

Einfluss der Gehörgangsform auf die Transformationseigenschaften des Gehörgangs

Herbert Hudde und Michael Müller¹⁾

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, herbert.hudde@rub.de

¹⁾ jetzt: Audiologie im Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

Einleitung

Den Anlass zu dieser Untersuchung lieferte das häufige Versagen einer früher publizierten Methode [1], den Schalldruck am Trommelfell aus Schalldruckmessungen am Eingang des Gehörgangs bestimmen zu können. Die Bestimmung bzw. die gezielte Einstellung des Schalldrucks am Trommelfell ("trommelfellbezogene Audiometrie") ist ein lang gehegter Wunsch zur Verbesserung der Audiometrie und der Aussagekraft psychoakustischer Messungen. Der Bezug auf das Trommelfell eliminiert den erheblichen Einfluss des interindividuell stark variierenden Gehörgangs auf die resultierende Wahrnehmung. Dadurch werden psychoakustische Verläufe wie etwa Isophonen erheblich glatter, weil die durch den Gehörgang verursachte Welligkeit entfällt. Eine Approximation des Trommelfellbezugs durch Verwendung eines Ohr-Kupplers reicht wegen der starken Streuung individueller Gehörgangsgeometrien nicht aus.

Kern der in [1] dargestellten Methode ist die Bestimmung und Einrechnung der Querschnittsfunktion $A(z)$ des Gehörgangs entlang seiner Mittelachse z . Nach der Webster'schen Horn-Gleichung beeinflusst nur $A(z)$, nicht aber die Form des Querschnitts das Übertragungsverhalten des Gehörgangs. Der Querschnittsverlauf lässt sich aus der Verschiebung der Null- und Polstellen der Eingangsimpedanz gegenüber dem Fall eines Rohres mit konstantem Querschnitt schätzen. Während die Methode an Messingröhrchen unterschiedlichen Querschnittsverlaufs gute Ergebnisse zeigt, versagt sie häufig bei realen Gehörgängen, was sich daran zeigt, dass sich aus gemessenen Impedanzdaten keine sinnvollen Querschnittsfunktionen bestimmen lassen.

Schallausbreitung im gebogenen Gehörgang

Die Bestimmung der Querschnittsfunktion beruht letztlich auf der Auswertung von Reflexionen, die durch den variierenden Querschnitt hervorgerufen werden. Es kam der Verdacht auf, dass zusätzliche Reflexionen durch Formänderungen entstehen, insbesondere durch die erheblichen Biegungen des Gehörgangs. Um die tatsächlich in einem Gehörgang auftretenden dreidimensionalen akustischen Effekte zu untersuchen, wurden akustische Finite Elemente verwendet. Sie lassen sich auch mit schwingenden mechanischen Strukturen koppeln, schließen also die Möglichkeit zur Ankopplung eines Trommelfells und Mittelohres mit ein.

Der Unterschied zur Schallausbreitung im homogenen Rohr wird am deutlichsten, wenn man eine fortschreitende Welle betrachtet. Im homogenen Rohr tritt diese bei reflexionsfreiem Abschluss auf. Bei inhomogenen Rohren entstehen zwar stets Reflexionen innerhalb des Rohres, trotzdem bleibt der Charakter einer fortschreitenden Welle erhalten, wenn man das Rohr reflexionsfrei abschließt.

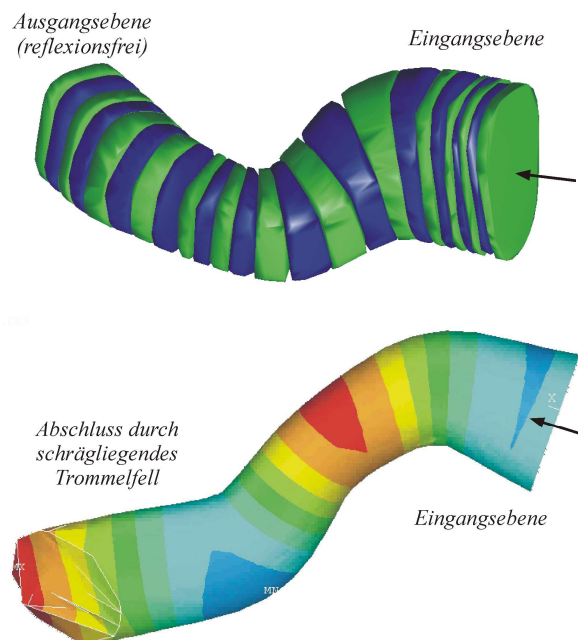


Abb. 1: Schallausbreitung im gebogenen Gehörgang. Oben: Bei reflexionsfreiem Abschluss und einer niedrigen Frequenz. Die Scheibchendicken entsprechen gleichen Phasendifferenzen des Schalldrucks. Unten: Bei Abschluss durch das Trommelfell bei 15 kHz. Die Farben kennzeichnen Schalldruckamplituden.

