

# Modellierung des Einflusses der Feinstruktur der Ruhehörschwelle auf schwellennahe Wahrnehmung

Bastian Epp<sup>1</sup>, Manfred Mauermann<sup>2</sup>, Jesko L. Verhey<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AG Neuroakustik, Institut für Physik, Universität Oldenburg, Email: {Bastian.Epp, Jesko.Verhey}@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> AG Medizinische Physik, Institut für Physik, Universität Oldenburg, Email: Manfred.Mauermann@uni-oldenburg.de

## Einleitung

Wird die Ruhehörschwelle von normalhörenden Versuchspersonen mit einer großen Frequenzauflösung gemessen zeigt diese häufig quasi-periodische Schwankungen. Diese Schwankungen werden Feinstruktur der Ruhehörschwelle genannt. Nahe der Ruhehörschwelle ändert sich die Modulations-Detektionsleistung von sinusförmig amplitudenmodulierten Signalen, wenn der Träger bzw. die Seitenbänder Minima bzw. Maxima der Feinstruktur füllen [1].

In diesem Beitrag soll untersucht werden, inwieweit sich dieser Effekt schon durch die Repräsentation der Reize auf der Stufe der Cochlea erklären lassen. Hierzu wird ein eindimensionales, nichtlineares und aktives Cochleamodell verwendet mit dem die Feinstruktur der Ruhehörschwelle simuliert werden kann. Mit Hilfe dieses Modells wird untersucht, welchen Einfluss die Lage der spektralen Komponenten der Reize bezüglich der Feinstruktur auf die interne Repräsentation auf der Ebene der Cochlea hat.

## Cochleamodell

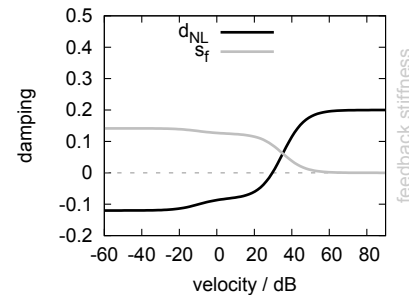
Ein eindimensionales, aktives und nichtlineares Transmissionline-Modell der Cochlea wurde verwendet [2, 3]. Die Bewegungsgleichung für das Segment  $n$  ist gegeben durch eine Differenzialgleichung zweiter Ordnung:

$$p_n = m\ddot{y}_n + d_{L_n}d_{NL}(\dot{y})\dot{y}_n + s_n[y_n + s_f(\dot{y})y_n|\tau] \quad (1)$$

Gleichung 1 beschreibt die Bewegung für einen durch den Druck  $p_n$  getriebenen Oszillator mit Masse pro Flächeneinheit  $m = 0.375 \text{ kg/m}^2$ , nichtlinearer Dämpfung  $d_n$ , linearer Steifigkeit  $s_n$  und einer geschwindigkeitsabhängigen rückgekoppelten Steifigkeit  $s_f(\dot{y})|_\tau$ . Die geschwindigkeitsabhängige Dämpfung und die rückgekoppelte Steifigkeit sind in Abbildung 1 dargestellt. Im Gegensatz zu vorherigen Modellansätzen wurde eine doppelsigmoide Form des Dämpfungsprofils verwendet. Die nichtlineare Dämpfung mit negativen Werten bei kleinen Schnellen beschreibt die Nichtlinearität und den aktiven Prozess der modellierten Cochlea. Die Zeitverzögerung  $\tau$  des jeweiligen Segments ist durch die Beziehung  $\tau = 1.742 \cdot 2\pi \cdot \sqrt{m/s_n}$  gegeben.

