

# Psychoakustik spektrotemporaler Modulationen

Arne Oetjen<sup>1</sup>, Jesko Verhey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Inst. f. Physik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg, Email: arne.oetjen@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> Abt. Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 39120 Magdeburg, Email: jesko.verhey@med.ovgu.de

## Einleitung

Modulationen sind ein fundamentaler Bestandteil vieler Umweltgeräusche. Sie können als Multiplikation eines Trägersignals  $C(t, f)$  mit einem Modulator  $M(t, f)$  beschrieben werden. Sinusförmige Modulationen im Zeitbereich mit der Frequenz  $\omega_{mod}$  werden durch den Modulator

$$M(t) = 1 + A \cdot \sin(\omega_{mod} \cdot t + \varphi_\omega) \quad (1)$$

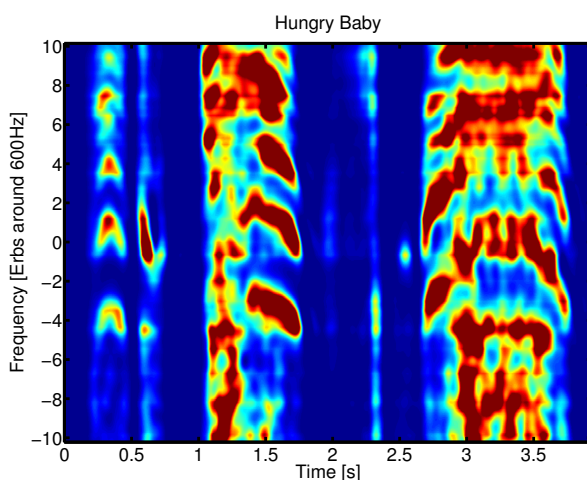
charakterisiert, Modulationen im Spektralbereich mit der Periodizität  $\Omega_{mod}$  werden durch die Gleichung

$$M(f) = 1 + A \cdot \sin(\Omega_{mod} \cdot \log_2(f/f_0) + \varphi_\Omega) \quad (2)$$

beschrieben. Spektrotemporale Modulationen werden durch eine Kombination dieser beiden Modulationsarten erzeugt:

$$M(t, f) = 1 + A \cdot \sin(\omega_{mod} \cdot t + \Omega_{mod} \cdot \log_2(f/f_0) + \Phi) \quad (3)$$

Durch diese Kombination werden je nach Vorzeichen des Produkts der Modulationsfrequenzen  $\omega_{mod}$  und  $\Omega_{mod}$  im Spektrogramm aufwärts (negatives Vorzeichen) oder abwärts (positives Vorzeichen) driftende Modulationen erzeugt. In dem in Abbildung 1 gezeigten Spektrogramm eines frühkindlicher Kommunikationsschalles sind die verschiedenen Arten der Modulation (rein zeitlich, rein spektral und spektrotemporal) deutlich zu erkennen. Diese Modulationsarten finden sich aber auch bei sprachlichen Äußerungen und vielen Kommunikationsschallen anderer Lebewesen.

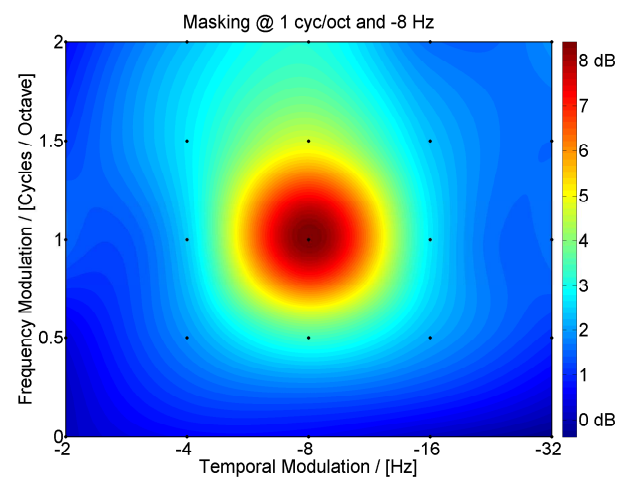


**Abbildung 1:** Einhüllendenspektrogramm der Kommunikation eines 6 Wochen alten, hungrigen Jungen. Spektrotemporale Modulationen sind an mehreren Stellen als schräge Muster zu erkennen.

