

Zum Begriff des "Trommellschalldrucks" – eine Neubetrachtung unter Verwendung Finiter Elemente.

Herbert Hudde, Andreas Aumann

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland, Email: herbert.hudde@rub.de

Einleitung

Bekanntlich ist die Angabe des häufig als Referenzsignal verwendeten "Trommellschalldrucks" nicht ohne Weiteres möglich, weil der Schalldruck in der Realität über der Trommelfläche variiert. Die Schalldruckunterschiede nehmen zwar erst oberhalb von etwa 6 kHz praxisrelevante Werte von mehr als 2 dB an, werden jedoch extrem groß, wenn die Frequenz so groß ist, dass die erste Schalldruck-Nullstelle im Bereich des Trommelfells auftritt. Da die Schätzmethoden für den Trommellschalldruck in letzter Zeit auch für hohe Audiofrequenzen erheblich verbessert werden konnten [1], bekommt die Frage nach einer sinnvollen Definition des Trommellschalldrucks neue Relevanz. In der Vergangenheit wurde der Trommellschalldruck anhand eines Netzwerkmodells als Druck p_D an einer am Umbo wirksamen "Trommellimpedanz" definiert [2]. Dieser Druck entspricht damit nicht einem direkt messbaren Schalldruck, sondern einer aus Messergebnissen nur rechnerisch ableitbaren Größe.

Mit dem in [1] dargestellten Verfahren wird nicht dieser früher definierte Trommellschalldruck p_D , sondern der Schalldruck p_T an der tiefsten Stelle des Gehörgangs, im "typanomeatalen Winkel", gemessen. Es stellt sich die Frage, wie stark sich dieser Messwert vom Trommellschalldruck p_D unterscheidet. Noch weitergehend ist die Frage, ob möglicherweise eine andere Definition des Trommellschalldrucks korrekter und/oder praxisnäher sein kann als die bisherige, und wie gut ein eventuell neu definierter Trommellschalldruck aus dem Messwert p_T geschätzt werden kann. Diese Fragen werden im Folgenden mithilfe eines Finite-Elemente-Modells untersucht.

Schalldrücke im Bereich des Trommelfells

Das Finite-Elemente-Modell besteht aus Gehörgang und Mittelohr (Abb. 1). Es wurde bereits in [3] beschrieben. Da für die betrachteten Fragestellungen die Auskleidung des Gehörgangs mit Weichgewebe keine wesentliche Rolle spielt, wurde mit schallharten Wänden gerechnet. Das Mittelohr muss dagegen über die geometrischen Daten hinaus mechanische Eigenschaften korrekt beschreiben. Es enthält neben dem Trommelfell mit pars tensa und pars flaccida alle relevanten Bänder und Gelenke. Da die folgenden Betrachtungen auch die Drucktransformation vom Trommelfell ins Vestibulum unter der Stapesfußplatte mit einbeziehen, und um eine realistische Last für den Stapes zu modellieren, muss auch die Cochlea in die Modellierung einbezogen werden. Hier wurde der Einfachheit halber nur ein verlustbehafteter Masse-Feder-Schwinger als Last angesetzt, dessen Werte in [2] angegeben wurden.

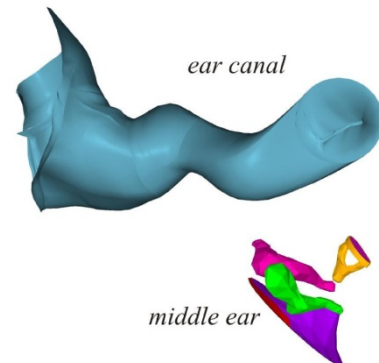


Abbildung 1: Geometrie des verwendeten Gehörgangs und des Mittelohres.

Eine sinnvolle Definition des "Trommellschalldrucks" p_D muss auf den effektiven Eingangsschalldruck für das Mittelohr abzielen. Dieser Schalldruck muss also eng mit der Kraft verbunden sein, die die Gehörknöchelchen antreibt. Bereits die alte Definition des Trommellschalldrucks basierte auf der Vorstellung, dass vermutlich der Bereich um den Umbo herum eine besonders große Rolle für die Krafteinleitung spielt, ohne dies genau verifizieren zu können.

