

Kurzfassung der Dissertation

A physiology-based circuit model of the human peripheral ear revealing the mechanisms of nonlinear active cochlear gain and otoacoustic emissions

Analyse der Funktionsweise des nichtlinearen aktiven cochleären Verstärkers und otoakustischer Emissionen mithilfe eines physiologiebasierten Netzwerkmodells des menschlichen Gehörs

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

Oft werden auditive Wahrnehmungsvorgänge, die im peripheren Hörorgan stattfinden, im zentralnervösen Teil des auditorischen Systems vermutet, da die Vorverarbeitung des peripheren Hörorgans nicht im vollen Umfang verstanden ist. Dabei ist die Cochlea von besonderem Interesse, da dieser mechanische Frequenzanalysator die menschliche Wahrnehmung mit seinem aktiven und nichtlinearen Verhalten beeinflusst. Es gibt bereits Modelle der Cochlea, doch sind diese entweder zu kompliziert, um Einblick in die wichtigen Prozesse zu bieten oder zu einfach, um das Verhalten korrekt zu erfassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den prinzipiellen Mechanismus cochleärer Verstärkung durch Simulation aufzudecken. Um diese grundlegenden Eigenschaften korrekt nachzubilden, wird hier ein Ansatz verfolgt, der eng an die Cochleamechanik angelehnt ist. Das hier vorgeschlagene physiologiebasierte auditorische Modell (PhyBAM) verwendet eine zusätzliche Schwingungsmode des Corti-Organs, um eine mechanische Erklärung für den cochleären Verstärker zu liefern. Diese Mode wird durch die äußeren Haarzellen angeregt, deren aktive Längenänderung zu einer zusätzlichen Rotationsbewegung des Corti-Organs führt. Dies führt schließlich zu einer Verstärkung der passiven Wanderwelle entlang der Cochlea.

Für Menschen ist die Datenlage relativ unbefriedigend. Anders als für Tiere, für die eine Vielzahl direkt gemessener mechanischer Daten existiert, gibt es für den Menschen nur wenige Daten, da sie nur invasiv gemessen werden können. Die einzigen objektiven, nicht-invasiven Messdaten für das menschliche Gehör sind otoakustische Emissionen (OAE). Diese Emissionen können im Ohrkanal gemessen werden. Sie sind entweder spontan oder evozierbar. Abhängig vom Typ der OAE geben sie Einblick in verschiedene Eigenschaften der Cochlea. Um OAE zu simulieren ist ein Modell notwendig, das bereits die wesentlichen Eigenschaften cochleärer Verstärkung korrekt wiedergibt. OAE sind also wegen ihrer Komplexität nicht zur Grundabstimmung von PhyBAM geeignet. Um dieses Problem zu lösen, werden Säugetierdaten genutzt um die grundlegenden Modelleigenschaften abzustimmen und OAE herangezogen, um PhyBAM für das menschliche Gehör zu verifizieren und feinabzustimmen.

In einer Voruntersuchung wird die Cortimode in Form des Corti-Resonators implementiert und als Filter genutzt, um die cochleäre Verstärkung zu simulieren. Dieser einfache Ansatz konnte gemessene Verläufe bekannter Tuningkurven nicht korrekt reproduzieren, jedoch zeigt er, dass ausschließlich basal vorgelagerte Verstärkung die für den Menschen bekannte Verstärkung und Verschiebung des Tuningkurvenmaximums in einem stabilen Modell nachbilden kann. Es stellt sich heraus, dass die typische Verschiebung des Tuningkurvenmaximums ein Nebenprodukt der cochleären Aktivität darstellt, durch die die Wanderwelle weitergetrieben wird. Für die Stabilität des Ansatzes zeigten sich besonders die niederfrequenten, apikalen Quellen von Bedeutung.

Die Struktur des Cortiresonators und die Art und Weise, wie Kraft in die Cochlea gespeist wird sind zur Nachbildung der typischen Tuningkurvenverläufe und der aktiven Basilarmembranimpedanz essentiell. Wie aus Messdaten vorhergesagt, weist die Impedanz einen lokal begrenzten negativen Realanteil auf. Die Verwendung eines Modells der äußeren Haarzellen ermöglicht es, die Pegelabhängigkeit menschlicher Tuningkurven korrekt nachzubilden. Die mögliche Verstärkung des nichtlinearen Modells ist begrenzt durch eingestreute Störungen und nicht wie erwartet durch die niederpegelige Systemstabilität.

Zur Feinabstimmung wurden sowohl evozierte als auch spontane OAE verwendet. Die Analyse transitorisch evozierter OAE (TEOAE) zeigt, dass dem Modell eine wichtige Komponente fehlt, um typische Laufzeiten menschlicher Daten zu erklären. Der Ansatz ist aber dazu in der Lage, menschliche Emissionspegel nachzubilden. Dafür müssen die Modell-Parameter eine gewisse Rauigkeit aufweisen. Menschliche distorsiv produzierte OAE (DPOAE) konnten korrekt reproduziert werden.

PhyBAM zeigte auch spontane OAE (SOAE), diese treten allerdings nur auf, wenn Parameter mit einer Rauigkeit belegt sind. Zur Modellierung typischer Pegel ist außerdem eine zusätzliche zweite Sättigungskennlinie nötig. Die Analyse der autonomen Schwingungen der Basilarmembran zeigt eine charakteristische Mischung aus stehenden Wellen und Wanderwellen an genau den Orten an denen die SOAE emittiert werden. Diese Beobachtung widerlegt gängige Theorien, dass entweder nur einzelne kritische Oszillatoren oder global auftretende stehende Wellen die Ursache für SOAE sind.