

Messung von Isophonen mit Bezug auf den Schalldruck am Trommelfell

Sebastian Schmidt, Herbert Hudde

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, Deutschland,

Email: sebastian.schmidt@rub.de, herbert.hudde@rub.de

Einleitung

Der Gehörgang kann als einseitig schallhart abgeschlossene akustische Leitung angenähert werden. Schalldrucksignale in seinem Innern und an der Pinna sind durch Resonanzspitzen und -täler geprägt. Als Bezugsgröße für audiologische und psychoakustische Messungen bietet sich der im innersten Trommelfellwinkel auftretende Schalldruck an, der einerseits einen bestmöglich glatten Frequenzgang aufweist und andererseits zu verschiedenen Zeiten gut reproduziert werden kann, was bei Sondenmessungen im Gehörgang nicht immer der Fall ist. Um audiometrische Messungen auf den Trommelfellschalldruck p_T beziehen zu können, muss dieser möglichst präzise geschätzt werden, denn eine direkte Messung ist nicht praktikabel. Dazu ist es notwendig, eine Mikrofonsonde hinreichend nah an das Trommelfell heran zu führen, da ein im Abstand gemessenes Signal erheblich von der gesuchten Größe abweichen kann (vgl. Schmidt, Hudde, DAGA 2006) und die Resttransformation zu berechnen. Ein „klassischer“ Ansatz besteht in der Berechnung der Gehörgangsgeometrie mittels einer Impedanzmessung, wofür gleichzeitig der Schallfluss an der Sondenposition bestimmt werden müsste. Wie gezeigt wurde, enthält das Schalldrucksignal jedoch bereits ausreichende Informationen über die Sondenposition (vgl. Schmidt, Hudde, DAGA 2007), so dass die Restübertragungsfunktion geschätzt werden kann.

Schätzverfahren

Das Schätzverfahren basiert auf der Auswertung der durch die Leitungswirkung des Gehörgangs verursachten Minima des SONDENSCHALLDRUCKS. Um diese sicher zu identifizieren, wird, während der Sondenschlauch unter Kopfhörerbeschallung in den Gehörgang eingeschoben wird, das Drucksignal im Frequenzbereich ständig kontrolliert. In der Praxis wird hierzu ein Suchalgorithmus verwendet, der die Betragsmi-nima einer gleitenden Kurzzeit-FFT überwacht und die Werte mit der stärksten zeitlichen Frequenzänderung verfolgt. Ist eine günstige Sondenposition erreicht (so dass z.B. die Minima in sonst besonders glatten Bereichen der Kurve liegen), wird eine gemittelte Schalldruckmessung erstellt. Damit ist die Übertragungsfunktion zwischen Anregungsspannung des Messkopfhörers und Schalldruck an der Sondenspitze bekannt. Hieraus werden die Minimalfrequenzen möglichst exakt bestimmt. Um die Transformation des an der Sonde gemessenen Drucks zum Trommelfell durchführen zu können, muss nun die Übertragungsfunktion des Restgehörgangs geschätzt werden. Diese wird durch ein Leitungsstück angenähert. Die Modelleitung ist dabei in Länge, Flächenverhältnis zwischen Eingang und Abschluss sowie resistiver Abschlussimpedanz einstellbar. Für die Übertragungsfunktion einer schallhart abgeschlossenen konischen Leitung mit dem Ein-/Ausgangsflächenverhältnis r_2/r_1 und der Länge L gilt mit $\beta=2\pi f/c$ folgender Zusammenhang:

$$H(\beta L) = \frac{1}{\frac{r_2}{r_1} \cos(\beta L) - \left(\frac{r_2}{r_1} - 1\right) \frac{\sin(\beta L)}{\beta L}}$$

Die Ersatzstruktur kann über die beiden Parameter r_2/r_1 und L numerisch an die Minima bei den beiden niedrigsten Frequenzen angepasst werden, so dass die Maxima der Modelleitung die Minima des Schalldrucks kompensieren (Modelleitung konisch, Modell 2. Ordnung). Erfahrungsgemäß liegen diese bei Distanzen von 1-2 cm zum Trommelfell innerhalb der hier verwendeten Messbandbreite von 22 kHz. Wird eine Messposition näher am Trommelfell benutzt und somit nur ein Minimum im Messbereich gefunden, kann statt der Anpassung von zwei Minima auch nur dieses eingesetzt werden (Modelleitung zylindrisch, Modell 1. Ordnung). Mit $r_1 = r_2$ vereinfacht sich die angegebene Gleichung durch die Reduktion auf den Parameter L zu $H(\beta L)=1/\cos(\beta L)$. Die Dämpfung des Abschlusses wird in beiden Fällen so eingestellt, dass sich ein möglichst glatter Frequenzgang ergibt.