Um Feinstruktureffekte im Modell zu simulieren wurden normalverteilte und mittelwertfreie Fluktuationen in der Steifigkeit eingeführt (Rauigkeit):

$$\tilde{s}_n = s_n \cdot [1 + 0.01 \cdot \mathcal{N}(0, 1)] \quad (2)$$



**Abbildung 1:** Nichtlineare Dämpfung und rückgekoppelte Steifigkeit als Funktion des Schnellepegels der modellierten Membran. Die Dämpfung ist negativ für kleine Schnellen, folgt einer doppelt-sigmoide Funktion und konvergiert für große Schnellen zu einem positiven Wert. Die rückgekoppelte Steifigkeit ist maximal für kleine Schnellen und verschwindet für große Schnellen.

Diese Rauigkeit in Verbindung mit dem aktiven Prozess sind notwendige Bedingungen für die Entstehung von Feinstruktur. Die über den Druck  $p_n$  gekoppelten Bewegungsgleichungen der Segmente wurden im Zeitbereich mit Hilfe eines Finite-Differenzen-Verfahrens im Ort und mit einem Vierter-Ordnung Runge-Kutta-Verfahren in der Zeit mit einer Rate von 400 kHz gelöst.

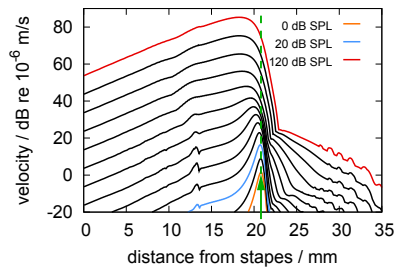
## Erregungsmuster und I/O-Funktionen

Zur Evaluation des Modells wurden pegelabhängige Erregungsmuster simuliert und daraus eine Input-Output(I/O)-Funktion abgeleitet. Die Erregungsmuster wurden aus der maximalen Schnelleamplitude der Segmente über einen Simulationsdauer von einer Sekunde mit einem 1 kHz Ton mit Pegeln von 0 bis 120 dB SPL in Schritten von 10 dB bestimmt. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die Erregungsmuster zeigen ein klar lokalisiertes Maximum für niedrige Pegel und verbreitern sich mit steigendem Anregungspegel. Die I/O-Funktion (Schnellepegel entlang der gestrichelten grünen Linie in Abbildung 2) zeigt ein nahezu lineares Wachstum für Pegel bis ca. 30 dB SPL, einen kompressiven (ca. 0,3 dB/dB) Bereich zwischen 30 dB SPL und 90 dB SPL und ein Linearisieren für Pegel über 90 dB SPL.

## Ruhehörschwelle und SOAE

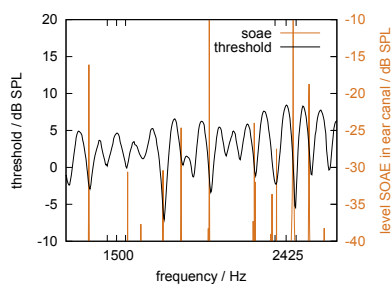
Die Ruhehörschwelle des Modells wurde durch den Anregungspegel abgeschätzt, welcher notwendig ist, um einen kritischen Maximalwert des Erregungsmusters für die je-



**Abbildung 2:** Erregungsmuster für einen 1 kHz Ton mit Pegeln von 0 bis 120 dB SPL. Aufgetragen sind die maximalen Schnellepegel über den Abstand des Segments vom Stapes bei  $x=0$  mm. Farblich markiert sind die Erregungsmuster von 0 dB SPL (orange), 60 dB SPL (blau) und 90 dB SPL (rot). Die I/O Charakteristik wurde an der charakteristischen Stelle für den 1 kHz Ton bei 0 dB SPL abgeleitet (grüne Linie).

weilige Frequenz zu erreichen. Die Simulation wurde für Frequenzen zwischen 900 Hz und 2500 Hz mit einer Frequenzauflösung von 1/300 Oktave durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt die simulierte Ruhehörschwelle



