

BOHEAR - BOchum Head and EAR Model

Hudde, Herbert und Taschke, Henning

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

Hintergrund

BOHEAR ist im Kern ein Finite-Elemente-Modell, mit dem eine möglichst umfassende Simulation der akustischen und strukturdynamischen Vorgänge im peripheren Hörorgan inklusive der Knochenschalleitung angestrebt wird. Es enthält: (a) Schädelknochen und Weichgewebe, (b) das Gehirn als akustomechanisches Gebilde, (c) das Außenohr mit Pinna, Gehörgang und luftgefülltem Außenraum, (d) das Mittelohr mit Trommelfell, Ossikeln, Bändern und Muskeln und e) das Innenohr mit den drei Skalen inklusive der lymphatischen Flüssigkeiten, Basilarmembran, derzeit jedoch weder Mikromechanik noch aktive Elemente. Die mit der Entwicklung von BOHEAR verknüpften Zielsetzungen liegen in der Grundlagenforschung genauso wie in vielfältigen Anwendungen.

Mit BOHEAR sollen viele bislang unbeantwortete Fragen untersucht werden, insbesondere Fragen zur Knochenschallübertragung, die bisher gar nicht bzw. sehr widersprüchlich beantwortet wurden. Der Grund für diese unbefriedigende Situation liegt in den experimentellen Schwierigkeiten derartiger Untersuchungen. Jede Messung erfordert starke Eingriffe in das zu untersuchende System, mit der Folge, dass Randbedingungen und natürliche Übertragungswege verändert werden. Damit sind methodische Fehler kaum zu vermeiden und gemachte Voraussetzungen und Vernachlässigungen kaum zu überprüfen. Im Gegensatz dazu sind solche Untersuchungen an einem Finite-Elemente-Modell im Prinzip "fehlerfrei" möglich. Die Problematik bei einem numerischen Modell liegt dafür in der Qualität des Modells selbst. Es liefert für jede programmierbare Fragestellung Ergebnisse. Deren Richtigkeit durch direkte Messungen zu überprüfen, ist aber aus den soeben genannten Gründen kaum möglich. Es wurde daher größter Wert darauf gelegt, dass BOHEAR in geometrischer und physikalischer Hinsicht inklusive der Materialkennwerte so realistisch wie möglich ist.

Das Modell

Die Basis von BOHEAR sind Geometriemodelle, die aus verschiedenen Bilddaten (CT-Schnittbilder des Visible Human Projects der National University of Maryland, USA, und Fotografien anatomischer Schnitte, die uns von der Klinik und Poliklinik für Otorhinolaryngologie, Hals- und Gesichtschirurgie, Zürich, Schweiz, zur Verfügung gestellt wurden) entwickelt wurden. Zur Analyse der anatomischen Strukturen wurden Methoden der Bildverarbeitung eingesetzt. Die Konturen wurden durch umfangreiche "manuelle" (nicht automatisierte) Nachbearbeitung mit Programmen zum computergestützten Design (Mechanical Desktop) in Flächen- und Volumenmodelle umgearbeitet. Erst die aufwendige Entwicklung der Geometriemodelle erlaubt eine an die Strukturen ange-

passte Unterteilung der Raumbereiche in Finite Elemente. Dieser als "Vernetzung" bezeichnete Vorgang wird unter dem Finite-Elemente-Programm ANSYS weitgehend automatisch durchgeführt. Eine direkte Ableitung der Finiten Elemente aus den Bilddateien ohne den Umweg über das Geometriemodell würde zu nicht strukturangepassten Elementen und somit zu physikalisch falsch beschriebenen Modellen führen, weil die Größe der Finiten Elemente der tatsächlichen Struktur und ihren Schwingungsvorgängen entsprechen muss.

Die wichtigsten beteiligten Elementtypen sind "Fluide" (Luft im Außenraum des Kopfs, im Gehörgang und den Mittelohrhöhlen, Lymphe), "Festkörper" (Knochen und Weichgewebe) und "Schalen" (Trommelfell und Basilarmembran). Jeder Elementtyp benötigt zugehörige Materialparameter wie z. B. Massendichte, Schallgeschwindigkeit, Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, evtl. auch Anisotropieparameter. Inhomogene Strukturen werden durch die Unterteilung in hinreichend kleine Finite Elemente korrekt beschrieben. Die größte Modellgenauigkeit wurde selbstverständlich im Bereich des peripheren Hörorgans angestrebt.

