volumenflüsse, die nach dem Lager (karosserieseitig) zwischen 10 und 30 dB über dem Ruhegeräusch liegen. Für tiefer liegende Frequenzen, bei denen binaurale Effekte noch nicht auftreten, wird ein Subwoofer zur Anregung eingesetzt [1]. Da die Pegel vor dem Lager (motorseitig) sehr gering ausfallen, muss die Schnittstelle weiterhin nach dem Lager angesetzt werden. Das Lager selbst bildet dann ein separates Vierpolelement.

In Bild 3 werden die direkt ( $p_{Ohr}/F$ ) und reziprok ( $v/Q_{Ohr}$ ) gemessenen Übertragungsfunktionen von einem Motorlager zum Ohr im Sinne eines Reziprozitätstests verglichen. Die Übereinstimmung der Kurven ist Erfolg versprechend; zur Diskussion der verschiedenen Kalibrierverfahren sei auf [1] verwiesen.

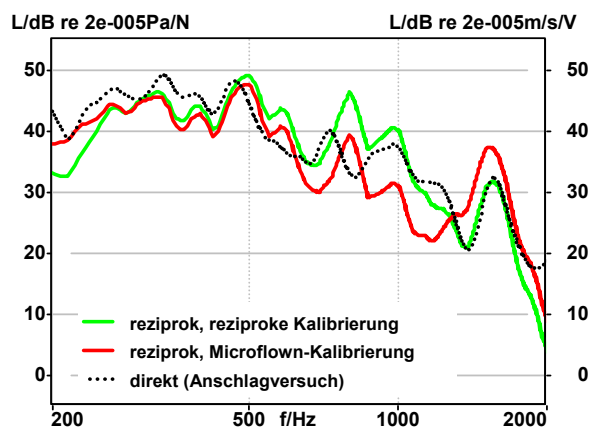
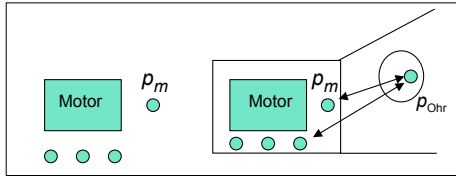


Bild 3: Direkt (gestrichelt) und reziprok (durchgezogen) gemessene Übertragungsfunktionen vom Lager zum Fahrerohr

### 3. Luftschallpfad

#### 3.1 Bisherige Vorgehensweise

Beim Luftschallpfad ist die Schnittstelle zwischen Quellsignal und Übertragungsfunktion nicht so eindeutig definiert wie im vorigen Abschnitt. Bei der bisher angewandten Technik besteht sie aus etwa  $M = 5$  bis 10 Mikrofonpositionen rund um den Motor, siehe Bild 4.



**Bild 4: Schema der bisherigen Vorgehensweise - Luftschallpfad**

Im Prüfstand werden an diesen Positionen Schalldrucksignale  $p_{m, \text{Freifeld}}$  bestimmt und diese dann mit Übertragungsfunktionen  $p_{\text{Ohr}}/p_{m, \text{eingebaut}}$  verknüpft:

$$p_{\text{Ohr}} = \sum_m (p_{m, \text{Freifeld}}) \cdot (p_{\text{Ohr}}/p_{m, \text{eingebaut}}) \cdot c(f) \quad (2)$$

Durch eine Korrekturfunktion  $c(f)$  wird der Einfluss des Motorraums gegenüber dem Freifeld berücksichtigt. In (2) ist zu erkennen, dass der Schalldruck aus einer Summe über mehrere angenäherte Ohrsignale resultiert, also physikalisch nicht exakt formuliert ist. Eine weitere Näherung besteht darin, dass zur Messung der Übertragungsfunktion jeweils mit einem Lautsprecher in der Nähe des Mikrofons angeregt wird, so dass das Ergebnis nicht unabhängig von dieser Lautsprecherposition ist. Angesichts dieser Näherungen sind weitergehende Lösungen zu diskutieren.

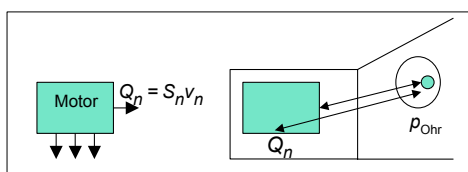
#### 3.2 Neue Ansätze

Eine grundsätzlich exakte Formulierung besteht darin, den Schalldruck am Fahrerohr auf die tatsächlichen Luftschallquellen zu beziehen, d.h. ihn als Summe über die einzelnen abgestrahlten Volumenflüsse aller  $N$  schwingenden Oberflächen darzustellen [3]:

$$p_{\text{Ohr}} = \sum_n (Q_n) \cdot (p_{\text{Ohr}}/Q_n) \quad (3)$$

So besteht die erste Aufgabe darin, im Prüfstand bei laufendem Motor die Oberflächenschnellen  $v_n$  zu messen und mit den Teilflächen  $S_n$  die Volumenschnellen  $Q_n = S_n v_n$  abzuleiten. Bezüglich der optimalen Messtechnik bzw. der örtlichen Diskretisierung sind noch nicht alle Fragen geklärt; eine Lösung dieser Aufgabe kann aber in Zukunft erwartet werden.

