

# Asymmetrie in der Wahrnehmung von kurzen Chirpsignalen

Sandra Fobel (1,2), Stefan Uppenkamp (1), Roy D. Patterson (1), Birger Kollmeier (2)

(1) Centre for the Neural Basis of Hearing, Department of Physiology, University of Cambridge

(2) AG Medizinische Physik, Universität Oldenburg

## Einleitung

Räumliche Dispersion längs der Cochlea führt bei Stimulation mit Clicks zu Zeitverzögerungen zwischen hoch- und tieffrequenten Kanälen von bis zu 10 ms in den Erregungsmustern auf der Basilarmembran. Clickevozierte Hirnstammpotentiale repräsentieren daher im wesentlichen synchrone Aktivität der hochfrequenten Kanäle. Dau et al. (2000) haben gezeigt, daß die Verwendung von kurzen Chirpsignalen, deren Anstieg der Momentanfrequenz mit der Zeit so berechnet ist, daß sie die Dispersion auf der Basilarmembran gerade ausgleichen, zu einer größeren Welle V im Hirnstammpotential führt. Dies kann der erhöhten Synchronizität der neuronalen Aktivität auch in den tieffrequenten Kanälen zugeschrieben werden. Dennoch ist es so, daß ein Click wie ein Click klingt, und der kompensierende Chirp (Upchirp) scheint weniger kompakt zu klingen als der gleiche Chirp rückwärts (Downchirp) gespielt, unabhängig vom Ausgleich der Dispersion im Falle des Upchirps und Phasenverzögerungen bis zu 20 ms zwischen hoch- und tieffrequenten Kanälen bei den Downchirps. Um diese Effekte quantitativ zu untersuchen wurden eine Reihe von psychoakustischen Experimenten zur Wahrnehmung der Chirpsignale durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Rahmen eines psychoakustischen Modells diskutiert, das aus neuronalen Erregungsmustern durch Extraktion von Zeitintervallen zwischen Spikes ein 'Auditory Image' konstruiert.

## Geräuschqualität von Chirpsignalen

In einem Paarvergleichsexperiment mit einer Reihe unterschiedlich langer Chirps mit ansteigender und abfallender Momentanfrequenz wurde quantitativ untersucht, wie clickähnlich die Signale klingen. 13 Signale wurden bei drei Pegeln miteinander verglichen: 6 Upchirps mit verschiedenen Sweepraten (resultierend in verschiedene Längen von 20.04 ms bis 0.4 ms), die entsprechenden Downchirps und ein Click (80  $\mu$ s Rechtecksignal). Alle Signale hatten den gleichen RMS Wert und wurden jeweils paarweise diotisch bei 20 dB HL, 40 dB HL und 60 dB HL dargeboten. 3 dB Roving wurde verwendet um mögliche Lautheitseffekte zu minimieren. Die Frage an die fünf Versuchspersonen war: "Welches Signal klingt mehr wie ein Click?". Das Experiment zeigte, daß bei gleicher Sweeprate die Downchirps immer als clickähnlicher beurteilt wurden als die entsprechenden Upchirps. Kein Signal wurde kompakter beurteilt als der Click. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Pegeln waren klein.

## Mithörschwellen

Im nächsten Experiment wurden Mithörschwellen von Chirps in gleichmäßig verdeckendem Rauschen gemessen (2AFC-2IFC 3up-1down Verfahren). Das Testsignal war entweder ein einzelner Chirp oder eine Folge von Chirps mit Wiederholraten von 20 ms oder 100 ms. Die Chirps hatten eine Bandbreite von 100-10400 Hz und eine Länge von 10.56 ms, was im Falle der Upchirps dem 'optimierten' Chirp entspricht, der die Dispersion auf der Basilarmembran ausgleicht. Das Experiment

wurde von drei Versuchspersonen bei drei verschiedenen Pegeln durchgeführt. Die Verwendung von Upchirps und Downchirps als Testsignal führte nur beim höchsten verwendeten Pegel (58 dB HL) und den beiden niedrigsten Wiederholraten zu signifikant unterschiedlichen Schwellen. In diesen Fällen waren die Upchirps leichter zu detektieren als die Downchirps.

## Mithörschwellenperiodenmuster

Im letzten Experiment wurde ein Tonpip als Testton verwendet (zwei Perioden eines 1 kHz bzw. 4 kHz Tons mit Hanningfenster). Der Maskierer war eine Serie von kompensierenden Chirps (vorwärts und rückwärts) mit einer Bandbreite von 100-10400 Hz und einer Wiederholrate von 20 ms. Die zeitliche Position des Testsignals wurde in 2 ms Schritten von -10 ms zu +10 ms relativ zur Mitte des 10.56 ms langen Chirpmaskierers variiert. Drei Versuchspersonen nahmen an dem Experiment teil.