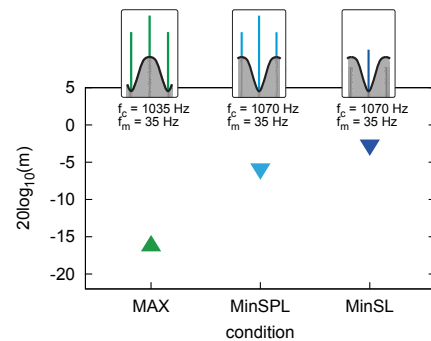
**Abbildung 3:** Ausschnitt aus der simulierten Ruhehörschwelle mit eingeführter Rauigkeit im Modell. Die simulierte Ruhehörschwelle (schwarz) zeigt quasi-periodische Schwankungen. Spontane otoakustische Emissionen (SOAE) (orange) sind das Ergebnis der Rauigkeit und des aktiven Prozesses im Modell.

(schwarz) zusammen mit den simulierten spontanen otoakustischen Emissionen (orange). Die Simulierte Ruhehörschwelle zeigt, in Übereinstimmung mit experimentellen Daten aus [1], quasiperiodische Schwankungen und spontane otoakustischen Emissionen in Bereichen von Feinstruktur Minima, also Bereichen großer Sensitivität der simulierten Cochlea [4].

## Modulationsdetektion nahe der Ruhehörschwelle

Das Modell wurde auf ein psychoakustisches Paradigma zur Modulationswahrnehmung von sinusförmig amplitudenmodulierten Tönen angewandt. Die spektralen Komponenten des Stimulus wurden dem experimentellen Paradigma aus [1] entsprechend relativ zu einem Bereich der simulierten Feinstruktur gewählt. Um die Abbildung der Modulation auf die Basilarmembran zu untersuchen, wurde die Modulationstiefe des Segments mit der maximalen Amplitude bei einer Modulationstiefe von 0 dB ausgewertet. Die Modulationstiefe des Stimulus wurde

so lange variiert bis eine Modulationstiefe des Segments von -18 dB erreicht wurde.



**Abbildung 4:** Simulierte Modulationsdetektionsschwellen für sinusförmig amplitudenmodulierte Töne. Aufgetragen ist die kleinste wahrnehmbare Modulationstiefe in dB über den drei Konditionen. Die Piktogramme über den Bildern zeigen die Anordnung der spektralen Stimuluskomponenten in der Feinstruktur.

Die Simulationsergebnisse sind zusammen mit den drei Konditionen (MAX, MinSPL, MinSL) in Abbildung 4 dargestellt. In Übereinstimmung mit Daten aus [1] ist die Abbildung der Modulationstiefe auf die Cochlea am effektivsten für die MAX-Kondition und am Geringsten in der MinSL Kondition.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ein eindimensionales, nichtlineares und aktives Modell der Cochlea wurde verwendet um eine realistische Ruhehörschwelle mit Feinstruktur und spontanen otoakustischen Emissionen zu simulieren. Experimentelle Daten aus einem psychoakustischen Modulationsdetektionsexperiment konnten durch die Analyse der Modulationstiefe der simulierten Basilarmembran simuliert werden. Ein solches realistisches Modell der Cochlea kann benutzt werden um den Einfluß der Peripherie auf weitere psychoakustische Größen abzuschätzen sowie den Einfluß von cochleärer Schwerhörigkeit zu untersuchen.

## Literatur

- [1] Heise, S. J., Mauermann, M., Verhey, J. L. "Threshold fine structure affects amplitude modulation perception." (2009). *J. Acoust. Soc. Am.* 125(1), EL33-EL38.
- [2] van Hengel, P. W. J., Duifhuis, H., and van den Raadt, M. P. M. G. "Spatial periodicity in the cochlea: the result of interaction of spontaneous emissions?" (1996). *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 3556-3571.
- [3] Epp, B., Verhey, J.L., Heise, S. J., Mauermann, M. "Modulation perception and threshold fine structure: Simulations with a nonlinear cochlea model" 2009. *Joint NAG/DAGA meeting, Rotterdam, Netherlands*
- [4] Zwicker, E., Schloth, E. "Interrelation of different otoacoustic emissions". (1994). *J. Acoust. Soc. Am.* 75(4), 1148-1154.