

## Verdeckungsmuster mit kurzen Signalen

Björn Lübken<sup>1</sup>, Ifat Yasin<sup>2</sup>, G. Bruce Henning<sup>3</sup> und Jesko L. Verhey<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke Universität, D-39120 Magdeburg

<sup>2</sup> UCL Ear Institute, 332 Grays Inn Road, London WC1X 8EE, United Kingdom

<sup>3</sup> UCL Institute of Ophthalmology, 11-43 Bath Street, London EC1V 9EL, United Kingdom

<sup>4</sup> Email: jesko.verhey@med.ovgu.de

### Einleitung

Eine fundamentale Eigenschaft des Gehörs ist die Frequenz-Ortstransformation auf der Ebene der Hörschnecke (Cochlea). Das bedeutet, dass einer Frequenz eine Stelle entlang der Cochlea zugeordnet werden kann. Da jedoch die Abstimmkurve jeder Stelle nicht unendlich steil ist werden auch benachbarte Stellen angeregt. Physiologisch entstehen so Erregungsmuster, bei denen die Erregung als Funktion des Orts in der Cochlea aufgetragen wird. Für Sinustöne habe diese definitionsgemäß ihr Maximum am Ort der auf die Frequenz abgestimmt wird und fallen zu beiden Seiten hin mit zunehmendem Abstand zu diesem Maximum hin ab.

Die Hörakustik erlaubt einen solchen direkten Zugang zur Abbildung in der Cochlea naturgemäß nicht, da hier immer das gesamte Hörsystem gemessen wird. Jedoch wird im Allgemeinen angenommen, dass psychoakustische Verdeckungsmuster (z.B. Fletcher und Munson, 1937 [1], Moore und Koautoren, 1998 [2]) durch die cochleären Erregungsmuster bestimmt werden. Mit diesen Ansatz wäre es also möglich indirekt die cochleäre Erregung in vivo auch im Menschen zu messen.

In solchen Verdeckungsmusterexperimenten werden üblicherweise die Schwelle eines tonalen Signals in Anwesenheit eines schmalbandigen Rauschverdeckers als Funktion der Signalfrequenz gemessen. Die vereinfachende klassische Interpretation ist, dass die Schwelle die Intensität der Erregung an der auf die Signalfrequenz abgestimmte Stelle im Innenohr angibt. Allerdings wurde in der Literatur auch argumentiert, dass bei spektraler Trennung von Signal und Verdecker zusätzlich zur Energie auch andere Stimulusmerkmale genutzt werden könnten (z.B. [2]).

Ein wichtiges Stimulusmerkmal, das durch eine rein energetische Betrachtung nicht berücksichtigt wird, sind zeitliche Pegelschwankungen durch die Schwebung zwischen Verdecker und Signal. Viele psychoakustische Experimente mit zeitlich modulierten Schallen haben gezeigt, dass das Gehör sensitiv für solche Pegelschwankungen ist (z.B., Dau et al., 1999 [3]). Daher liegt es nahe, dass zur Signalerkennung dieses Merkmal genutzt wird. Derleth und Dau (2000, [4]) haben gezeigt, dass eine zusätzliche Analyse der Pegelschwankungen mit Hilfe einer Modulationsfilterbank zu einer deutlich besseren Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Verdeckungsmustern führt als das mit einem rein energetischen Ansatz möglich ist.

Wird dem Signal ein interauraler Unterschied aufgeprägt (d.h., ein dichotisches Signal) so führt das zu einem

wesentlich breiteren Verdeckungsmuster als für eine Kondition, in denen die Stimuli nur monaural oder auf beiden Seiten gleich (diotisch) dargeboten wird (Zwicker und Henning, 1984 [5]). Eine mögliche Interpretation ist, dass beim Vergleich der beiden Ohrsignale die Frequenzselektivität reduziert ist. Auf eine solche geringere Frequenzselektivität deuten andere Verdeckungsexperimente hin (z.B. Hall et al., 1983 [6], Nitschmann und Verhey, 2013 [7]). Ein alternativer Ansatz zur Erklärung der breiteren beidohrigen (d.h. binauralen) Verdeckungsmuster ist, dass bei der binauralen Verarbeitung die Pegelschwankungen als zusätzliches Stimulusmerkmal nicht genutzt werden kann (z.B., Buss and Hall, 2010 [8]). Nitschmann und Verhey (2012, [9]) konnten mit einem effektiven Modell der Verarbeitung im Gehör wesentliche Aspekte diotischer und dichotischer Verdeckungsmuster nachbilden. Bei der Modellierung wurde angenommen, dass bei der monauralen Verarbeitung eine Modulationsfilterbankanalyse nach Dau und Koautoren (1997, [10]) verwendet wird, während bei der binauralen Verarbeitung nach Subtraktion der beiden Ohrsignale im wesentlichen lediglich Energiemerkmale analysiert werden.

