

Streuung der Hörschwelle von Normalhörenden für Frequenzen oberhalb 1kHz bei Bezug auf den Schalldruck im Ohrsimulator, im Freifeld und am Trommelfell

Jan-Henning Schmidt¹, Manfred Mauermann², Matthias Blau¹

¹ *Institut für Hörtechnik und Audiologie, FH Wilh./Oldenburg/Elsf., Email: jan-henning.schmidt@gmx.de*

² *Medizinische Physik, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg*

Einleitung

Die Hörschwelle für reine Töne ist eines der wichtigsten Instrumente zur Diagnose von Hörstörungen. Sie wird typischerweise mit Kopfhörern gemessen, die auf einem Ohrsimulator gemäß IEC 60318 kalibriert sind. Da Ohrsimulatoren bestenfalls mittlere Ohren nachbilden können, stellt sich die Frage, ob nicht vielmehr der Schalldruck am individuellen Trommelfell als Eingangsgröße für das auditorische System zu betrachten ist. Diese Frage ist schwer direkt zu beantworten, weil jeder Mensch neben einem individuellen Außenohr auch über individuelle (und damit von Individuum zu Individuum streuende) Mechanismen der Weiterleitung und -verarbeitung auditiver Reize verfügt. Wenn man jedoch annimmt, dass die Anatomie des Außenohres und damit die individuelle Weiterleitung des Schalls zum Trommelfell unabhängig von der weiteren Verarbeitung ist, müsste die Größe, die am besten zur Beschreibung des individuellen inputs in das auditorische System geeignet ist, die geringste interindividuelle Streuung der Wahrnehmung verursachen.

Bereits in [1] wurde in diesem Sinne der Schalldruck am Trommelfell als beste individuelle Eingangsgröße für das auditorische System vorgeschlagen. Da eine Messung des Schalldrucks direkt am Trommelfell mit Sondenmikrofonen aufwändig und unangenehm für die Versuchspersonen ist, wurde dort auch ein Verfahren zur Vorhersage des Schalldrucks am Trommelfell aus einer Schalldruckmessung im Gehörgang vorgeschlagen. Allerdings wurden lediglich Messungen an 3 Versuchspersonen demonstriert, was im Kontext einer Argumentation hinsichtlich geringerer Streuungen sicher ungenügend ist.

Alternativ wurde unter anderem auch der sogenannte "Forward Pressure Level", d.h. die Amplitude der in den Gehörgang hineinlaufenden Welle inklusive Methoden zu deren messtechnischen Bestimmung, als Eingangsgröße für das menschliche auditorische System vorgeschlagen, siehe z.B. [5].

Schließlich muss man sich auch die Frage stellen, inwieweit der Schalldruck im Freifeld eine relevante Eingangsgröße für das auditorische System darstellt, da z.B. die Lärmbelastung am Arbeitsplatz oder in der Nachbarschaft stets als Freifeldpegel angegeben wird.

In der vorliegenden Arbeit soll die Frage nach der relevanten Eingangsgröße für das menschliche auditorische System anhand der resultierenden interindividuellen Streuung der Hörschwelle für reine Töne bei 20 normalhörenden Versuchspersonen untersucht werden.

Modelle zur Vorhersage des Schalldrucks am Trommelfell

Impedanzbasiert

Nach [2, 3] kann der Schalldruck am Trommelfell in Gehörgängen, die durch eine Otoplastik verschlossen sind, durch ein kombiniertes Quellen-/Ohrmodell gut vorhergesagt werden. Das Ohrmodell besteht dabei aus einem Gehörgangmodell und einem Trommelfellmodell, die beide aus der gemessenen Eingangsimpedanz des Restgehörgangs abgeleitet werden. Wie in [2, 3] wurden auch hier die Gehörgangsimpedanzen mit einer verbesserten 3-Parameter-Methode nach [4] gemessen.

