

BOHEAR – Mittel- und Innenohrmodell

Curdes, Yvonne, Taschke, Henning und Hudde, Herbert
 Forschungsgruppe Hörakustik, Institut für Kommunikationsakustik,
 Ruhr-Universität Bochum, yvonne.curdes@rub.de

Einleitung

Bei BOHEAR (BOchum Head and EAR Model) handelt es sich um ein Finite-Elemente-Modell des menschlichen Kopfes inklusive des peripheren Hörorgans. Ziel des Modells ist die Simulation aller am Hören beteiligter Vorgänge, um so z.B. in der Lage zu sein, das Verhalten verschiedener Hörgerätetypen zu analysieren und zu optimieren. Das Gesamtmodell ist dabei modular aufgebaut, so dass Teilmodelle wie das Mittel- und Innenohrmodell je nach Aufgabenstellung auch einzeln für Berechnungen verwendet werden können und Modifizierungen einfach realisierbar sind.

Modellbildung

Die Entwicklung eines Finite-Elemente-Modells kann allgemein in zwei Schritte unterteilt werden. Der erste Schritt besteht dabei aus der Konstruktion eines für die geplanten Anwendungen hinreichend genauen Geometriemodells. Die Geometrie des Innenohrmodells wurde auf der Basis von anatomischen Schnitten erstellt. Es enthält die Basilarmembran in hoher geometrischer Genauigkeit, jedoch kein Cortiorgan, da eine realistische Modellierung der Bestandteile und Eigenschaften des Cortiorgans den Rahmen des Modells völlig sprengen würde. Das Modell der Ossikelkette ist auf der Grundlage der am Institut entwickelten ein- und dreidimensionalen Netzwerkmodelle des Mittelohres entstanden. Der Vorteil eines Netzwerkmodells liegt in der geringen Rechenzeit, da die räumlichen Schwingungen der Ossikelkette lediglich an einigen, definierten Punkten beschrieben werden. Dadurch ist es jedoch, im Gegensatz zu einem Finite-Elemente-Modell, für die Simulation allgemeiner Modifikationen im Mittelohr oder flächenhafter Anregungen nicht geeignet. Als Grundlage für ein Finite-Elemente-Modell des Mittelohres konnte ein bereits vorhandenes CAD-Modell der Ossikel verwendet werden. Die Geometriemodelle der Paukenhöhle und des Trommelfells wurden aus dem bereits vorhandenen Schädelmodell übernommen und mussten lediglich an die Geometrie der Ossikel angepasst werden. In Abbildung 1 sind die Geometriemodelle der Cochlea und des Mittelohrs (ohne Paukenhöhle) dargestellt.

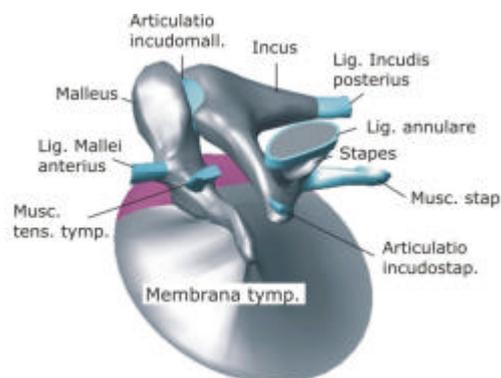
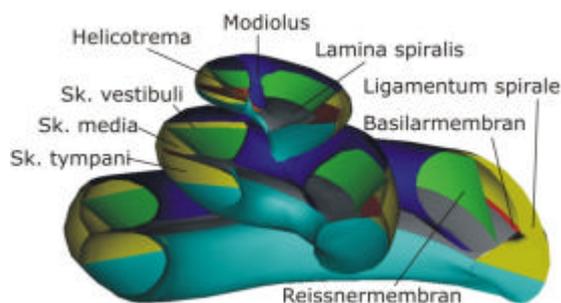


Abbildung 1: Geometriemodelle der Cochlea (Schnittbild) und des Mittelohres.

Der zweite Schritt der Modellentwicklung umfasst die Vernetzung des Modells mit geeigneten Elementtypen, die Zuweisung von Materialparametern zu den unterschiedlichen Strukturen und die Definition korrekter Randbedingungen. Die Parameter des Innenohrmodells wurden mit Literaturdaten abgestimmt. Um die Faserstruktur der Basilarmembran nachzubilden, wurden inhomogene, anisotrope Materialparameter verwendet. Die Daten des Mittelohrmodells wurden aus Literaturangaben und Messergebnissen gewonnen. Dafür mussten die aus der Messung gewonnenen, geometrieabhängigen Daten in geometriunabhängige Parameter überführt werden. Dies geschieht mit Hilfe von selbstprogrammierten Elementen in Form von dreidimensionalen Impedanzmatrizen, die für das vordere Hammerband, das hintere Incusband und die Gelenke verwendet werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde für die Berücksichtigung des Einflusses der pneumatischen Zellen in der Paukenhöhle gewählt.