Ein erster, sinnvoller Schritt zur Synthese des Luftschallpfades besteht darin, gemäß (3) die schwingenden Oberflächen ihrerseits als Schnittstelle anzusetzen, d.h. die Übertragungsfunktionen zwischen diesen Oberflächen und dem Schalldruck am Fahrerohr zu bestimmen, siehe Bild 5.



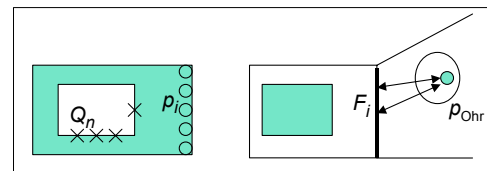
**Bild 5: Schema der Schnittstelle auf der Motoroberfläche**

Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass dies nur reziprok erfolgen kann, so dass der Einsatz des binauralen Senders nicht nur **sinnvoll**, sondern sogar **unumgänglich** ist. Es ist nämlich auf

direktem Wege ( $p_{\text{Ohr}}/Q_n$ ) nicht möglich, Teilflächen zu separaten Schwingungen anzuregen. Bei der reziproken Messung ( $p_n/Q_{\text{Ohr}}$ ) wird also wiederum mit  $Q_{\text{Ohr}}$  angeregt und unmittelbar an der  $n$ -ten Teilfläche der Schalldruck  $p_n$  gemessen [3].

Ein Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Übertragungsfunktion in (3) nicht unabhängig von konstruktiven Veränderungen am Motor ist. Dies ist aber der Fall, wenn im Zuge der BTPS solche Änderungen, die am Prüfstand gemessen werden, zum Fahrerohr hin auralisiert werden sollen. Hierbei kann es passieren, dass diese Modifikationen das Schallfeld im Motorraum verändern und folglich auch die Übertragungsfunktion.

Daher wird auch über eine weitere mögliche Schnittstelle nachgedacht, und zwar die Schalldruckverteilung  $p_i$  an  $i$  Teilflächen auf der Schottwand. Diese könnte durch Simulation (FEM) berechnet werden, wobei die Volumenflüsse  $Q_n$  als Quellterme dienen, siehe Bild 6. Eine Änderung des Schallfeldes im Motorraum bedarf dann keiner neuen Messung, sondern nur einer neuen Simulation. Anhand der Teilflächen  $S_i$  wird die Kräfteinleitung  $F_i = p_i/S_i$  ermittelt, um diese dann mit der bereits in Abschnitt 2.2 beschriebenen Übertragungsfunktion ( $p_{\text{Ohr}}/F = v/Q_{\text{Ohr}}$ ) zu verknüpfen.



**Bild 6: Schema der Schnittstelle auf der Schottwand**

Auch wenn die Simulation grundsätzlich funktioniert [4], sind bei dieser Schnittstelle noch viele Fragen zu klären. So ist es nicht trivial, die Reflexionsfaktoren der Teilflächen zu ermitteln und "Flankenübertragungen" oder nach unten hin offene Motorräume einzubeziehen. Der für FE-Rechnungen sinnvolle Frequenzbereich erstreckt sich bis ca. 2 kHz [4]; für höhere Frequenzen empfiehlt sich der Einsatz statistischer Methoden (SEA).

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl für den Körper- als auch den Luftschallpfad wurden bisherige und künftige Ansätze vorgestellt, um Quellsignale und Übertragungsfunktionen für die BTPA/BTPS bestimmen zu können. Es zeigt sich, dass der Einsatz des binauralen Senders teils sinnvoll, teils sogar unumgänglich ist. Auch wenn die bisherigen Techniken schon plausible Ergebnisse liefern, kann angesichts der vorgestellten Innovationen künftig eine höhere Präzision erwartet werden. Letztlich ist ein akzeptabler Kompromiss zwischen Mess- bzw. Rechenaufwand und Genauigkeit zu erzielen.

### 5. Literatur

- [1] P. Sellerbeck, M. Klemenz, R. Sottek, Ein binauraler Schallsender zur reziproken Transferpfadanalyse. Fortschritte der Akustik - DAGA '03, Aachen, 2003
- [2] K. Genuit und J. Poggenburg, The design of vehicle interior noise using binaural transfer path analysis. SAE Noise and Vibration Conference, SAE 1999-01-1808
- [3] F.J. Fahy, The vibro-acoustic reciprocity principle and applications to noise control. Acustica 81 (1995), 544
- [4] T. Kellert, O. Strauch, J. Domine, R. Sottek, Das Schallfeld in einem Kfz-Motorraum – Vergleich zwischen Messung und Simulation an einem vereinfachten 1:2-Modell. Fortschritte der Akustik - DAGA '03, Aachen, 2003