

Messtechnische Konsequenzen der dreidimensionalen Schalleinkopplung in den Gehörgang

Sebastian Schmidt, Herbert Hudde

Institut für Kommunikationsakustik, Forschungsgruppe Hörakustik

Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, +49 (0)234 32 26662, www.rub.de/hoerakustik, sebastian.schmidt@rub.de

Motivation

Der Gehörgang kann vereinfachend als akustische Leitung, in der eindimensionale Wellenausbreitung auftritt, betrachtet werden. Sein Zweitorverhalten wird nach dieser Modellvorstellung vollständig durch eine Kettenmatrix K beschrieben. Die Schallfeldgrößen am Trommelfell (p_D , q_D) lassen sich diesem Modell nach durch Transformation der messbaren Eingangsgrößen über die Gehörgangslänge bestimmen. Dazu ist es notwendig, die Kettenparameter des Gehörgangs zu kennen. Diese können nach der Websterschen Theorie akustischer Leitungen über seinen Querschnittsverlauf bestimmt werden. Es sollte also umgekehrt möglich sein, den Querschnittsverlauf aus Messungen am Eingang des Gehörgangs zu schätzen, um so zu einem konsistenten eindimensionalen Modell der individuellen Anatomie zu gelangen. Dies gelingt nicht robust. Es zeigte sich, dass die Kettenparameter nicht nur vom Querschnittsverlauf, sondern auch von den Biegungen des Gehörgangs abhängen (vgl. [2]). Gleichzeitig führt der an den Biegungen reflektierte Schall zu einem sehr komplexen Wellenfeld am Gehörgangseingang, was die klare Definition der Eingangsgrößen erheblich erschwert. Wir haben untersucht, welche Konsequenzen dies für Messungen haben muss, mit denen man die Trommelfellgrößen präzise bestimmen will.

Messung der akustischen Eingangsimpedanz am Gehörgang

Die akustische Impedanz am Gehörgangseingang ist der Quotient aus dem Schalldruck p_E und dem Volumenfluss q_E in der Eingangsebene E . Zur Messung der Eingangsimpedanz kann man den Gehörgang beispielsweise mit einer kalibrierten Schallflussquelle anregen und den vor der Quelle auftretenden Schalldruck bestimmen. Beide Größen können durch den Schallkanal des Messkopfes zum Gehörgangseingang transformiert und zur Berechnung der dort herrschenden Eingangsimpedanz benutzt werden. Frühere Analysen (vgl. [3]) zeigten jedoch, dass das Wellenfeld an der Pinna eine sehr komplizierte, frequenzabhängige Struktur besitzt. Ein an das Ohr angekoppelter Impedanzmesskopf prägt dem Schallfeld demgegenüber eine feste Eingangsebene E ein. Es war bislang unbekannt, welchen Einfluss die Art der Ankopplung eines Messgeräts an den Gehörgang auf die gemessene Impedanz hat. Da es sich bei den Reflexionen an den Biegungen und dem Schallfeld an der Pinna um dreidimensionale Welleneffekte handelt, kann man die

se Fragestellung nicht mit einem eindimensionalen Modell untersuchen. Wir haben mit Hilfe des BOHEAR-Außenohrmodells (vgl. [3]; es handelt sich dabei um ein Finite-Elemente-Modell einer natürlichen Außenohrgeometrie) eine Impedanzmessung in drei Varianten simuliert (Abb. 1). Im Vorgabemodell ist dem Gehörgang ein Messkopf mit 5 mm Durchmesser vorgeschaltet. Das zweite Modell ist ähnlich gestaltet, der Impedanzmesskopf ist gegenüber dem ersten Fall jedoch leicht geneigt. Der Messkopf im dritten Modell hat den gleichen Neigungswinkel wie im ersten Modell, besitzt jedoch mit 2,5 mm den halben Durchmesser. Der Gehörgang ist mit einem natürlich schwingenden Trommelfell abgeschlossen. Da die Messkopfoberfläche schallhart simuliert wurde, ist lediglich die im Schallkanal enthaltene Luft als Zylinder sichtbar. Die Modelle werden durch eine Schnellequelle am Ende der Kanäle angeregt. Die Ergebnisse der Simu-