Es wird impliziert, dass die Übertragungseigenschaften des Gehörgangs von der Sonde zum Trommelfell für Frequenzen unterhalb des zweiten Schalldruckminimums im Wesentlichen durch die Lage und die Dämpfung beider Minima bestimmt werden. Um diese Annahme zu überprüfen, wurde das Verfahren an Finite-Elemente-Modellen des Gehörgangs, an einem Kunstohr und durch Isophonenmessungen mit unterschiedlichen Sondenpositionen überprüft.

Finite-Elemente-Simulationen

Ein bestehendes Finite-Elemente-Außenohrmodell mit natürlich schwingendem Trommelfell wurde benutzt, um das Schätzverfahren zu testen. Im gewählten Frequenzbereich (160 Hz – 16 kHz) wurde das durch eine Membran vor der Pinna erregte Schallfeld simuliert. Dabei existieren drei unterschiedliche Anregungsrichtungen, um die Quellenabhängigkeit der Methode zu testen. Das Verfahren wurde auf die Resultate angewandt und der Fehler $p_{T,geschätzt}/p_{T,FE}$ bestimmt.

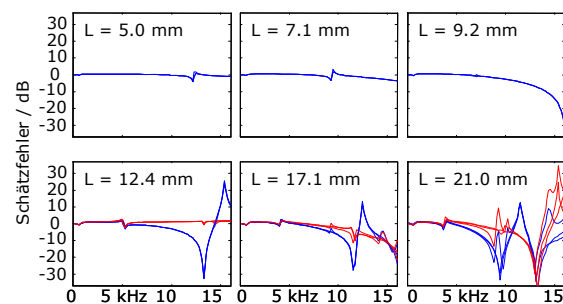


Abbildung 1: Unterschied zwischen geschätztem und berechnetem Schalldruck aus der FE-Simulation, blau: Modell 1. Ordnung, rot: Modell 2. Ordnung

Die drei Anregungsarten werden grafisch nicht unterschieden. Die in den Koordinatensystemen angegebenen Längen geben die Größe L aus den Modellen an. Es zeigte sich, dass

diese erwartungsgemäß nicht dem geometrischen Abstand zum Trommelfell entspricht (vgl. Schmidt, Hudde, DAGA 2007).

Bei kurzen Transformationslängen ($L=5.0$ mm, $L=7.1$ mm) beträgt der Fehler der nur auf dem ersten Minimum basierende Schätzung etwa 3 dB. Bei $L=9.2$ mm werden bei hohen Frequenzen Abweichungen deutlich, da das zweite Druckminimum durch das Modell nicht korrekt approximiert wird. Ab $L=12.4$ mm kann auch die zweite Nullstelle in die Schätzung mit einbezogen werden. Damit ist auch aus dieser Entfernung eine Schätzung mit höherer Genauigkeit möglich. Der Einfluss der Quelle wird erst bei Messpunkten, die deutlich im Cavum Conchae liegen, sichtbar ($L=17.1$ mm und 21.0 mm).

Messungen am Modellohr

Um die praktische Anwendung des Sondenmikrofons zu erproben und weitere Fehlerabschätzungen zu erhalten, wurde ein Ohrmodell erstellt. Dabei handelt es sich um eine Silikonpinna, die einem natürlichen Ohr nachgebildet wurde. Dieser wurde ein aus Epoxydharz modellierter Gehörgang hinzugefügt. Die Schätzung wurde bei Anregung durch einen Kopfhörer mit einer bedämpften Sonde von 40 mm Länge und 0,8 mm Durchmesser durchgeführt. Mit einem zusätzlichen Sondenmikrofon wurde der Schalldruck am schallharten Modelltrommelfell direkt gemessen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 2, in der deutlich die strukturelle Ähnlichkeit mit der FE-Simulation erkennbar ist.

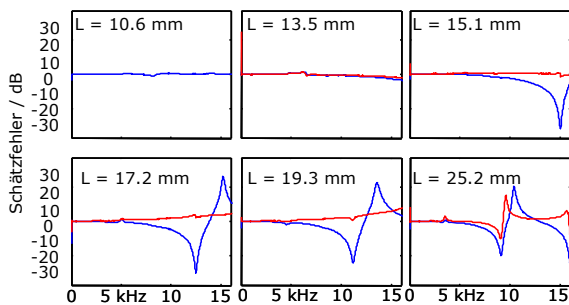


Abbildung 2: Unterschied zwischen geschätztem und berechnetem Schalldruck aus der Messung am Modellohr

Um ein frequenzunabhängiges Bewertungskriterium für den Gesamtfehler zu erhalten, wird die mittlere absolute Abweichung benutzt. In Abbildung 3 ist diese Größe für die Finite-Elemente-Simulationen und für die Messung dargestellt.