Pressure Minima Method

Bei der Pressure Minima Method [1] werden mit einer Messung im Gehörgang (hier 5 mm von der Innenseite der Otoplastik entfernt) die durch die Leitungswirkung des Gehörgangs entstehenden Schalldruckminima im Frequenzbereich detektiert. Je nachdem wieviele Minima detektiert werden, wird eine zylindrisches Gehörgangmodell (für ein Minimum) oder ein konisches Gehörgangmodell (für zwei Minima) angepasst. Abgeschlossen wird das Gehörgangmodell mit einer rein resistiven Impedanz, die so in ihrem Betrag angepasst wird, dass sich ein möglichst glatter Frequenzgang für den geschätzten Schalldruck am Trommelfell ergibt.

Forward Pressure Level

Die Idee des Forward Pressure Level ([5]) besteht darin, mit Hilfe der Reflektanz (R_m) den Schall an der Messposition (am Anfang des verschlossenen Gehörgangs) in die fortlaufenden- (p_i) und rücklaufenden (p_r) Bestandteile zu unterteilen um so den Einfluss von stehenden Wellen im Gehörgang zu umgehen. Der fortlaufende Schall berechnet sich nach

$$p_i^{th} = \frac{p_m^{th}}{1 + R_m}, \quad (1)$$

wobei das hochgestellte th den Bezug zur Hörschwelle, der Index m den Bezug zur Messposition im Gehörgang darstellt. Der Forward Pressure Level (FPL) entspricht dann dem Pegel von p_i^{th} .

Versuchsdurchführung

Für alle 20 Versuchspersonen wurde eine individuelle Otoplastik mit zwei Bohrungen für Sonden Schlauch und Receiverschlauch angefertigt. Die Bestimmung der Hörschwelle erfolgte mit Hilfe eines gepulsten Békésy-Trackings von 707 Hz bis 11384 Hz mit einer Frequenzauflösung von 135 Pulsen pro Oktave. Die Amplituden-

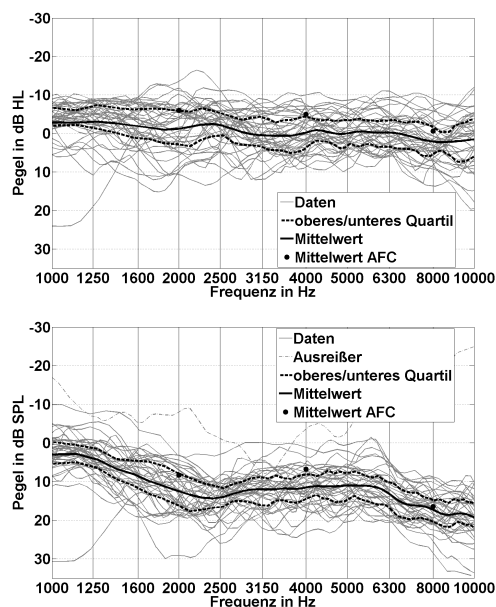


Abbildung 1: oben: Ergebnisse der Kopfhöreraudiometrie, unten: Ergebnisse der Audiometrie mit Bezug auf den Schalldruck am Trommelfell, geschätzt nach der impedanzbasierten Methodik.

auflösung betrug 2,5 dB/s. Der Auswertebereich wurde auf 1000 Hz bis 10000 Hz beschränkt. Zusätzlich wurde bei 2000 Hz, 4000 Hz und 8000 Hz die Hörschwelle mittels Alternative Forced Choice (AFC) Verfahren bestimmt. Die Hörschwellen wurden (1) mit einer entzerrten Kopfhöreraudiometrie, (2) mit einer entzerrten Freifeldaudiometrie und (3) mit einer unentzerrten Audiometrie über die Otoplastik ermittelt.

Ergebnisse

In Abb. 1 sind die Ergebnisse der Kopfhöreraudiometrie (oben) und der Audiometrie mit Bezug auf den Trommelfellschalldruck, geschätzt durch die impedanzbasierte Methodik (unten), dargestellt.

Ein direkter Vergleich der beiden Datensätze ist nicht möglich, da bei der Kopfhöreraudiometrie eine Entzerrung auf die Normhörschwelle berücksichtigt wurde, während bei der trommelfellbezogenen Audiometrie die Schwellen als absolute Schalldruckpegel angegeben sind.

Ein Vergleich der interindividuellen Standardabweichungen (Abb. 2 oben) zeigt eine weitgehende Übereinstimmung der verschiedenen Methodiken für Frequenzen bis etwa 6 kHz.

