

# Ein binauraler Schallsender zur reziproken Transferpfadanalyse

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

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

## 1. Einleitung

Um die Qualität von Fahrzeug-Innengeräuschen schon in der Entwicklungsphase gezielt optimieren zu können, wurden in den letzten Jahren die Methoden "BTPA" bzw. "BTPS" entwickelt (Binaurale Transferpfadanalyse bzw. -synthese) [1]. Da hierbei der Beitrag jedes einzelnen Geräuschpfades separat auralisiert werden soll, müssen alle zugehörigen Übertragungsfunktionen gemessen werden. Dabei wird zwischen Luftschall- und Körperschallpfaden unterschieden (Bild 1).

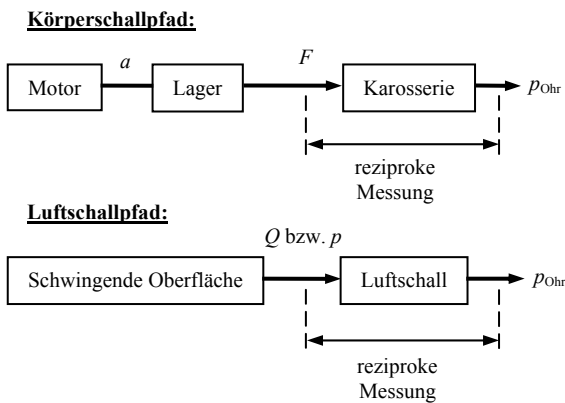


Bild 1: Übertragungspfade der BTPA

Eine Reihe von Vorteilen spricht dafür, die Übertragung von Körper- bzw. Luftschall bis hin zum Fahrerohr reziprok zu messen (geringer Platzbedarf für Sensoren, höhere Genauigkeit durch bessere Messpositionen, Zeitersparnis durch gleichzeitige Anregung sämtlicher Pfade) [2]. Hierfür wurde von der Firma HEAD acoustics in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen ein binauraler Schallsender entwickelt, dessen technische Merkmale in diesem Beitrag vorgestellt werden. Dies betrifft seine Richtwirkung, die Abhängigkeit von der akustischen Belastung und die Gültigkeit des Reziprozitätsprinzips für die Kombination aus binauralem Sender und binauralem Empfänger. Da für reziproke Messungen eine bekannte Volumenflussquelle benötigt wird, werden mehrere Kalibrierverfahren vorgestellt und verglichen.

## 2. Der binaurale Schallsender

### 2.1 Aufbau

Das Gehäuse des binauralen Schallsenders entspricht dem des Kunstkopf-Meßsystems HMS III (Bild 2). In seinem Innern arbeitet für jedes Ohr ein spezieller Lautsprecher auf eine Druckkammer, von der ein kleines Horn als „Gehörgang“ in die Ohrmuschel mündet. Mit dieser Anordnung ist es möglich, im Frequenzbereich von ca. 200 Hz bis 8 kHz effektiv Schall abzustrahlen. Ein zusätzlicher Subwoofer erzeugt tieffrequenten Schall im Bereich von 20 Hz bis 200 Hz.

### 2.2 Richtcharakteristik

Um die vom Reziprozitätsgesetz geforderte Übereinstimmung der Richtcharakteristik von Sender und Empfänger zu erzielen, sind

Gehäuse und Ohrmuscheln der Kunstköpfe äußerlich gleich gestaltet. Da der Ohrkanal des Senders jedoch eine Trichterform aufweist, wurde dennoch eine Überprüfung vorgenommen. Bild 3 zeigt Beispiele der Außenohr-Übertragungsfunktionen (HRTFs) von Sender und Empfänger im Vergleich. Man erkennt eine gute Übereinstimmung bis ca. 6 kHz.