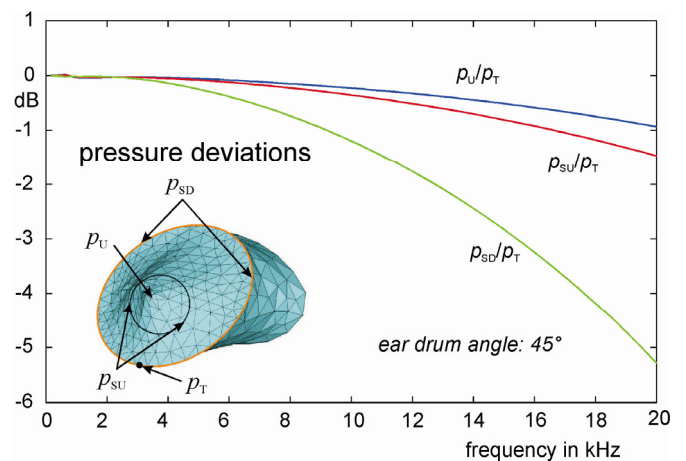


Abbildung 2: Definition einiger Drücke, die auf ihre Eignung als effektiver Eingangsschalldruck des Mittelohres untersucht werden. Die Abweichungen gegenüber dem Druck p_T im typanomeatalen Winkel für ein Standardohr sind als Funktion der Frequenz angegeben.

Dies gelingt nun durch Simulation mit Finiten Elementen. Abb. 2 zeigt die untersuchten Schalldrücke: neben dem messtechnisch gut erfassbaren Schalldruck p_T im typanomeatalen Winkel wurde der Schalldruck p_U am Umbo, der Mittelwert p_{SU} auf eine Fläche von 3 mm Durchmesser um den Umbo herum und der über die gesamte Trommelfläche gemittelte Druck p_{SD} untersucht. Die naheliegendste Frage besteht darin zu ermitteln, wie groß die Unterschiede zwischen den verschiedenen Drücken überhaupt sind. Da nur p_T leicht messbar ist, sind die Abweichungen in Abb. 2 mit

Bezug auf diesen Druck dargestellt. Wie zu erwarten ist die Abweichung zum Mittelwert über die gesamte Trommelfellfläche am größten. Die Abweichungen am Umbo bleiben bis 20 kHz unter 1 dB. Bei Mittelung über die genannte Fläche erhöht sich die Abweichung nur geringfügig.

Einfluss der Schrägstellung des Trommelfells relativ zur Gehörgangachse

Mit dem Modell lässt sich für jeden der betrachteten Kandidaten für den "Trommelfellschalldruck" die Übertragungsfunktion ins Vestibulum ermitteln. Die Unterschiede zwischen den Übertragungsfunktionen lassen noch keinen Schluss auf die Eignung der jeweiligen Definition zu. Eine sinnvolle Wahl des Trommelfellschalldrucks sollte dazu führen, dass die Übertragungsfunktion vom Trommelfell ins Vestibulum p_V/p_D möglichst wenig von den Unterschieden individueller Gehörgänge und Mittelohren abhängt. Die Wirkung des Gehörgangsschallfeldes auf das Mittelohr hängt natürlich von einer ganzen Reihe individueller Details ab. Systematisch erfassbar und gleichzeitig besonders entscheidend ist insbesondere die Schräglage des Trommelfells. Dies leuchtet durch Betrachtung von Abb. 3 unmittelbar ein.

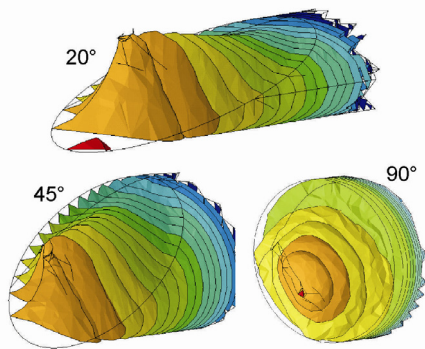


Abbildung 3: Schallfelder in der Nähe des Trommelfells bei unterschiedlicher Neigung seiner Basisfläche gegenüber der Gehörgangachse. Gezeigt sind Flächen gleichen Druckbetrages bei einer Frequenz von 9280 Hz.

Aus diesem Grund wurde die Veränderung von Druckübertragungsfunktionen bei Variation des Trommelfell-Neigungswinkels untersucht. Die beiden in Abb. 3 gezeigten Fälle mit 20° und 90° Neigung sind Extremfälle, die bei normalen Ohren nicht vorkommen, jedoch die Auswirkung auf die Schallfelder deutlich machen. Die größten Abweichungen (bis ca. 3 dB) entstehen bei Bezug auf p_T und p_{SD} (ohne Abb.).