Abbildung 1: Finite-Elemente-Modelle der Messköpfe (links: Durchmesser 5 mm, Mitte: Durchmesser 5 mm, leicht geneigt, rechts: Durchmesser 2,5 mm).

lationen sind in Abb. 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die drei bestimmten Impedanzen deutlich voneinander unterscheiden. Dabei ist eine mit steigender Frequenz zunehmende Abweichung bei den Frequenzen der Impedanzextrema und auch der Impedanzbeträge beobachtbar. Die Resultate der Impedanzmessung (und somit auch der aus der Lage der Pol- und Nullstellen bestimmte Querschnittsverlauf) hängen somit wegen der jeweils unterschiedlichen Einprägung einer Eingangsebene von der Art der Messung ab.

Messung von Übertragungsfunktionen im Gehörgang

Bei Bezug der Schallfeldgrößen auf frequenzunabhängige, konstante Ebenen am Gehörgangseingang gelingt es al-

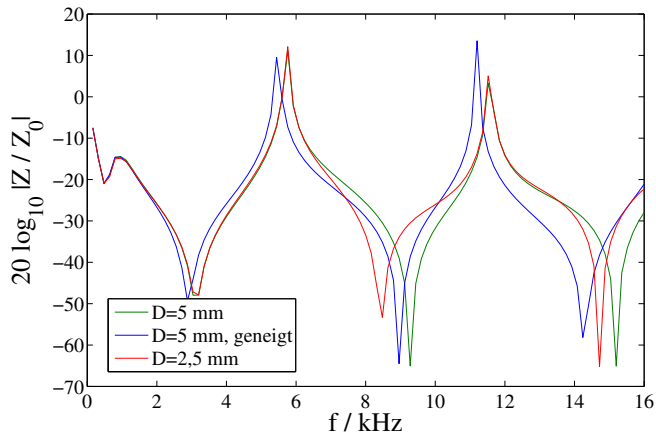


Abbildung 2: Simulationsergebnisse von Impedanzmessungen am Gehörgang, normiert auf die Wellenimpedanz einer Leitung mit dem Anfangsdurchmesser des Gehörgangs.

so nicht, eindeutig die Transformationseigenschaften des Gehörgangs oder sogar den Trommelfellschalldruck zu bestimmen. Visualisiert man den Schalldruck in den Modellen (Animationen vgl. [4]), so zeigt sich, dass im hinteren Teil des Gehörgangs die Lage der Flächen gleichen Drucks im Wesentlichen nicht von der Frequenz abhängt, die Flächen jedoch nicht zwangsläufig eben sind. Deswegen eignen sich (z.B. mit einer Mikrofonsonde durchgeführte) punktbezogene Messungen besser zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens im Gehörgang. Die aus der Literatur bekannten Messdaten von Punktübertragungsfunktionen zum Trommelfell (vgl. z.B. [1]) weisen darauf hin, dass die Übertragungseigenschaften entlang des Gehörgangs zum Trommelfell hin immer weniger vom komplexen Schallfeld an der Pinna abhängen. Mit dem BOHEAR-Außenohrmodell wurde dieser Effekt nachgebildet. Dazu betteten wir die Pinna in ein quaderförmiges Luftvolumen ein. Durch homogene Schnelleanregung an jeweils einer Fläche des Luftquaders wurde der Einfall am Ohr vorbeistreichender Wellen von vorn und von hinten sowie seitlich einfallender Wellen angenähert. Die Übertragungsfunktionen wurden von verschiedenen Punkten aus in Bezug zum Trommelfellschalldruck (am innersten Punkt zwischen Trommelfell und Gehörgang) berechnet und sind in Abb. 3 dargestellt. Das Übertragungsverhalten variiert in Teilbild A (vom Cavum Conchae zum Trommelfell) deutlich zwischen den drei verschiedenen Anregungssituationen. Die Punktübertragungsfunktionen gleichen sich schon für die Darstellungen in Bild B und C wie erwartet an und sind vor dem Trommelfell (Bild D) praktisch identisch.

