

Modulationsverarbeitung im Gehör: Autokorrelation versus Filterbank

JESKO L. VERHEY*, STEPHAN EWERT*, TORSTEN DAU**

Arbeitsgruppe Medizinische Physik, Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg,
Hearing Research Center, Dept. of Biomedical Engineering, Boston University,
E-mail:jesko@medi.physik.uni-oldenburg.de

I. Einleitung

Physiologische und psychoakustische Experimente haben gezeigt, daß es neben der bekannten Frequenzselektivität des Gehörs auch eine Modulationsfrequenzselektivität gibt (z.B. Langner, 1992, Biebel et al., 2000, Houtgast, 1989). Während die prinzipielle Idee der modulationsfrequenzselektiven Abbildung abgesichert ist, sind die zugrundeliegenden (neuronalen) Mechanismen noch unklar. Wird die beobachtete Selektivität neuronal durch eine rein zeitliche Analyse – z.B. auf Basis einer Autokorrelation und Koinzidenz-Detektion (z.B. Langner, 1992) – erreicht, oder findet eine rein spektrale Modulationsfrequenz-Orts-Transformation statt, bei der Modulationskomponenten in verschiedenen Modulationsfrequenzbändern unabhängig voneinander verarbeitet werden (Dau et al., 1999)? Im vorliegenden Beitrag werden psychoakustische Modulationsmaskierungsexperimente vorgestellt und diskutiert, die kritisch zwischen den bestehenden Modellvorstellungen zur Modulationsverarbeitung unterscheiden können. Die zugrundeliegende Idee hierbei ist es, Modulationsmaskierer zu verwenden, die in ihrem zeitlichen Verlauf Ähnlichkeit zur sinusförmigen Testmodulation aufweisen, diese aber spektral nicht enthalten.

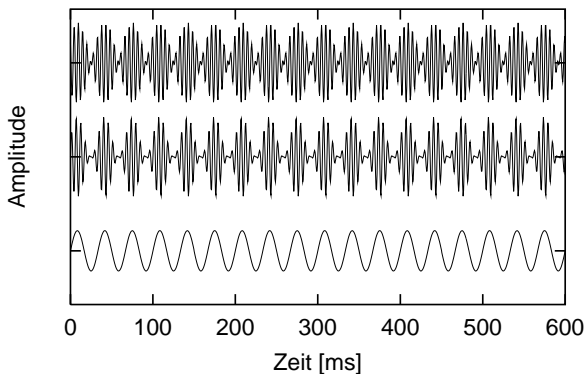


Abb. 1: Oben: Störmodulator in Experiment 1 (Zweitonkomplex 180, 210 Hz). Mitte: Störmodulator in Experiment 2 (180 Hz, mit 30 Hz moduliert). Unten: 30 Hz Testsignal mit einer Phase von 0° .

II. Stimuli und Meßmethode

Die Versuchsperson hatte die Aufgabe, eine sinusförmige Amplitudenmodulation $m_t = a_t \sin(\omega_t t + \phi_t)$ mit $\omega_t = 30$ Hz in Anwesenheit einer Störmodulation zu detektieren. Als Störmodulation $m_m(t)$ wurden in Experiment 1 $m_m(t) = 0, 3 \sin(\omega(t + t_0)) + 0, 3 \sin((\omega + \Delta\omega)(t + t_0))$ mit $\omega = 90, 97$ oder 180 Hz, mit $\Delta\omega = 30$ Hz und einer Zeitverzögerung $t_0 = 3\pi/(2(\Delta\omega))$ verwendet. Im Experiment 2 war der Maskierer ein modulierter Sinus $m_m(t) = a_m \sin(\omega t)(1 + \sin(\Delta\omega t))$ mit $\omega = 180$ Hz, $\Delta\omega = 30$ Hz und der Amplitude a_m , die zwischen $0,05$ und $0,3$ gewählt wurde. Die Störmodulationen zeichnen sich durch eine langsame Amplitudenänderung mit einer Frequenz von 30 Hz aus (siehe Abb. 1). Diese Frequenz ist jedoch im Modulationsspektrum nicht enthalten. Test- und Störmodulation wurden auf