Der vorliegende Beitrag untersucht den Einfluss von Pegelschwankungsmerkmalen auf diotische und dichotische Verdeckungsmuster experimentell. Der Ansatz ist hierbei, die Signaldauer so zu verkürzen, dass dieses Merkmal auch diotisch nicht mehr genutzt werden kann. Neben der Erhebung der experimentellen Daten wurden die Experimente mit dem gleichen Ansatz simuliert, wie er schon in Nitschmann und Verhey (2012, [9]) genutzt wurde.

### Methode

Der Verdecker war ein 10-Hz breites Gaußsches Bandpassrauschen. Seine Mittenfrequenz lag bei 250 Hz, sein Schalldruckpegel war 67 dB SPL. Der Verdecker wurde immer diotisch dargeboten.

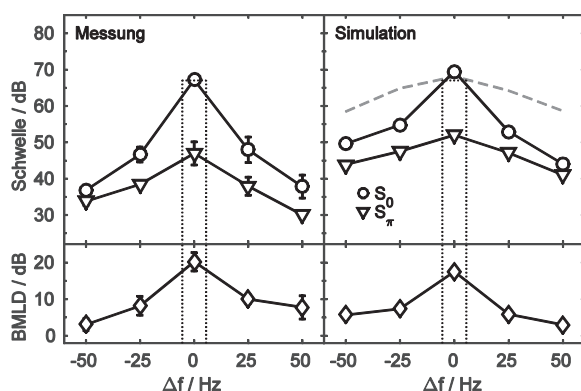
Das zu erkennende Zielsignal war ein Sinuston, der entweder diotisch oder dichotisch dargeboten wurde. Beim dichotischen Ton wurde der Ton auf dem einen Ohr antiphasisch zum Ton auf dem anderen Ohr dargeboten, d.h. die relative Phase zwischen rechtem und linkem Ohr war  $\pi$ . Die Tonfrequenz war 200, 225, 250, 275 oder 300 Hz. Das heißt, die spektralen Abstände zwischen dem Signal zur Mittenfrequenz der Verdeckers waren -50, -25, 0, 25 und 50 Hz. Es wurden zwei Signaldauern verwendet: 600 ms und 12 ms. Verdecker und das Zielsignal wurden gleichzeitig ein und ausgeschaltet.

Die Mithörschwellen wurden mit einem 3-Intervall Zwangwahlverfahren (3AFC) durchgeführt. Die Stimulusintervalle einer Folge von 3 Intervallen (Trial) wurden durch 600-ms Pausen voneinander getrennt. Jedes Stimulusintervalle enthielt den Verdeckter. Ein zufällig gewähltes Intervall des Trials enthielt zusätzlich das Zielsignal. Der Pegel des Zielsignals wurde adaptiv geregelt. Hierbei führten zwei richtige Antworten in Folge zu einer Erniedrigung des Zielsignalpegels, jede falsche Antwort jedoch zu einer Pegelerhöhung (2down 1up Verfahren). An der Messung nahmen vier normalhörende Versuchspersonen im Alter von 25 bis 34 Jahren teil.

## Ergebnisse und Diskussion

Das linke obere Teilbild der Abbildung 1 zeigt die über die Versuchspersonen gemittelten Mithörschwellen für das diotisch dargebotene Signal (Kreise) sowie für das dichotische Signal (Dreiecke). Die Signaldauer betrug 600 ms.

Das untere linke Teilbild zeigt die Differenz der Schwellen, d.h. den Gewinn durch binaurale (dichotische) Darbietung, der im englischen Sprachraum als „Binaural masking level difference“ bekannt ist und im Folgenden mit BMLD abgekürzt wird. Die Fehlerbalken wurden nur gezeigt, wenn der Standardfehler größer als die Symbolgröße war. Der mit einer gestrichelten Linie umrahmte Bereich kennzeichnet das verdeckende Bandpassrauschen in seiner spektralen Ausdehnung sowie seinen Pegels. Für beide Signale (diotisch und dichotisch) ist die Schwelle für ein spektral zentriertes Signal am höchsten. Der binaurale Gewinn (BMLD) liegt bei etwa 20 dB. Die Schwellen nehmen zu beiden Richtungen hin mit zunehmendem Abstand ab. Der Abfall der Schwellen ist für das diotische Signal größer als für das dichotische, was zu einer Abnahme der BMLD mit größerem spektralem Abstand Zielsignal – Verdeckter führt.