Bild 2: Binauraler Schallsender

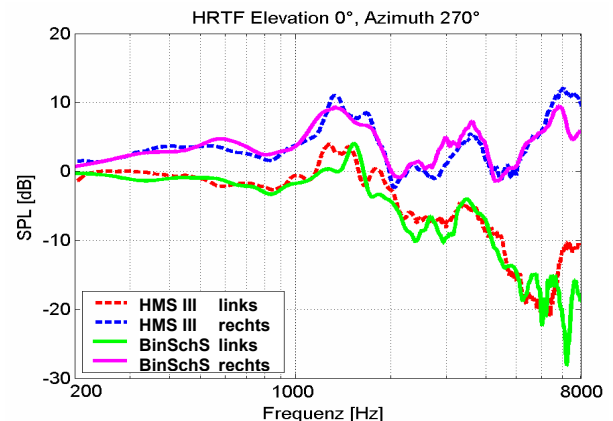


Bild 3: HRTFs vom binauralem Schallsender und HMS III, für senkrechten Schalleinfall auf das rechte Ohr

### 2.3 Rückwirkung des Schallfeldes

Der Schallsender wurde so konstruiert, dass eine Rückwirkung des äußeren Schallfeldes auf die Quelle (z.B. durch Moden im Fahrzeuginnenraum bei tiefen Frequenzen) vermieden wird. Durch Messung der elektrischen Eingangsimpedanz sowie durch Lasermessung der Membranschnelle, jeweils sowohl im Fahrzeug als auch im Freifeld, zeigte sich, dass kein Einfluss des umgebenden Raumes feststellbar ist.

### 2.4 Kalibrierung

Um eine kalibrierte Schallflussquelle zu erhalten, muss die erzeugte Volumenschnelle  $Q$  hinreichend genau bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Verfahren vergleichend angewandt. Die Volumenquelle wird dabei jeweils an der Position des Ohrkanals angenommen, an der sich beim HMS III die Mikrofonmembran befindet (Bezugsebene).

Die Schallleistung der binauralen Quelle kann sowohl mit dem *Hallraumverfahren* als auch durch Messung der *Schalldruckverteilung auf einer Hüllfläche* bestimmt werden. Daraufhin wird die für eine Punktquelle geltende Beziehung zwischen Leistung  $P$  und Volumenfluss  $Q$  ausgenutzt ( $\rho_0$ : Luftdichte,  $\omega$ : Kreisfrequenz,  $c$ : Schallgeschwindigkeit):

$$P = \frac{\rho_0 \omega^2 \hat{Q}^2}{8\pi c} \quad (1)$$

Hierbei wird also die Quellencharakteristik vereinfacht, außerdem erhält man keine Phaseninformation.

Bei der *Reziprozitätskalibrierung* kommt eine Hilfsschallquelle mit bekanntem Volumenfluss  $Q_H$  zur Anwendung. Durch aufeinander folgende Schalldruckmessungen an der Hilfsquelle ( $p_H$ ) und im Ohrkanal ( $p_{Ohr}$ ) findet man die gesuchte Volumenschnelle  $Q_{Ohr}$  aufgrund der Reziprozität im Schallfeld [2]:

$$Q_{Ohr} = p_H \frac{Q_H}{p_{Ohr}} \quad (2)$$

Bei diesem Verfahren werden keine prinzipiellen Vereinfachungen vorgenommen; schwierig gestaltet sich die unverfälschte Schalldruckmessung im Ohrkanal.

Mit Hilfe einer *Miniatur-Strömungssonde* (Microflow) [3] lässt sich die Schallschnelle  $v$  direkt in der Bezugsebene im Ohrkanal messen (Bild 4). Die Integration über die Querschnittsfläche  $S$  liefert den Volumenfluss:

$$Q = \int v dS \quad (3)$$

Man verzichtet hierbei völlig auf Schalldruckmessungen, dem steht ein erhöhter Kalibrierungsaufwand für den Sensor gegenüber.



Bild 4: Microflow-Sensor im Ohrkanal

Als Referenz für Frequenzen bis ca. 600 Hz wurde der Volumenfluss durch Lasermessung der Membranschnelle bestimmt, dabei gilt mit der Membranfläche ebenfalls Gleichung (3). Wegen Partialschwingungen der Membran ist diese Messung durch den Ohrkanal bei höheren Frequenzen ungültig.