Es ist daher davon auszugehen, dass die spektrotemporalen Modulationen als Informationen vom Hörsystem genutzt werden. Physiologische Studien haben bereits eine Sensitivität bestimmter kortikaler Neurone auf spektrotemporale Modulationen mit bestimmten Frequenzkombinationen gemessen [1] und in Spracherkennungsalgorithmen werden diese Modulationen als wichtiges Feature mit Gabor-Filtern extrahiert. Das Ziel dieser Studie ist es, mit psychoakustischen Methoden zu untersuchen, ob eine Sensitivität für spektrotemporale Modulation im Menschen vorliegt.

## Spektrotemporale Modulationsfilter

Bisherige Studien fanden durch psychoakustische Maskierungsexperimente Bandpasscharakteristika sowohl für die Wahrnehmung zeitlicher Modulationen [2] als auch für spektrale Modulationen [3]. Analog zu diesen Studien wurde für eine spektrotemporale Modulation mit den Modulationsfrequenzen -8 Hz und 1 cycle/octave mit schmalbandigen Maskierungsmodulationen ein Maskierungsmuster bestimmt (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Maskierungsmuster einer spektrotemporalen Modulation (-8 Hz und 1 cycle/octave). Das Muster ergibt sich aus den Modulationstiefen der Zielmodulation an der Detektionsschwellen für 25 verschiedene Kombinationen von Maskiererfrequenzen (schwarze Punkte). Die Zwischenräume wurden kubisch interpoliert.

An dem Experiment nahmen 8 normalhörende Probanden teil, die Detektionsschwellen der Zielmodulation wurden mit einem adaptiven forced-choice Verfahren mit 3 Intervallen und „1up-2down“ Regel bestimmt. Die schmalbandigen Maskierungsmodulationen wurden durch Addition von 5 sinusförmigen Modulationen realisiert. Das Maskierungsmuster ergibt sich aus der Mes-

sung der Modulationstiefe der Zielmodulation an der Detektionsschwelle bei 25 verschiedenen Frequenzkombinationen der Maskierungsmodulation. Die Maskierung ergibt sich aus der Differenz der Modulationstiefen an den individuellen Detektionsschwellen in An- und Abwesenheit einer Maskierungsmodulation.

Die Maskierungswerte zeigen deutliche Filtercharakteristika sowohl im zeitlichen als auch im spektralen Modulationsbereich. Das Maskierungsmuster kann als Kombination zweier Bandpassfilter (rein spektral und rein zeitlich) dargestellt werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Wahrnehmung spektrottemporaler Modulationen nicht unabhängig geschieht, sondern aus der Kombination zeitlicher und spektraler Modulationsfilter entsteht.

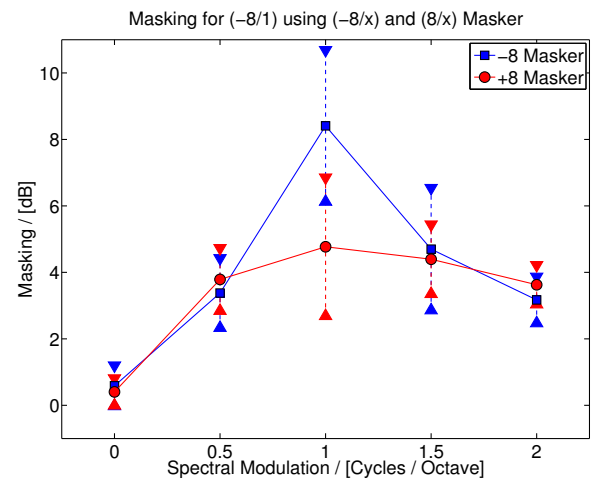
Die aus der Hauptkomponentenanalyse der Messdaten berechneten Separabilitätsindizes sind vergleichbar mit in physiologischen Experimenten berechneten Indizes, die ebenfalls die Separierbarkeit einzelner spektrottemporaler Aufnahmefelder in eine zeitliche und eine spektrale Komponente gezeigt haben [4]. Die Existenz unabhängiger spektrottemporaler Modulationsfilter kann durch die experimentellen Daten weder bestätigt noch widerlegt werden. Mit Hilfe eines weiteren Experiments wird dies im folgenden Kapitel näher untersucht.