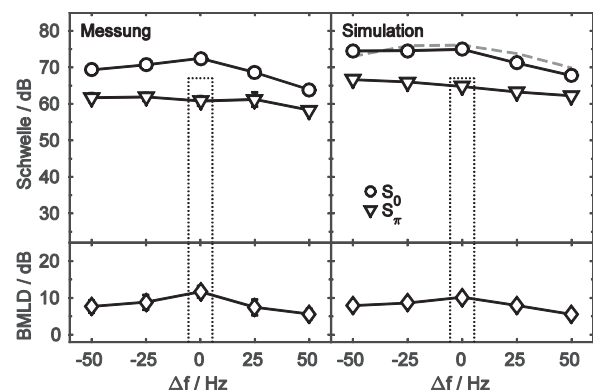
**Abbildung 1:** Mithörschwellen (obere Teilbilder) für das diotische (Kreise) und das dichotische Signal (Dreiecke) sowie deren Differenz (untere Teilbilder). Links sind die über die Versuchspersonen gemittelten experimentellen Daten gezeigt, rechts die Modellvorhersagen. Die grau gestrichelte Linie kennzeichnet Vorhersagen mit einem Modell, das für die diotischen Signale nur das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in auditorischen Filtern betrachtet. Die Signaldauer betrug 600 ms.

Die rechten Teilbilder zeigen Simulationen mit einem Modell wie es bereits in Nitschmann und Verhey (2012, [9]) Anwendung fand. Die Symbole sind die gleichen, die schon für Darstellung der experimentellen Ergebnisse in den linken Teilbildern verwendet wurden. Zusätzlich kennzeichnet die gebogene grau gestrichelte Linie die Vorhersage der diotischen Daten, die sich bei einer alleinigen Betrachtung der Energieverhältnisse von Zielsignal und Verdeckter in den auditorischen Filtern ergibt.

Die mit dem kompletten Modell (inklusive Modulationsfilterbank) simulierten Schwellen für das diotische Signal liegen für alle Signale außerhalb des Spektralbereichs des Verdeckers (dünn gestrichelte schwarze Linie) deutlich unter denen der Vorhersage auf Basis des Signal-Rauschverhältnisses. Das bedeutet, das komplette Modell nutzt die Pegelschwankungen als zusätzliches Erkennungsmerkmal.

Da eine Modulationsanalyse bei der binauralen Verarbeitung nicht vorgenommen wird ähneln die Vorhersagen in der Form denen des diotischen Modells auf Basis des Signal-Rauschverhältnisses (graue gestrichelte Linie). Durch den Subtraktionsansatz im Modell wird das Signal verstärkt und dadurch sinken die vorhergesagten Schwellen für das spektral im Verdeckter zentrierten Signals bei dichotischer statt diotischer Darbietung um fast 20 dB, also nur leicht weniger als bei den experimentellen Daten.

Insgesamt sagt das Modell wesentliche Aspekte der Daten für lange Signale vorher. Dieses bestätigt die Ergebnisse von Nitschmann und Verhey (2012, [9]). Der Verlauf der experimentellen Daten entspricht denen früherer Studien mit vergleichbaren Stimulusparametern (Zwicker und Henning, 1984, [5], Nitschmann und Verhey, 2012, [9]).



**Abbildung 2:** Daten und Simulationen für eine Signaldauer von 12 ms. Die Darstellung entspricht der in Abbildung 1.

Abbildung 2 zeigt die Messdaten und die Modellvorhersagen für eine Signaldauer von 12 ms. Gegenüber den Messdaten für die 600 ms langen Signale in Abbildung 1 sind die Schwellen erhöht.

Dieses liegt zum einen an der Eigenschaft des Gehörs, über einen gewissen Zeitraum die Signalintensität zu integrieren.