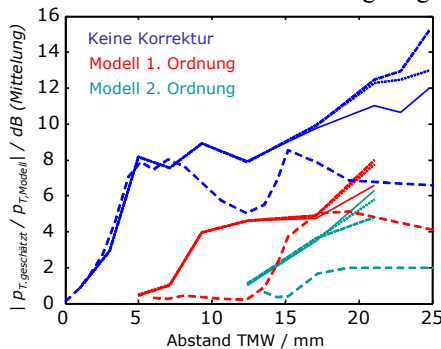


Abbildung 3: Fehlermittelung als Funktion des geschätzten Trommelfellabstands für FE-Simulation (durchgezogene und fein gepunktete Linien) und Messung (grob gepunktete Linien)

Wie deutlich wird, liegt der auftretende Fehler bei der Messung sogar unterhalb der Abweichung der Schätzung, die aus den Simulationen berechnet wurde. Dies ist möglicherweise auf die höhere Gesamtdämpfung zurückzuführen. Es zeigte sich ferner, dass p_T im Rahmen von ± 5 dB durch die Sondenposition beeinflusst wird, was durch das Verfahren selbstverständlich kompensiert wird (nicht dargestellt).

Isophonenmessungen

Ein wesentliches Testkriterium ist die Stabilität psychoakustischer Messungen bezüglich unterschiedlicher Sondenpositionen. Zur Umsetzung wurden monaurale Isophonen (Kopfhöreranregung) mit Bezug auf p_T bei drei Versuchspersonen (VP) gemessen, wobei zwei Messreihen mit unterschiedlichen Einschubtiefen (Minimalfrequenzen 5-6 kHz und 7-8 kHz) durchgeführt wurden. Dabei wurde mit dem beschriebenen Verfahren ein frequenzunabhängiger Schalldruck von 30 dB, 50 dB und 70 dB eingestellt (bei VP3 wurde lediglich bei 30 dB und 70 dB gemessen). Bei VP1 wurde darüber hinaus eine Vergleichsmessung nahe am Trommelfell (Minimalfrequenz 19-20 kHz) durchgeführt. Pro Kontur wurden 3-5 Messungen gemittelt.

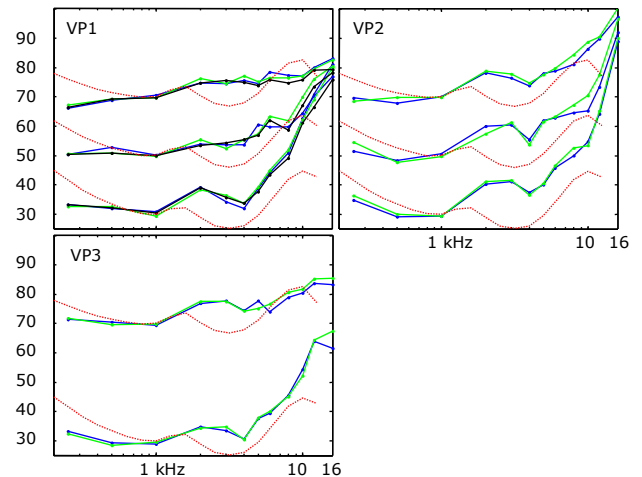


Abbildung 4: Trommelfellbezogene Isophonen (30 dB, 50 dB, 70 dB) mit ISO226-Kurven zum Vergleich (rot), Schätzung mit Minimum bei 5-6 kHz (grün) und bei 7-8 kHz (grün), bei VP1: Messung in Trommelfellnähe (schwarz), Schätzung 1. Ordnung

Wie man erkennt, ist die Abweichung zwischen den aus unterschiedlichen Schätzungen gewonnenen Isophonen sehr gering (max. 3 dB unter 10 kHz). Das breite Minimum der nach ISO226 dargestellten Kurven (Gehörgangseffekt) fehlt erwartungsgemäß.

Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene Verfahren zur frequenzunabhängigen Einstellung des Schalldrucks am Trommelfell wurde mit FE-Simulationen, Messungen am Modellohr und psychoakustischen Messungen evaluiert. Der an den Modellen bestimmte Schätzfehler übersteigt 3 dB nicht. Der geringe Fehler wird durch die Isophonenmessungen bestätigt. Zukünftig soll das Verfahren an weiteren Versuchspersonen mit engerem Frequenzraaster durchgeführt werden. Zudem ist eine Erweiterung auf In-Situ-Messungen an Hörgeräten geplant.