Zur Darstellung der Schallausbreitung wurden im oberen Teil von Abb. 1 Scheibchen gebildet, deren Grenzen durch äquidistante Phasen bestimmt sind. Bei einer rein fortschreitenden Welle im homogenen Rohr wären also alle Scheibchen gleich dick. Man erkennt, dass sich bei einem gehörgangsähnlichen Rohr unterschiedliche Dicken und an den gebogenen Verlauf angepasste Scheibchen auf, die Reflexionen an der Biegung vermuten lassen. Bei höheren Frequenzen können sogar keilförmige Segmente auftreten, die erheblich von den quasi-ebenen Wellentypen gemäß der Webster'schen Gleichung abweichen (unterer Teil von Abb. 1). Damit ist gezeigt, dass die Biegungen des Gehörgangs sich spürbar auswirken, also eine Beschreibung des Gehörgangs durch eine Querschnittsfunktion ohne Berücksichtigung der geometrischen Form nicht ausreichen kann.

Pol- und Nullstellenverschiebung der Eingangsimpedanzen

Es ist nahe liegend zu vermuten, dass die Gehörgangsform auch Verschiebungen der Pol- und Nullstellen der Eingangsimpedanzen von Gehörgängen bewirken kann, die das Versagen der in [1] beschriebenen Methode erklären. Um zu erkennen, welche Formen und Bedingungen zu Verschiebungen führen, wurden nicht nur gehörgangsähnliche Rohre, sondern auch spezielle Formveränderungen untersucht. Wir

betrachten hier ausschließlich Gehörgänge mit einem schallharten Abschluss, um die Frage nach dem Einfluss der Gehörgangsform unabhängig vom Einfluss des Mittelohrs zu beantworten.

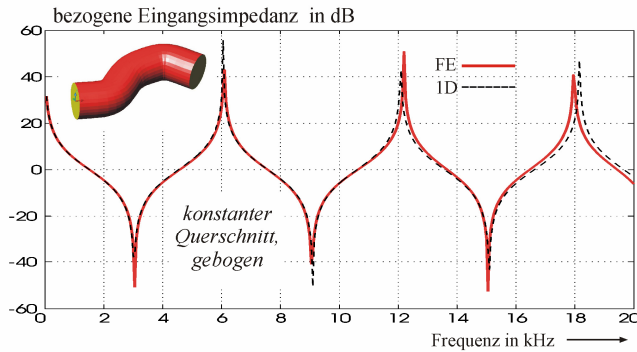


Abb. 2: Eingangsimpedanz eines senkrecht schallhart abgeschlossenen, gebogenen Rohres mit konstantem Querschnitt. Der mit Finiten Elementen (FE) berechnete Verlauf ist rot dargestellt, die eindimensionale Lösung (1D) schwarz gestrichelt.

In Abb. 2 ist die Eingangsimpedanz in ein schallhart abgeschlossenes gebogenes Rohr dargestellt. Dabei wurde jedoch eine Form gewählt, bei der die Querschnittsfunktion $A(z)$ trotz der Biegungen konstant ist. Aus diesem Grund zeigt die entsprechend der Webster'schen Differentialgleichung gewonnene eindimensionale Lösung (1D) auf der Frequenzachse äquidistante Pol- und Nullstellen. Aber auch die genaue Rechnung mit finiten Elementen (FE) ergibt keine erheblichen Verschiebungen. Reine Biegungen ohne Änderungen der Querschnittsfunktion wirken sich also auf die Eingangsimpedanz kaum aus.

Ähnlich wenig Effekt ergibt sich, wenn man einen elliptisch geformten Querschnitt verwendet, bei dem sich die Lage der Ellipse - ohne den Querschnitt zu verändern - kontinuierlich vom Anfang zum Ende des Rohres dreht (ohne Abb.). Kombiniert man allerdings die elliptische Drehung mit Biegungen (weiterhin bei konstanter Querschnittsfunktion), so entstehen spürbare Verschiebungen der Polstellen (Abb. 3).