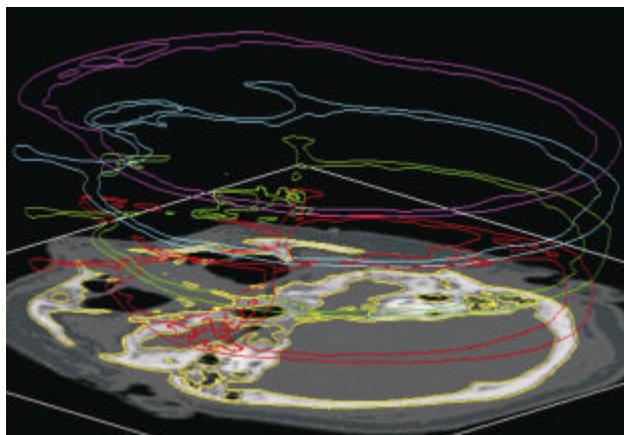


Fig. 1: CT-Schnitte werden mit Methoden der Bildverarbeitung so verändert, dass relevante Strukturen deutlicher hervor treten. Konturen der Strukturen lassen sich nicht vollständig automatisch extrahieren.

BOHEAR ist modular aufgebaut, so dass Submodelle, die enger begrenzte Bereiche beschreiben, getrennt verwendet und mit einander verkoppelt werden können. Die Submodelle können näherungsweise so angeregt werden, wie dies im kompletten Kopf der Fall wäre. Dadurch kann die Modellgenauigkeit an die gewählte Fragestellung angepasst werden. Das Finite-Elemente-Programm ANSYS erlaubt eine Vielzahl von Berechnungen. Eine Modalanalyse zeigt die Formen der Eigenschwingungen in farbkodierter Darstellung. Akustische oder mechanische

Anregungen des Kopfes und physikalische Randbedingungen werden unter ANSYS entsprechend der zu untersuchenden Fragestellung spezifiziert. Die Reaktionen des Systems können im Frequenzbereich oder im Zeitbereich berechnet werden und liegen nach Abschluss der Berechnungen an allen Knotenpunkten vor. Für umfangreichere Analysen werden die Daten nach MATLAB exportiert.

Erste Ergebnisse und Ausblick

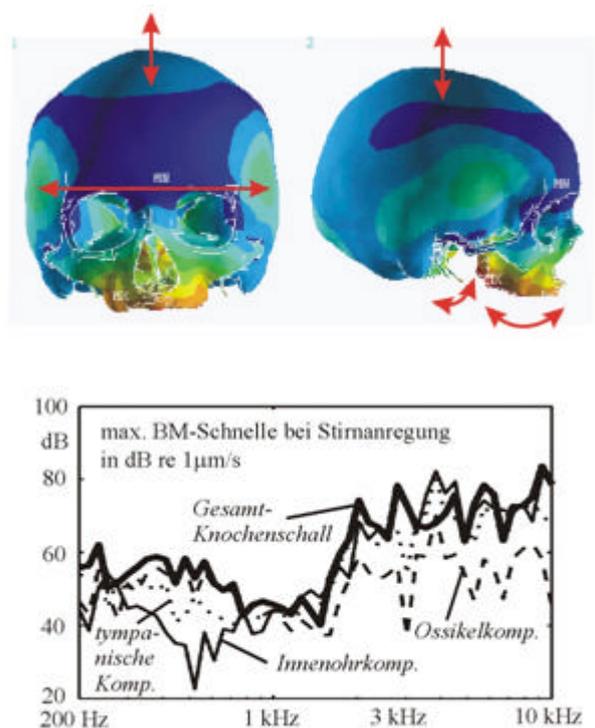


Fig. 2: Die zu der links gezeigten Grundmode des Kopfs gehörige Eigenfrequenz bei ca. 2 kHz wirkt sich bei der Knochenschallübertragung von der Stirn zu den beiden Innenohren so aus, dass die Übertragung unvermittelt ansteigt. Oberhalb der Eigenfrequenz bestimmt die Kopf-Grundmode bei Stirnanregung die Übertragung zur Cochlea.

Fig. 2 demonstriert, dass mit BOHEAR nicht nur Übertragungsfunktionen berechnet werden können, sondern auch deren Entstehung verstanden werden kann. Ferner ist es möglich, verschiedene Wirkmechanismen getrennt zu untersuchen, etwa die Wirkung knöcherner Schwingungen über das Trommelfell und den Schalldruck in der Paukenhöhle. Neben solchen Fragestellungen der Grundlagenforschung eignet sich BOHEAR zur Vorhersage des Verhaltens technischer Komponenten wie Hörhilfen aller Art. Neu ist dabei vor allem die Möglichkeit, Rückkopplungswege über Knochengewebe in die Analyse mit einzubeziehen. Dies erlaubt eine realistische Optimierung von komplexen Systemen wie z. B. Mittelohr-Vollimplantaten.