

Kurzfassung der Dissertation

Finite element simulation of external ear sound fields for optimization of eardrum-related measurements

Finite-Elemente-Simulation von Außenohrschallfeldern zur Optimierung trommelfellbezogener Messmethoden

Dipl.-Ing. Sebastian Schmidt
Institut für Kommunikationsakustik
Ruhr-Universität Bochum

Der menschliche Gehörgang kann grob als einseitig schallhart abgeschlossene akustische Leitung angenähert werden. Daher sind Schalldrucksignale in seinem Innern durch Resonanzspitzen und -täler geprägt. Als Bezugsgröße für audiologische und psychoakustische Messungen bietet sich der im innersten Trommelfellwinkel auftretende Schalldruck p_T an. Er weist einen bestmöglich glatten Frequenzgang auf, da sich vor dem annähernd schallharten Trommelfell bei allen Frequenzen des Hörbereichs ein Schalldruckmaximum aufbaut. Der Druck p_T hat eine wohldefinierte Position, so dass er gut reproduziert werden kann, was bei Referenzsignalen an anderen Stellen 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 in den Gehörgang einzuführen und die Resttransformation zum Trommelfell zu berechnen, da ein im Abstand gemessenes Signal erheblich von der gesuchten Größe abweichen kann. Ein „klassischer“ Ansatz besteht in der Berechnung der Gehörgangsgeometrie mittels einer Impedanzmessung, wofür gleichzeitig der Schallfluss an der Sondenposition bestimmt werden müsste. Dieses Verfahren zeigt gute Ergebnisse für inhomogene künstliche Gehörgänge mit gerader Mittelachse. Bei natürlichen, gebogenen Gehörgängen versagt die Methode jedoch häufig.

Daher wurden die räumlichen Eigenschaften des Schallfelds am Außenohr mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen untersucht. Das Modell besteht aus einer natürlichen Pinna, mehreren manuell entworfenen Gehörgängen sowie einem schwingungsfähigen Mittelohr. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Trommelfell Schallwellen außerhalb der Mittelohrresonanz in den innersten Trommelfellwinkel führt. Zudem wurde gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen p_T und Signalen, die tiefer im Mittelohr auftreten, weitgehend unabhängig von der Ausrichtung des Trommelfells ist. Der Druck p_T kann somit als Eingangssignal des Mittelohrs interpretiert werden. Innerhalb des Gehörgangs konnte eine Zone nachgewiesen werden, deren Schallfeldform nicht vom äußeren Feld abhängt, in der jedoch speziell in den Gehörgangsbiegungen deutlich irreguläre, dreidimensionale Strukturen sichtbar werden, deren Form und Position zudem frequenzabhängig ist. Diese beeinflussen zwar die Übertragungsfunktion des Gehörgangs nur wenig, führen aber bei einer Ankopplung von Messinstrumenten zu Fehlern. Durch die Simulation von Impedanzmessungen am Gehörgangseingang konnte gezeigt werden, dass oberhalb von 3-4 kHz wesentliche Fehler durch räumliche Schallfeldeffekte entstehen, die nicht mit gängigen Netzwerkmodellen korrigiert werden können. Der Entwurf eines akustischen Gehörgangsmodells aus Impedanzdaten ist also mit entsprechenden Folgefehlern behaftet.

Diese Ergebnisse zeigen, dass es sinnvoll ist, die Übertragungsfunktion zwischen einem Messpunkt am Gehörgangseingang und dem Trommelfell direkt aus dem gemessenen Schalldrucksignal zu schätzen. Dazu wird ein physikalisches Ersatzmodell an zuvor detektierte Minima des Sondendrucks angepasst. Der Aufwand ist dabei so gering, dass eine Schätzung kurz vor einem gehörbezogenen Experiment durchgeführt werden kann. Das Verfahren wurde durch weitere Finite-Elemente-Simulationen und Messungen an einem Kunstohr evaluiert.

In mehreren Hörversuchen wurde das Verfahren in der Anwendung getestet, so dass erste experimentelle Daten mit Bezug zum Trommelfellschalldruck bestimmt werden konnten und gleichzeitig eine weitere indirekte Bestätigung der Methode gewonnen wurde. Gemessen wurden frequenzabhängige Kurven gleicher Lautstärkewahrnehmung (Isophonen). Erwartungsgemäß wird der Einfluss des Gehörgangs aus den resultierenden Kurven ausgeblendet. Zudem zeigen die Messungen wesentlich weniger interindividuelle Unterschiede als Kurven, die durch den standardisierten Bezug auf den Freifeldschalldruck die Wirkung der jeweiligen Außenohrgeometrie mit einbeziehen. Damit werden die Messdaten besser vergleichbar, interpolierbar und damit aussagekräftiger.