Fazit

Das Schallfeld am Gehörgangseingang erlaubt keine präzisen Rückschlüsse auf Trommelfellschalldruck oder Gehörgangsform, da es von den Gehörgangsbiegungen beeinflusst wird. Misst man hier z.B. die akustische Impedanz, erhält man von der Lage der jeweiligen Mess-

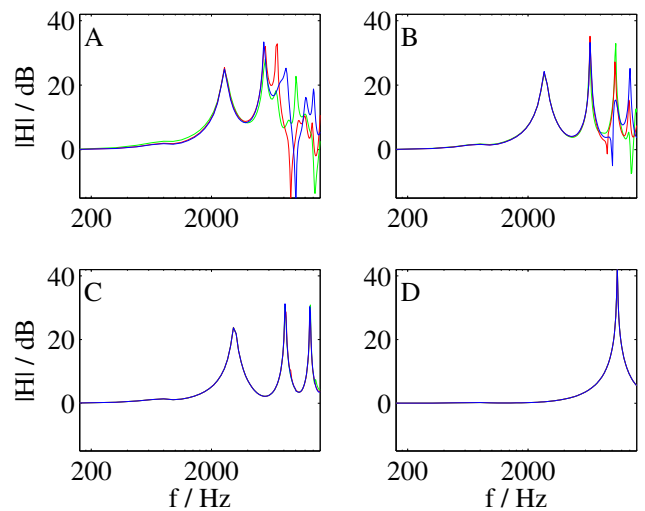


Abbildung 3: Berechnung der Übertragungsfunktionen zum Trommelfell bei Beschallung von der Seite (rot), von vorn (grün) und von hinten (blau); A, B, C, D: jeweils 45 mm, 37 mm, 28 mm und 8 mm vor dem Trommelfell. Die Punkte A und B befinden sich noch im Cavum Conchae.

ebene abhängige Daten. Hinter den Hauptbiegungen des Gehörgangs liegt dagegen ein Schallfeld vor, dessen Punktübertragungsverhalten unabhängig von den Wellenstrukturen an der Pinna ist. Da die Lage der Flächen gleichen Schalldrucks jedoch auch hier unbekannt ist, müssen anstatt flächenbezogener Größen Punktübertragungsfunktionen eingesetzt werden, die z.B. mit Sondenmikrofonen gut zu messen sind. Die Ergebnisse legen nahe, die Messpositionen zur Schätzung des Trommelfellschalldrucks in den hinteren Teil des Gehörgangs zu verlagern. Aus den hinter den Hauptbiegungen des Gehörgangs gemessenen Schalldrucksignalen sollten sich Informationen über den Restgehörgang ableiten lassen, die die Ermittlung der Trommelfellschallgrößen wesentlich genauer machen.

Literatur

- [1] Hammershøi, D., Møller, H. (1996): Sound transmission to and within the human ear canal. *JASA* 100 (1): 408-427.
- [2] Hudde, H., Müller, M. (2005): Einfluss der Gehörgangsform auf die Transformationseigenschaften des Gehörgangs. 31. Dtsch. Jahrestg. f. Akust. (DAGA'05), D-München.
- [3] Schmidt, S., Hudde, H. (2005): Systematische Fehler bei akustischen Gehörgangsmessungen. 31. Dtsch. Jahrestg. f. Akust. (DAGA'05), D-München.
- [4] Schmidt, S. (2005): Animationen zum BOHEAR-Außenohrmodell, http://www.rub.de/ika/ika/forschung/gruppe_hudde/bohear.htm