Der obere Teil der Abb. 4 zeigt, dass bei Bezug auf den Schalldruck nahe dem Umbo selbst bei unrealistisch großen Neigungswinkeln die Abweichungen der Druckübertragungsfunktionen kaum praxisrelevant sind. Zwischen 30° und 60° bleiben sie unter 0.2 dB. Könnte man den Schalldruck am Umbo direkt messen, wäre dies offensichtlich die optimale Wahl für den Trommelfellschalldruck. Es ist nahezu unerheblich, ob man den Schalldruck direkt am Umbo oder den über eine kleine Fläche um den Umbo herum gemittelten Schalldruck verwendet.

Verwendet man stattdessen den praktisch gut messbaren Druck im tympanomeatalen Winkel, so kommt der Fehler

hinzu, der im unteren Teil von Abb. 4 dargestellt ist. Dieser Fehler kann bis zu 3 dB betragen, bleibt jedoch für Neigungswinkel zwischen 30° und 60° unter 0.5 dB. Die hier nicht dargestellten Phasenfehler der Übertragungsfunktionen liegen stets unter 1°, sind also in praxi völlig unerheblich.

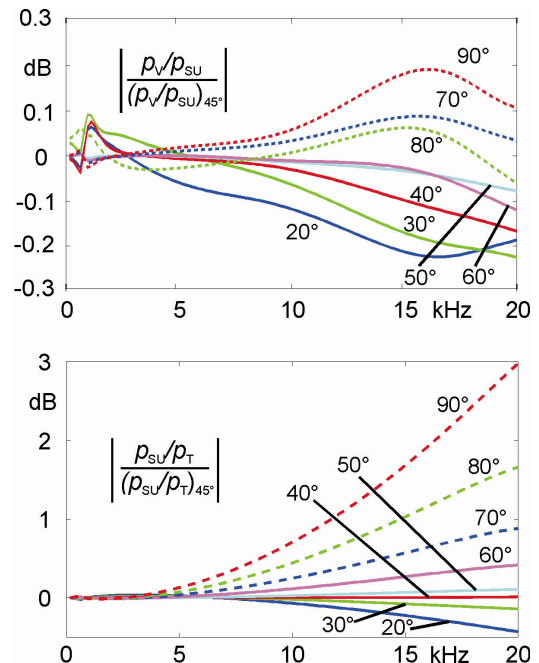


Abbildung 4: Abhängigkeit der Beträge der Übertragungsfunktionen p_V/p_{SU} und p_{SU}/p_T vom Neigungswinkel des Trommelfells.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass der Schalldruck am Umbo im Prinzip die beste Wahl für den "Trommelfellschalldruck" p_D darstellt, weil bei dieser Wahl die Neigung des Trommelfells gegenüber der Gehörgangachse die geringste Rolle spielt. Da nur der Schalldruck p_T im tympanomeatalen Winkel leicht messbar ist, bietet es sich an, diesen für ein Normalohr mit 45° Trommelfell-Neigung in den Wert am Umbo umzurechnen. Die Umrechnung kann nach Abb. 2 durch $p_D \triangleq p_{SU} \approx p_U \approx p_T \cdot \cos(1.5 \text{ mm} \cdot \omega / c)$ angenähert werden. Die Korrektur beträgt selbst bei 20 kHz nur 1.3 dB, ist allerdings bei variablen Neigungswinkeln nur auf etwa 0.5 dB genau. Zusätzlich entstehen selbstverständlich weitere Fehler durch sonstige interindividuelle Unterschiede. Trotzdem ist die genannte Korrektur sinnvoll, da sie ohne Aufwand die bestmögliche Schätzung liefert.

Literatur

- [1] Schmidt, S., Hudde, H. (2008). "Measurement of equal-loudness contours using eardrum pressure as reference signal." Proc. of Acoustics'08 SFA, ASA, EAA Conference, Paris.
- [2] Hudde, H., Engel, A. (1998). "Measuring and modeling basic properties of the human middle ear and ear canal. Part I: Model structure and measuring techniques.", ACUSTICA/acta acustica **84**, 720-738
- [3] Hudde, H., Schmidt, S. (2009). "Sound fields in generally shaped curved ear canals", J. Acoust. Soc. Am. **125** (5), 3146-3157