einen 5 kHz Sinusträger $c(t)$ über die gesamte Signaldauer von 600 ms aufgeprägt: $s(t) = c(t)(1 + m_m(t) + m_t(t))$. Die Signale wurden mit 20 -ms Hanningflanken ein- und ausgeschaltet. Der Signalpegel war 70 dB SPL. Der Testmodulationsgrad a_t an der Schwelle wurde mit einem adaptiven 3-Intervall 1-up 2-down Verfahren bestimmt. Die Schrittweite betrug zu Anfang des Experimentes 4 dB und wurde bei den ersten beiden positiven Umkehrpunkten halbiert. Die minimale Schrittweite betrug somit 1 dB (Beginn der Messphase). Als Schwelle einer Einzelmessung wurde der Zentralwert der nächsten 8 Umkehrpunkte in der Messphase bestimmt. Die individuelle Schwelle wurde als der arithmetische Mittelwert aus 3 Einzelmessungen berechnet. An den Messungen nahmen 3 normalhörende Versuchspersonen im Alter von 25 bis 31 Jahren teil, von denen einer der Autor JV war. Die Signale wurden über Kopfhörer (Sennheiser HDA 200) in einer doppelwandigen Hörkabine dargeboten.

III. Meßergebnisse

Experiment 1: Modulationsmaskierung mit Zweitonkomplex

Abbildung 2 zeigt die über drei Versuchspersonen gemittelte Modulationsdetektionsschwelle als Funktion der Testmodulationsphase für drei Maskiermodulationszweitonkomplexe (\diamond : $90, 120$ Hz, \triangle : $97, 127$ Hz und \circ : $180, 210$ Hz). Für alle Modulationsmaskierer zeigt sich eine minimale Schwelle bei der Testmodulationsphase 0° und eine maximale Schwelle bei 180° , unabhängig vom spektralen Abstand der beiden Maskiererkomponenten.

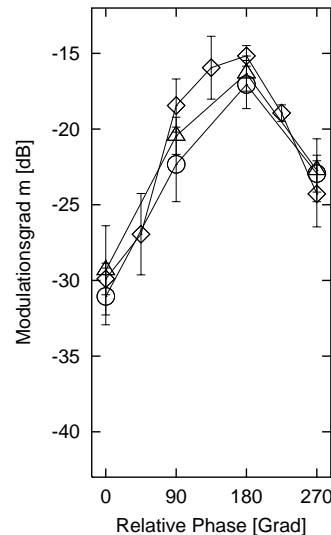


Abb. 2: Über 3 Versuchspersonen gemittelte Modulationsdetektionsschwelle für eine 30 Hz Testmodulation in Anwesenheit eines Maskiermodulationszweitonkomplexes mit den Frequenzen $90, 120$ Hz (\diamond), $97, 127$ Hz (\triangle) und $180, 210$ Hz (\circ).

Experiment 2: Modulationsmaskierung mit moduliertem Maskierer

Abbildung 3 zeigt die Phasenabhängigkeit der 30 Hz Schwelle für die 30 Hz Testmodulation in Anwesenheit des mit 30 Hz modulierten 180 Störmodulator. Der Schwellenverlauf in Abhängigkeit der Phase ist in quantitativer Übereinstimmung mit den Meßergebnissen in Experiment 1 (vergleiche

Abb. 2 und Abb. 3 links). Die Differenz zwischen der minimalen Schwelle (bei 0° , \square) und maximalen Schwelle (bei 180° , \triangle) nimmt mit abnehmender Maskiereramplitude ab (Abb. 3, rechts). Bei einer Maskiermodulationsamplitude von $0,05$ (≈ -26 dB) unterscheiden sich die Schwellen für beide Testmodulationsphasen nicht mehr von der Modulationsdetektionsschwelle ohne Maskierer (-27 dB).