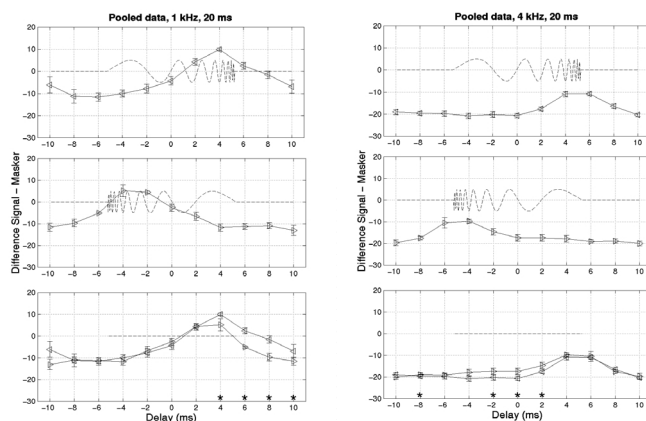


Abb. 1: Mithörschwellenperiodenmuster für einen 1 kHz (links) bzw. 4 kHz Tonzip (rechts). Oben: Upchirpmaskierer, Mitte: Downchirpmaskierer, Unten: Um Vergleiche zu ermöglichen wurden die Downchirpdaten zeitlich invertiert und zusammen mit den Upchirpdaten in den unteren Bildern dargestellt. \* kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede.

In allen Fällen trat maximale Maskierung bei einer Verzögerung von 4 ms relativ zur Chirpmitte auf. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Maskierern (s. untere Bilder) ergaben sich für die Maskierung des 1 kHz Tonzips für Verzögerungen von 4 ms bis 10 ms. Im Falle des 4 kHz Tonzips lagen die signifikanten Unterschiede im Bereich von -2 ms bis 2 ms Verzögerung. Die Muster für den 4 kHz Tonzip sind wesentlich flacher und haben niedrigere Schwellen als die für den 1 kHz Tonzip.

## Das Auditory Image Model

Das 'Auditory Image Model' (AIM, Patterson et al., 1995) simuliert Basilarmembranbewegung, die neuronale Aktivität im auditorischen Nerv und produziert daraus durch zeitliche

Integration, die aus dem sich rasch ändernden Zeitsignal Zeitintervalle extrahiert, ein 'Stabilised Auditory Image', eine Repräsentation des akustischen Signals, das die Basis für unsere Wahrnehmung darstellen soll. Die Phasenunterschiede, die durch die Dispersion auf der Basilarmembran entstehen, sind im neuronalen Aktivitätsmuster erhalten, werden aber durch den zeitlichen Integrationsmechanismus, der das 'Stabilised Auditory Image' bildet entfernt. Gleichzeitig bleibt die Feinstruktur in einzelnen Frequenzkanälen erhalten. Ein derartiger Mechanismus ist vermutlich der Grund dafür, daß ein Click wie ein 'Click' klingt, unabhängig von der räumlichen Dispersion auf der Basilarmembran.

## Diskussion

- Klangqualität von Chirpsignalen

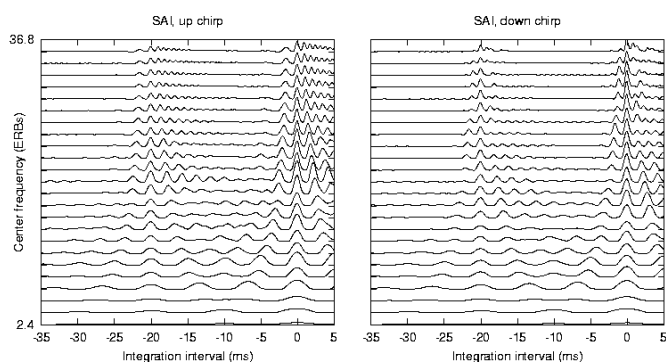


Abb. 2: Stabilised Auditory Images für Upchirps (links) und Downchirps (rechts) bei 60 dB SPL und 50 Hz Wiederholrate.

Abb. 2 zeigt Stabilised Auditory Images für Upchirps und Downchirps bei 60 dB SPL und einer Wiederholrate von 20 ms. Die Aktivität ist zeitlich kompakter für die Downchirps. Das Image für die Upchirps zeigt eine größere zeitliche Verschmierung, die auf die längeren Filterantworten in diesem Fall zurückzuführen sind.