## Maskierung mit entgegengesetzt orientierten Modulationen

Zusätzlich zu den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Daten wurden im selben Experiment für die aufwärts driftende Zielmodulation mit -8 Hz und 1 cycle/octave zusätzlich noch die maskierten Detektionsschwellen für 5 entgegengesetzt orientierte, also abwärts driftende Maskierungsmodulationen mit einer Frequenz von 8 Hz gemessen. Die Ergebnisse in Abbildung 3 zeigen eine Reduktion der Maskierung für die Maskierungsmodulation bei 8 Hz und 1 cycle/octave, jedoch keine Veränderung der Maskierung im Vergleich zu den aufwärts driftenden Modulationen für die 4 anderen Modulationsfrequenzen.

Diese Beobachtung kann weder durch separate zeitliche und spektrale Modulationsfilter noch durch spektrottemporale Gabor Filter erklärt werden. Trennt man im Modell die zeitliche und die spektrale Modulationswahrnehmung ist der Maskierungseffekt für aufwärts und abwärts driftende Modulationen der gleiche, also unabhängig von der Orientierung. Für das Modell eines Gabor Filters wäre für abwärts driftende Modulationen kein Maskierungseffekt zu beobachten, da der Filter selbst eine spektrottemporale Orientierung besitzt.

Die gemessenen psychoakustischen Daten deuten darauf hin, dass sich ein Teil der Wahrnehmung in zeitliche und spektrale Modulationsfilter trennen lässt. Für Modulationen nahe am Betrag der Zielmodulation ist jedoch eine starke Richtungsabhängigkeit, also ein spektrottemporaler Modulationsfilter, zusätzlich vorhanden. Diese Vermutung wird auch von physiologischen Studien unterstützt, in denen ebenfalls teilweise separierbare spektrottemporale Aufnahmefelder im Kortex beobachtet wurden [5].



**Abbildung 3:** Maskierung mit im Vergleich zum Zielsignal (-8 Hz und 1 cycle/octave) gleich orientierten (-8 Hz, blau) und entgegengesetzt orientierten (8 Hz, rot) Modulationen. Über die Versuchspersonen gemittelten Maskierungen und die interindividuellen Standardabweichungen werden gezeigt.

## Zusammenfassung

Die Hypothese spektrottemporaler Modulationsfilter wurde in psychoakustischen Experimenten bestätigt, das Konzept der Frequenzselektivität gilt auch für spektrottemporale Modulationen.

Die gemessenen Maskierungsmuster können nur teilweise durch kombinierte zeitliche und spektrale Modulationsfilter erklärt werden. Auch aus der Spracherkennung bekannte Gabor-Filter bieten keine hinreichende Erklärung der gemessenen Maskierungen.

Die Wahrnehmung spektrottemporaler Modulationen scheint aus einer spektrottemporalen, d.h. einer richtungsabhängigen, und 2 richtungsunabhängigen, einer zeitlichen und einer spektralen, Komponente gebildet zu werden.

## Literatur

- [1] deCharms, R. C., Blake, D. T. und Merzenich, M. M.: Optimizing Sound Features for Cortical Neurons, *Science* 280 (1998), 1439-1443
- [2] Ewert, S. D. und Dau, T.: Characterizing frequency selectivity for envelope fluctuations. *J. Acoust. Soc. Am.* 108 (2000), 1181-1196
- [3] Saoji, A. A. und Eddins, D. A.: Spectral modulation masking patterns reveal tuning to spectral envelope frequency. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (2007), 1004-1013
- [4] Kowalski, N., Depireux, D. A. and Shamma, S. A.: Analysis of Dynamic Spectra in Ferret Primary auditory Cortex: I. *J. Neurophysiology* 76 (1996), 3503-3523
- [5] Miller, L. M., Escabi, M. A., Read, H. L. und Schreiner, C. E.: Spectrottemporal Receptive Fields in the Lemniscal Auditory Thalamus and Cortex. *J. Neurophysiology* 87 (2002), 516-527