Oberhalb von 6300 Hz weist die impedanzbasierte Audiometrie die geringste Streuung auf, gefolgt von der Kopfhöreraudiometrie und der Freifeldaudiometrie.

Vergleicht man die verschiedenen Entzerrungsmethoden bei in-Ohr-Darbietung (Abb. 2 unten), so ist auch hier eine große Übereinstimmung der Methoden bis etwa 3 kHz zu konstatieren. Oberhalb von etwa 6 kHz weist der FPL eine höhere Streuung auf als die beiden Methoden mit Bezug auf den Schalldruck am Trommelfell. Teilweise ist diese Streuung sogar höher als die Streuung der unentzerrten Schwellen (d.h. der gemessenen elektrischen

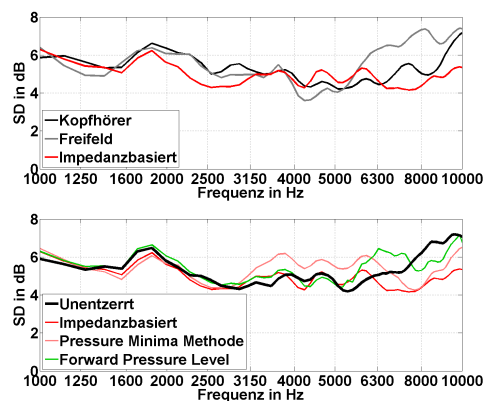


Abbildung 2: oben: Vergleich der Standardabweichungen der Freifeldaudiometrie, der Kopfhöreraudiometrie und der Audiometrie mit Bezug auf den Trommelfellschalldruck geschätzt nach der impedanzbasierten Methodik, unten: Vergleich der Standardabweichungen der unentzerrten Daten, der trommelfellbezogenen Audiometrie (impedanzbasiert), der Gehörgangsbezogenen Audiometrie (FPL) und der trommelfellbezogenen Audiometrie (Pressure Minima Method).

Hörer-Spannung).

Ab etwa 3 kHz weist die impedanzbasierte Entzerrung eine geringere Streuung als die Entzerrung nach der Pressure-Minima-Methode auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Trotz des Bezugs auf eine mittleres Ohr zeigt die Kopfhöreraudiometrie auch bei hohen Frequenzen eine durchaus akzeptable interindividuelle Streuung. Die Freifeldaudiometrie weist oberhalb von 6kHz die höchste Streuung auf, der impedanzbasierte Bezug auf den Schalldruck am Trommelfell die geringste. Der FPL scheint keinen Vorteil gegenüber den trommelfellbezogenen Verfahren zu bringen.

Da die beobachteten Unterschiede der Streuung im Vergleich zur Streuung der Kopfhöreraudiometrie größtenteils nicht statistisch signifikant waren (bei $\alpha = 0.05$), sind Untersuchungen mit weiteren Versuchspersonen geplant. Im Vergleich zur unentzerrten Messung zeigt sich jedoch bei der impedanzbasierten Methodik ab ca. 7000 Hz eine statistisch signifikante Verringerung der Streuung.

Literatur

- [1] Schmidt S., Hudde H.: Measurement of equal-loudness contours using eardrum pressure as reference signal. *Acoustics 2008 Paris* 3895-3900, 2008.
- [2] Blau M., Sankowsky T., Roeske P., Mojallal H., Teschner M. & Thiele C.: Prediction of the sound pressure at the ear drum in occluded human cadaver ears. *Acta Acustica united with Acustica* 96(3):554-566, 2010.
- [3] Sankowsky-Rothe T., Blau M., Rasumow E., Mojallal H., Teschner M. & Thiele C.: Prediction of the sound pressure at the ear drum in occluded human ears. Accepted for publication in *Acta Acustica united with Acustica*.
- [4] Stirnemann A.: Verfahren zu Messung der akustischen Impedanz. Patent Nr.: BP 1 316 783 B1. Anmeldung: 2003, Veröffentlichung: 04/2008
- [5] Withnell R.H., Patricia S.J., Waldvogel K., Morgenstein K. & Jont B.A.: An in situ calibration for hearing thresholds. *J.Acoust.Soc.Am.* 125(3):1605-1611, 2009.