

Modellierung der Zwei-Ton-Suppression in einem Filtermodell der Cochlea

Martin Gottschalk, Jesko L. Verhey

Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Email: martin.gottschalk@med.ovgu.de

Einleitung

Der „Dual resonance non-linear“ (DRNL) Filter [1] ist ein Modell für das nichtlineare Verhalten des peripheren Hörsystems. Ein einzelner DRNL-Filter soll das Antwortverhalten eines Punktes auf der Basilmembran modellieren. Üblicherweise werden Filter mit verschiedenen Bestfrequenzen zu einer Filterbank kombiniert, um die Frequenz-Orts-Transformation der Cochlea abzubilden. Aufgrund der Recheneffizienz eignet sich eine solche Filterbank auch als erste Stufe für effektive Modelle der Hörwahrnehmung. Im Gegensatz zur linearen Gammaton-Filterbank werden dabei nichtlineare Effekte der Basilmembran berücksichtigt, z. B. die kompressive Wachstumsfunktion und die Zwei-Ton-Suppression.

Für die menschliche Cochlea wurden DRNL-Parametersätze an Daten aus verschiedenen psychoakustischen Experimenten angepasst. Da die Psychoakustik immer die Antwort des ganzen Hörsystems misst, kann natürlich der Einfluss von retrocochleären Stufen auf die Daten nicht ausgeschlossen werden. Es wurden verschiedene Implementierungen und Parametersätze vorgestellt, die effektiv das nichtlineare Filterverhalten des Gehörs beschreiben. Für diese Studie wurden drei Parametersätze verwendet. Sie werden im Folgenden als M1, M2a und M2b bezeichnet. Sie entsprechen den Beschreibungen in folgenden Veröffentlichungen:

- M1: Plack et al. (2002) [2]
- M2a: Lopez-Poveda und Meddis (2001) [3]
- M2b: Jepsen et al. (2008) [4]

Es werden einige wesentliche Parameter sowie die Modellvorhersagen für psychoakustische Experimente zu Kompression und Suppression verglichen. Insbesondere die experimentellen Daten zur Suppression zeigen eine komplexe Pegel- und Frequenzabhängigkeit. Die verschiedenen DRNL-Parametersätze sind bis jetzt noch nicht bezüglich ihrer Suppressionsvorhersagen verglichen worden. Realistische Vorhersagen zur Suppression sind erstrebenswert, denn sie wird z. B. als zugrundeliegender Mechanismus für den peripheren Beitrag zum „Comodulation Masking Release“ (CMR) diskutiert. CMR-Experimente untersuchen die frequenzübergreifende Verarbeitung von kohärenten Pegelschwankungen.

Modell

Das DRNL-Modell besteht aus zwei parallelen Pfaden, einem linearen und einem nichtlinearen. Der lineare Pfad besteht aus einem Gammatonfilter, gefolgt von einem

Tiefpassfilter. Er modelliert das passive Verhalten der Basilmembran. Der nichtlineare Pfad besteht aus einer nichtlinearen Kennlinie zwischen zwei Gammatonfiltern, gefolgt von einem Tiefpassfilter. Er modelliert die verstärkende Wirkung der Motilität der äußeren Haarzellen, auch bekannt als cochleärer Verstärker. Die Kennlinie beschreibt für kleine Eingangspegel eine je nach Parametersatz lineare oder nahezu lineare Verstärkung. Bei mittleren Pegeln geht die Kennlinie in ein kompressives Verhalten über. Im Zusammenspiel der beiden Kanäle ergeben sich zwei grundsätzliche Eigenschaften.

1. Linear-kompressiv-lineare Verarbeitung von Stimuli in spektraler Nähe zur charakteristischen Frequenz des Filters wegen des Überwiegens des linearen Kanals für hohe Pegel
2. Zunehmend lineare Verarbeitung von Stimuli in spektraler Entfernung zur charakteristischen Frequenz des Filters wegen der doppelten Gammatonfilter im nichtlinearen Pfad

Methode

Psychoakustische Experimente zur Kompression [6] und Suppression [5] wurden mittels des DRNL-Modells und einfachen Auswertungsstufen simuliert.