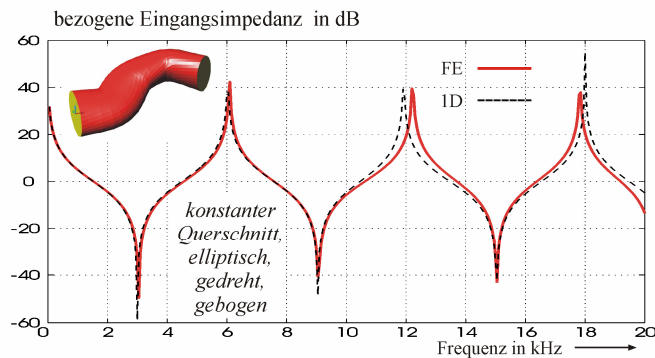


Abb. 3: Eingangsimpedanz eines senkrecht schallhart abgeschlossenen, gebogenen Rohres mit konstantem Querschnitt, jedoch mit elliptischer Querschnittsform. Die Lage der Ellipse dreht sich vom Anfang bis zum Ende des Rohres kontinuierlich weiter.

Zu kräftigen Verschiebungen aus dem äquidistanten Raster kommt es aber erst, wenn sich auch der Querschnitt verändert (Abb. 4). Die Querschnittsfunktion $A(z)$ stellt also tatsächlich die wichtigste Inhomogenität dar. Darüber hinaus

werden die Abweichungen zwischen der eindimensionalen und der Finite-Elemente-Rechnung bei der Kombination von Querschnittsänderung und Biegungen besonders groß.

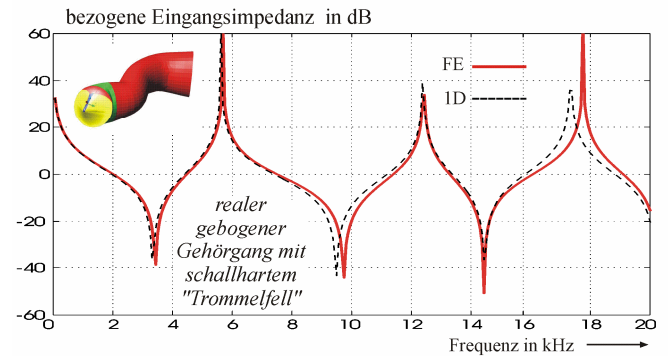


Abb. 4: Eingangsimpedanz eines durch ein schräg liegendes, schallhartes "Trommelfell" abgeschlossenen, gebogenen Gehörgangs, der auch Änderungen des Querschnitts aufweist. Ähnliche Verschiebungen der Pol/Nullstellen ergeben sich auch bei geradem Abschluss.

Schlussfolgerungen

Der eingangs geäußerte Verdacht, dass sich Biegungen im Gegensatz zu den Vorhersagen der Webster'schen Differentialgleichung auf die Eingangsimpedanz des Gehörgangs auswirken, konnte bestätigt werden. Die Gültigkeit der Webster'schen Gleichung ist an die Voraussetzung gebunden, dass sich die Querschnittsfunktion $A(z)$ als Funktion von z nur hinreichend allmählich verändert. Offenbar ist dies bei realen Gehörgängen nicht unbedingt erfüllt.

Nicht nur die Inhomogenität der Querschnittsfunktion, sondern auch die Biegungen von Gehörgängen rufen Reflexionen hervor, die sich mit einander vermischen und in der Kombination zu entsprechenden Veränderungen der Eingangsimpedanz des Gehörgangs führen. Eine Trennung der beiden Anteile ist grundsätzlich nicht möglich. Beispielrechnungen zeigen, dass die resultierenden Verschiebungen sich sowohl verstärken, als auch kompensieren können.

Um die trommelfellbezogene Audiometrie trotzdem durchführen zu können, benötigt man Informationen über den Gehörgang, die über die Eingangsimpedanz hinausgehen. Die Lücke könnte durch eine Technik geschlossen werden, die bei der Erstellung von Schalen für Hörgeräte zunehmend eingesetzt wird: die laser-gestützte Bestimmung der Form des vorderen Gehörgangsabschnitts durch Abscannen der ohnehin benötigten Abformung. Die Transformationseigenschaften dieses wichtigen Abschnitts lassen sich direkt aus der Geometrie, also ohne Rückgriff auf akustische Messungen, durch die Anwendung numerischer Verfahren berechnen. Es ist zu erwarten, dass sich der fehlende Teil des Gehörgangs durch akustische Messungen bestimmen lässt, um die Schätzung der Drucktransformation zum Trommelfell trotz der Biegungen zu ermöglichen.

Literatur

[1] Hudde, H., Engel, A., Lodwig, A., "Methods for estimating the sound pressure at the eardrum", J. Acoust. Soc. Am. **106** (1999), 1977-1992