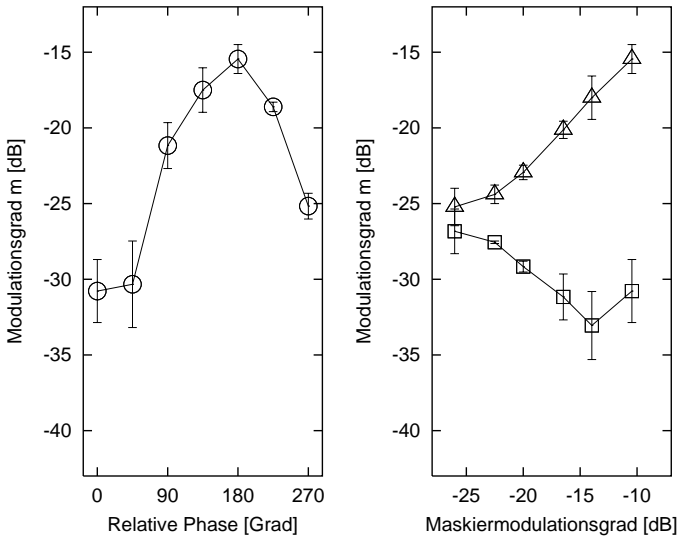


Abb. 3: Über 3 Versuchspersonen gemittelte Modulationsdetektionsschwelle für eine 30 Hz Testmodulation in Anwesenheit einer mit 30 Hz modulierten 180 Hz Maskiermodulation. Links: Schwelle als Funktion der Phase der Testmodulation bei fester Maskiermodulationsamplitude $a_m = 0,3$. Rechts: Schwelle als Funktion der Maskiermodulationsamplitude a_m für eine Testmodulationsphase von 0° (\square) und 180° (\triangle).

IV. Diskussion

Eine Betrachtung des Maskiermodulationsspektrums im Modulationsfilter an der Testmodulationsfrequenz – so wie von Dau et al. (1999) vorgeschlagen – kann keine Maskierwirkung simulieren, da keine Maskierkomponente an der Testmodulationsfrequenz im Modulationsspektrum enthalten ist. Außerdem kann die Phasenabhängigkeit nicht beschrieben werden, da bei dieser Betrachtung relative Phasenlagen zwischen Test- und Maskierermodulation nicht berücksichtigt werden. Eine direkte Wechselwirkung der Maskiererkomponenten mit der Testmodulation im Modulationsfilter an der Testmodulationsfrequenz ist zudem unwahrscheinlich, da dann entgegen den Daten in Experiment 1 eine abnehmende Maskierwirkung mit zunehmendem modulationspektrenalen Abstand zwischen Maskierer und Testmodulation zu erwarten wäre. Ein zeitlicher Mechanismus, der als wesentliche Komponente eine Zeitverzögerung beinhaltet (vgl. Langner, 1992), realisiert einen Kammfilter. Dieser Mechanismus würde eine Wechselwirkung zwischen Maskiererkomponenten, die ein ganzzahliges Vielfaches der Testmodulationsfrequenz sind, vorhersagen. Gegen diesen Mechanismus spricht, daß sich die Schwellenverläufe von dem gegenüber einem ganzzahligen Verhältnis um 7 Hz verschobenen Zweitonkomplex 97, 127 Hz nicht von den Schwellen für den “harmonischen” Zweitonkomplex 90, 120 Hz unterscheiden. Die Ergebnisse sprechen hingegen für eine explizite Extraktion der langsamen Einhüllendenschwankungen z.B. durch eine weitere Einhüllendenbildung. Auf Basis dieser Überlegung wurde ein Modell entwickelt, das aus folgenden Stufen besteht: 1.) Gammatonfilter ($f_c = 5000$