Kompression

In einem Pulsationsschwellenexperiment wechseln sich rasch zwei Töne verschiedener Frequenzen ab. In Abhängigkeit vom Pegel des höheren Tons („Signal“) stellen Probanden den Pegel des tieferen („Maskierer“, 0,6-fache Frequenz des Signals) so ein, dass ein kontinuierliches, nicht-pulsierendes Perzept entsteht. Unter der Annahme, dass der Maskierer streng linear verarbeitet wird, ergibt sich eine Abschätzung Kompressionsfunktion, wenn die Maskiererpegel über den Signalpegeln abgetragen werden, siehe z. B. [6].

In der Simulation gilt die Pulsationsschwelle als erreicht, wenn Signal und Maskierer in der Filterantwort den selben RMS-Wert erzeugen. Die RMS-Werte der Maskiererantworten wurden dazu in 1-dB-Schritten bestimmt und linear interpoliert.

Suppression

Im psychoakustischen Experiment wird die Suppression als Differenz der Nachhörschwellen zwischen den Maskiererkonfigurationen „Suppressee allein“ (SE) und „Sup-

Tabelle 1: Unterschiede in den wesentlichen Parametern

	M1	M2a (2 kHz)	M2b (2 kHz)
Kompressionskoeff.			
niedrige Pegel	0,78	1	1
mittlere Pegel	0,16	0,25	0,25
Filterordnungen			
lin. Pfad	2	2	2
nichtlin. Pfad	2	3	3
Breakpoint (dB SPL)	40,0	31,5	36,9
Linpoint (dB SPL)	76,0	71,0	73,7

pressee + Suppressor“ (SE+SR) gemessen. Unter der Annahme, dass Nachverdeckung auf einem linearen Integrator basiert, ist die Differenz der Nachhörschwellen beider Konfigurationen identisch zum Amplitudenverhältnis der Filterantworten auf die Maskierer. Da diese sind im DRNL-Modell direkt zugänglich sind, werden die Suppressionswerte folgendermaßen bestimmt (Gl. 1):

$$\text{Suppression} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{DRNL}_{\text{rms}}(\text{SE}+\text{SR})}{\text{DRNL}_{\text{rms}}(\text{SE})} \right) \quad (1)$$

Ergebnisse

Parameter

In Tab.1 sind wesentliche Parameter der verschiedenen Parametersätze verglichen. Der Breakpoint ist der Übergangspiegel zwischen (annähernd) linearer Verstärkung und Kompression im nichtlinearen Pfad. „Linpoint“ ist der Pegel, ab dem der lineare Pfad überwiegt. Für M1 sind diese frequenzunabhängig, für M2a und M2b sind sie in der Tabelle exemplarisch für den 2 kHz-Filter gezeigt.

Kompression

In Abb.1 sind die Ergebnisse der Simulationen zum Pulsationsschwellenexperiment dargestellt. Für die Signalfrequenz 500 Hz erkennt man ein linear-kompressiv-lineares Wachstum der Signalkomponente. Parametersatz M2a liefert den besten Fit. Dies ist nicht verwunderlich, da nur dieser Parametersatz explizit an eben diese experimentellen Daten angepasst wurde. Obwohl Parametersatz M2b nur eine geringfügige Änderung von M2a ist, erkennt man dafür etwas größere Differenzen zu den experimentellen Daten. Auch für die Signalfrequenz 4 kHz ist die Differenz der Vorhersage zu den experimentellen Daten mit dem Parametersatz M2b größer als mit M2a. Der Unterschied zwischen den beiden M2-Parametersätzen ist viel größer als bei der Signalfrequenz

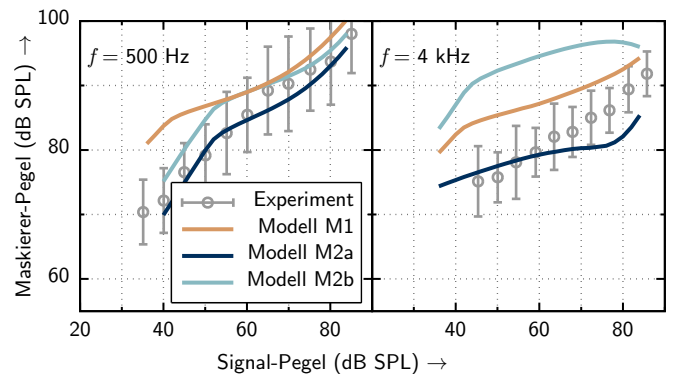


Abbildung 1: Simulierte Pulsationsschwellen verglichen mit experimentellen Daten [6]. Die zwei Teilbilder zeigen die Kompressionsfunktionen für zwei Filter mit charakteristischen Frequenzen 500 Hz und 4 kHz. Die Maskierfrequenz war jeweils das 0,6-fache dieser Frequenz.