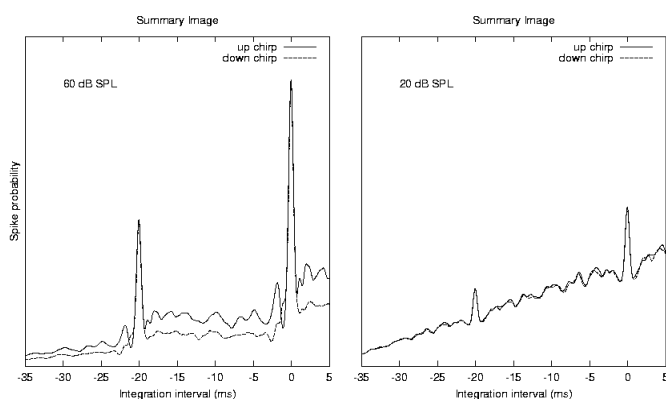


Abb. 3: Summary Auditory Images für Upchirps und Downchirps bei 60 dB SPL (links) und 20 dB SPL (rechts).

Abb. 3 zeigt die entsprechenden Summary Images für Upchirps und Downchirps bei zwei verschiedenen Pegeln. Zur Erstellung eines Summary Images wird die Aktivität aller Frequenzkanäle aufaddiert. Der Unterschied zwischen Upchirps und Downchirps wird im Modell bei kleinerem Pegel geringer. Das Paarvergleichsexperiment zeigt jedoch, daß dieser Pegel-effekt offenbar nur eine untergeordnete Rolle spielt.

- Mithörschwellen

Simulationen der Basilarmembranbewegung mit einem eindimensionalen nichtlinearen Modell der Cochlea (Giguère und Woodland, 1994) erklären die unterschiedlichen Mithörschwellen in gleichmäßig verdeckendem Rauschen. Bei 60 dB, dem höchsten im Experiment verwendeten Pegel, sind die Unterschiede in den Erregungsmustern so groß, daß sie zu signifikant unterschiedlichen Schwellen führen. Bei niedrigeren Pegeln nehmen die Unterschiede in den Erregungsmustern ab und resultieren nicht mehr in unterschiedliche Mithörschwellen. Bei hohen Wiederholraten entstehen keine signifikanten Unterschiede mehr, da sich in den tieffrequenten Kanälen die Antworten auf einzelne Chirps überlagern.

- Mithörschwellenperiodenmuster

Die Resultate dieses Experiment lassen sich ebenfalls durch Simulationen der Basilarmembranbewegung erklären. Das Maximum bei 4 ms Verzögerung relativ zur Chirpmittte entsteht durch maximale Überlagerung der Aktivitäten hervorgerufen vom Signal und vom Maskierer. Aufgrund der unterschiedlichen Phasenlage ergibt sich im Falle des Downchirp-maskierers in der Region um 1 kHz weniger Überlapp zwischen tonevozierter Aktivität und Maskiereraktivität als im Falle des Upchirps. Dies führt zu unterschiedlichen Mithörschwellen in den beiden Bedingungen.

## Schlußfolgerungen

Für die Geräuschqualität von kurzen Chirpsignalen spielt die Feinstruktur einzelner Kanäle eine wichtige Rolle, wohingegen Phasenunterschiede zwischen verschiedenen Kanälen vernachlässigt werden können. Die unterschiedlichen Erregungsmuster auf der Basilarmembran führen nur bei hohen Pegeln und niedrigen Wiederholraten zu signifikant unterschiedlichen Mithörschwellen in gleichmäßig verdeckendem Rauschen. Auch hier haben Phasenunterschiede zwischen Kanälen nur wenig Einfluß. Mithörschwellenperiodenmuster spiegeln sowohl die Feinstruktur als auch die Phasenlage entlang der Basilarmembran wider. Eine mögliche Erklärung ist ein zeitlicher Integrationsmechanismus, der Phasenunterschiede entfernt und Feinstruktur bewahrt wie er im Auditory Image Modell realisiert ist.

## Referenzen

- Dau, T., Wegner, O., Mellert, V. und Kollmeier, B. (2000). "Auditory brainstem responses (ABR) with optimized chirp signals compensating basilar membrane dispersion," J. Acoust. Soc. Am. 107, 1530-1540.
- Giguère, C. und Woodland, P.C. (1994). "A computational model of the auditory periphery for speech and hearing research. I. Ascending path," J. Acoust. Soc. Am. 95, 331-342.
- Patterson, R.D., Allerhand, M. und Giguère, C. (1995). "Time-domain modelling of peripheral auditory processing: A modular architecture and a software platform," J. Acoust. Soc. Am. 98, 1890-1894.