Dieser als zeitliche Integration bezeichnete Effekt wird üblicherweise durch eine Tiefpassfilterung mit einer Zeitkonstante um die 100 bis 200 ms beschrieben (Munson, 1947 [11], Hots et al., 2014 [12]). Ein weiterer Aspekt ist eine spektrale Verbreiterung des Signals durch die Verkürzung der Signaldauer. Auffallend ist, dass der Abfall der BMLD mit zunehmendem spektralen Abstand von Zielsignal – Verdeckter deutlich geringer ausfällt als bei den langen Signalen. Dieser Verlauf steht in Einklang mit der Hypothese der Studie, dass bei kurzen Signalen die Modulationsanalyse einen geringeren Einfluss auf die Verdeckungsmuster hat als bei langen Signalen.

Das Modell (rechte Teilbilder) kann den Verlauf der Schwellen für diotische und dichotische Signale vorhersagen. Dass der Unterschied zwischen kurzen und langen Signalen vom Modell simuliert werden kann unterstützt die anfängliche Hypothese zusätzlich, dass bei Verdeckungsmustern die auf die monaurale Verarbeitung beschränkte Modulationsanalyse ein wesentlicher Grund für die Reduktion der BMLD mit zunehmendem spektralen Abstand ist.

## Zusammenfassung

Verdeckungsmuster mit kurzen Signalen sind deutlich breiter als die für lange Signale. Die Änderung des Schwellenverlaufs fällt für diotische Signal und Verdeckter stärker aus als für ein dichotisches Signal in Anwesenheit eines diotischen Verdeckers. Dadurch fällt der Abfall des binauralen Gewinns (BMLD) mit zunehmendem spektralen Abstand Signal - Verdeckter für kurze Signale kleiner aus als für lange Signale. Die Ergebnisse unterstützen die in der Literatur aufgestellte Hypothese, dass die Abnahme der BMLD auf eine unterschiedliche Verarbeitung der Modulationen bei monauraler und binauraler Verarbeitung zurückzuführen ist. Diese Modulationsverarbeitung erlaubt bei langen Signalen im diotischen Fall die Schwebung zwischen Signal und Verdeckter als zusätzliches Erkennungsmerkmal zu nutzen. Dieses ist dem binauralen System nicht möglich. Die hier verwendeten kurzen Signal sind so kurz, dass dieses Merkmal für beide Signale (diotisch und dichotisch) kaum genutzt werden kann

## Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt durch die Deutsche Forschungsgesellschaft (SFB trr 31).

## Literatur

- [1] Fletcher, H., und Munson, W. A.: Relation between loudness and masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 9 (1937), 1–10
- [2] Moore, B. C. J., Alcantara, J. I., und Dau, T.: Masking patterns for sinusoidal and narrowband noise maskers. *J. Acoust. Soc. Am.* 104 (1998), 1023–1038
- [3] Dau, T., Verhey, J. L., und Kohlrausch, A.: Intrinsic envelope fluctuations and modulation-detection thresholds for narrow-band noise carriers. *J Acoust Soc Am* 106 (1999), 2752-2760
- [4] Derleth, R. P., und Dau, T.: On the role of envelope fluctuation processing in spectral masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 108 (2000), 285–296
- [5] Zwicker, E., and Henning, G. B.: Binaural masking-level differences with tones masked by noises of various bandwidths and levels. *Hear. Res.* 14 (1984), 179–183.
- [6] Hall, J. W., Tyler, R. S., und Fernandes, M. A.: Monaural and binaural auditory frequency resolution measured using bandlimited noise and notched-noise masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 73 (1983), 894–898
- [7] Nitschmann, M and Verhey, J. L.: Binaural notched-noise masking and auditory-filter shape. *J. Acoust. Soc. Am.* 133 (2013), 2262-2271
- [8] Buss, E., und Hall, J. W.: The role of off-frequency masking in binaural hearing. *J. Acoust. Soc. Am.* 127 (2010), 3666–3677
- [9] Nitschmann, M und Verhey, J. L.: Modulation cues influence binaural masking-level difference in masking-pattern experiments. *J. Acoust. Soc. Am.* 131 (2012), EL223–EL228
- [10] Dau, T., Kollmeier, B., and Kohlrausch, A.: Modeling auditory processing of amplitude modulation. I. Detection and masking with narrow-band carriers. *J. Acoust. Soc. Am.* 102 (1997), 2892-2905
- [11] Munson, W.: The growth of auditory sensation. *J. Acoust. Soc. Am.* 19 (1947), 584–591.
- [12] Hots, J., Rannies, J., Verhey, J. L.: Modeling temporal integration of loudness. *Acta Acustica united with Acustica* 100 (2014) 184-187.