Die Ergebnisse der verschiedenen Verfahren zeigen insbesondere bei Frequenzen unterhalb von 1 kHz eine gute Übereinstimmung (Bild 5). Bei höheren Frequenzen fällt besonders die Abweichung der auf der Schalleistung basierenden Verfahren auf. Als Grund

hierfür wird die Ungültigkeit der Punktquellen-Näherung in Verbindung mit der Richtwirkung des Kopfes angenommen.

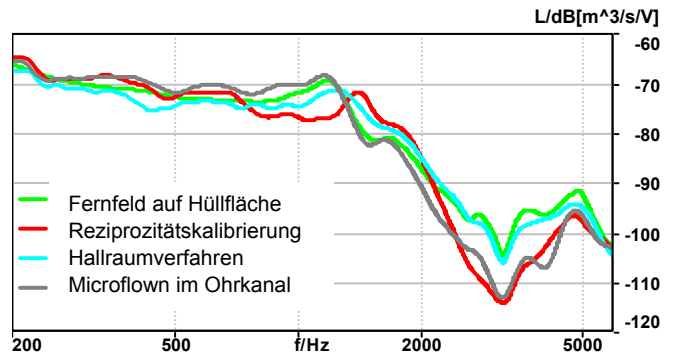


Bild 5: Schallfluss des binauralen Senders (rechtes Ohr), bestimmt mit mehreren Verfahren

### 3. Testmessungen

In einem Laborexperiment wurden zunächst binaurale vibroakustische Übertragungsfunktionen einer Teststruktur sowohl direkt mit Impulshammer ( $p/F$ ) als auch reziprok ( $v/Q$ ) gemessen. Bild 6 zeigt den Vergleich dieser Funktionen unter Verwendung der zuvor beschriebenen Kalibrierungen. Die leistungs-basierten Kurven liefern hier die beste Übereinstimmung mit der direkten Messung. Weiterhin wurden auch Messungen im Fahrzeug durchgeführt [4].

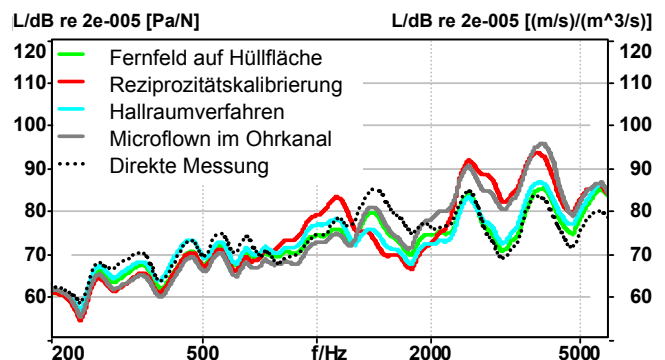


Bild 6: Direkt (gestrichelt) und reziprok (durchgezogen) gemessene vibroakustische Übertragungsfunktionen, dargestellt für das rechte Kunstkopfhör

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Reziprozitätsprinzip ermöglicht die inverse Messung akustischer Übertragungsfunktionen im Rahmen der BTPA/BTPS. Zu diesem Zweck wurde ein binauraler Schallsender vorgestellt und messtechnische Untersuchungen, insbesondere zur Schallflusskalibrierung, beschrieben. Testmessungen bestätigen die Anwendbarkeit dieser Quelle, wenn auch noch Unsicherheit bezüglich der Kalibrierverfahren besteht. Erste Anwendungen im Fahrzeug sind sehr Erfolg versprechend [4].

### 5. Literatur

- [1] K. Genuit, J. Poggenburg: The design of vehicle interior noise using binaural transfer path analysis. SAE 1999-01-1808
- [2] F. J. Fahy: The vibro-acoustic reciprocity principle and applications to noise control. Acustica 81 (1995), 544
- [3] H.-E. de Bree: An overview of Microflow technologies. Acustica – acta acustica 88 Nr. 3 (2002)
- [4] M. Klemenz, P. Sellerbeck, T. Kellert, R. Sottek: Anwendung des binauralen Schallsenders zur reziproken Transferpfadanalyse im Fahrzeug, Fortschritte der Akustik - DAGA '03, Aachen, 2003