Hz), 2.) Hilberteneinhüllendenbildung 3.) Mittelwertbefreiung dieser Hilberteneinhüllenden und nochmalige Einhüllendenextraktion 4.) Addition der Einhüllenden des Signal und der um den Faktor $1/3$ abgeschwächten in 3.) erhaltenen langsamen Einhüllendenschwankungen, 5.) Modulationsfilter ($f_c = 30$ Hz), und schliesslich 6.) Addition eines konstanten internen Rauschens. Als Entscheidungsvariable wurde die Wurzel der mittleren quadratischen Amplitude verwendet (RMS). Das interne Rauschen wurde so gewählt, daß die Modulationsdetektionsschwelle ohne Maskierer im Rahmen dieses Modells richtig wiedergegeben wurde. Die Modellvorhersagen wurden durch explizite Simulation der IFC-Verfahrens erhalten. Das Signal galt als erkannt, wenn der RMS-Wert des Signalintervalls größer als das Maximum der Nichtsignalintervall-RMS-Werte ist. Der Mittelwert aus 10 Einzelsimulationen für das zweite Experimentes sind in Abb. 4 dargestellt.

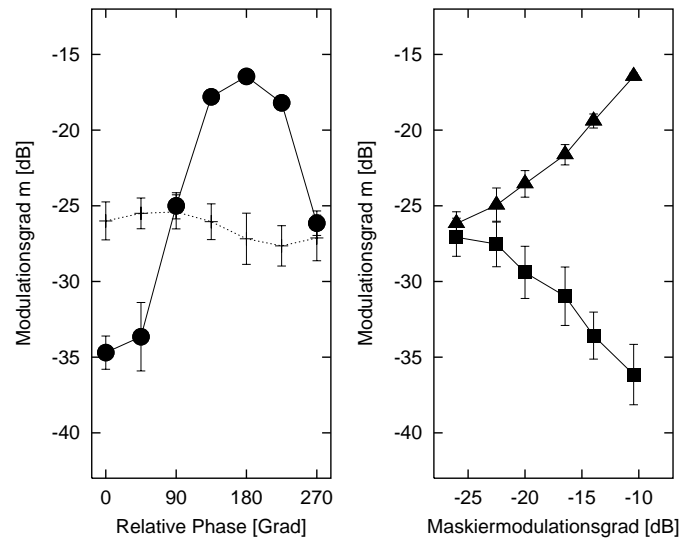


Abb. 4: Modellvorhersagen für die Schwellen in Abb. 3. Näheres siehe Text.

Die gestrichelte Linie zeigt die Simulationsergebnisse für ein Modell ohne Extraktion der langsamen Einhüllendenschwankungen (d.h. ohne Stufe 3 und 4). Dieses Modell ist nicht in der Lage, die Phasenabhängigkeit zu simulieren. Das komplette Modell zeigt hingegen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Schwellen (Symbole wie in Abb. 3).

V. Zusammenfassung

Die Modulationswahrnehmung kann durch modulationspektrenal weit entfernte Maskierer beeinflusst werden, sofern dieser eine zur Testmodulation ähnliche Zeitstruktur aufweist. Die Modulationswahrnehmung kann somit nicht durch eine rein spektrale Analyse der linear extrahierten Einhüllenden beschrieben werden. Ein im Zeitbereich arbeitender Mechanismus, der langsamen Änderungen der Modulation vor der Modulationsfilterung extrahiert, kann den gemessenen Effekt beschreiben.

Literatur

- Dau, T., Verhey, J.L. und Kohlrausch, A., (1999), J. Acoust. Soc. Am. 106, 2752-2760.
Houtgast, T., J. Acoust. Soc. Am. 85, 1676-1680
Langner, G., (1992), Her. Res. 60, 115-142.
Biebel, U., Langner, G. und Verhey, J.L., (2000), DAGA 2000.