Simulationsergebnisse

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse von Simulationen mit dem Mittel- bzw. Innenohrmodell dargestellt. Das

linke Diagramm zeigt Betrag und Phase der Auslenkung der Stapesfußplatte senkrecht zur Fußplattenebene für Frequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz. Das Finite-Elemente-Modell wurde mit einem Trommelfellschalldruck von 1 Pa angeregt. Als Vergleich sind die Ergebnisse von ein- und dreidimensionalen Netzwerkmodellen und von vier Messungen aufgeführt. Man kann erkennen, dass die Simulationsergebnisse des Finite-Elemente-Modells mit den Vorhersagen der Netzwerkmodelle und den Messergebnissen sehr gut übereinstimmen. Im rechten Diagramm ist die Schnelle der Knoten der Basilarmembran über dem Abstand der Knoten von der Basis der Membran für drei unterschiedliche Frequenzen bei Luftschallanregung dargestellt. Die Kurven geben das typische, frequenzselektierende Verhalten der Basilarmembran wieder. Die Schnelle steigt von der Basis bis zum Ort der Bestfrequenz stetig an und fällt anschließend steil ab.

Fazit

Die Modelle des Mittel- und Innenohres können je nach Aufgabenstellung eigenständig bzw. gekoppelt mit weiteren BOHEAR-Teilmodellen zur Untersuchung von Luft- und Knochenschallanregungen verwendet werden. Knochenschalluntersuchungen sind im Hinblick auf die Entwicklung von vollimplantierbaren Mittelohrimplantaten besonders wichtig. Mit dem Modell des umgebenden Knochens und Weichgewebes ist man in der Lage, verschiedenste Aktor- und Sensorrealisierungen zu untersuchen. Bei solchen Untersuchungen spielt aufgrund der sehr hohen Knoten- und Elementanzahl die Minimierung des Rechenaufwands eine große Rolle. Daher müssen geeignete Teilmodelle abgespalten werden, die jedoch den Einfluss der übrigen Modellbestandteile in Form von Randbedingungen enthalten müssen, um korrekte Ergebnisse zu liefern.

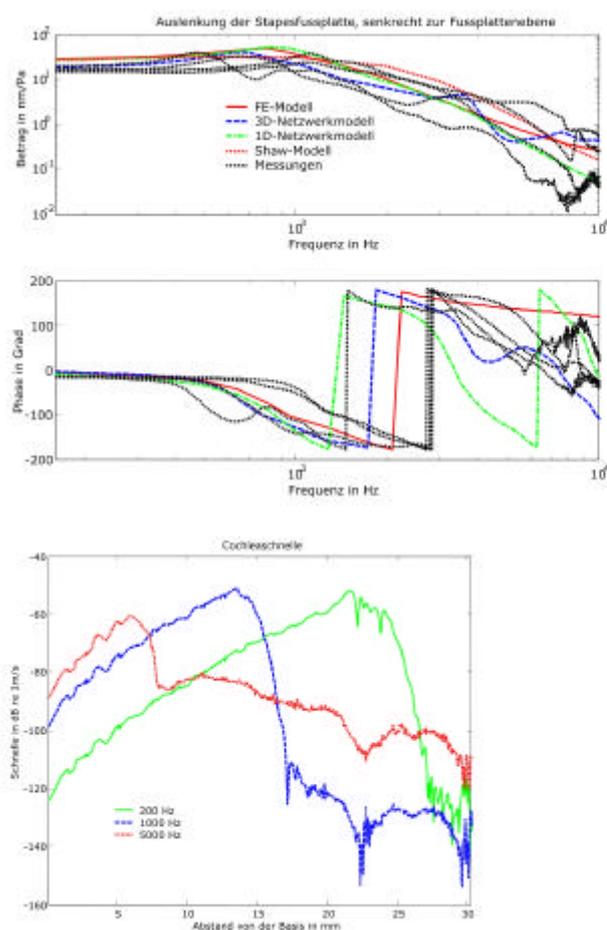


Abbildung 2: Simulationsergebnisse mit dem Mittel- und Innenohrmodell. Das linke Diagramm zeigt die Auslenkung der Stapesfußplatte bei einem Trommelfellschalldruck von 1 Pa. Neben den Ergebnissen des FE-Modells sind die Vorhersagen von Netzwerkmodellen und Messergebnissen aufgeführt. Im rechten Diagramm ist die Schnelle der Knoten der Basilarmembran in Abhängigkeit vom Abstand der Knoten von der Basis für drei Frequenzen dargestellt. Zu erkennen ist der typische Ortsfrequenz-Zusammenhang auf der Basilarmembran.