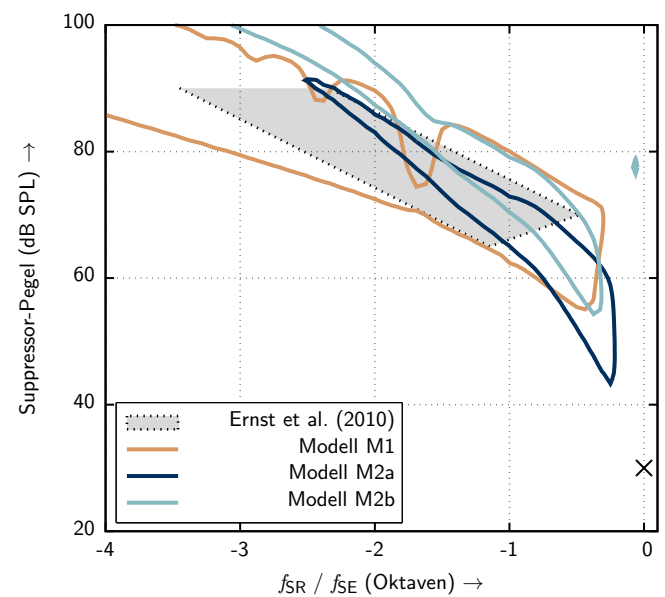


Abbildung 2: Simulierte 3-dB-Konturlinien der Suppressionsbereiche. Für die experimentelle Daten [5] wurden die Konturlinien nach Augenmaß erstellt. Das Kreuz steht für den Suppressor-Ton, $f_{SE} = 2 \text{ kHz}$, $L_{SE} = 30 \text{ dB SPL}$.

500 Hz. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Kompressionsparameter der Filterbank für Filter über 1,5 kHz bei M2b konstant sind, bei M2a aber nicht. Außerdem ist die Vorhersage von Parametersatz M1 dargestellt, dessen Kompressionsparameter an psychoakustische Daten bei 6 kHz aus anderen Experimenten angepasst wurden. Dessen Vorhersage liegt bei 4 kHz zwischen denen der beiden anderen Modelle.

Suppression

In Abb.2 sind Konturlinien des Tiefton-Suppressionsbereiches dargestellt. Suppressortöne mit einer Frequenz-Pegel-Kombinationen innerhalb der Konturlinien erzeugen in der Modellvorhersage eine Suppression von mindestens 3 dB. Die beste

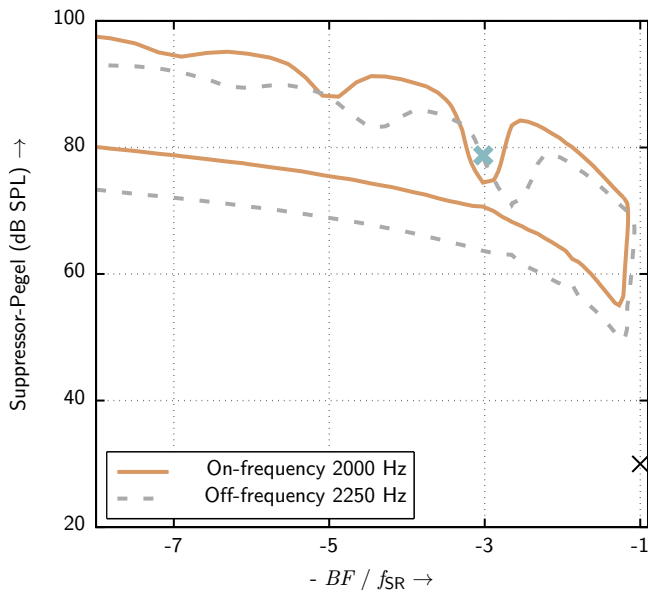


Abbildung 3: Konturlinien der 3dB-Suppressionsbereiche für Modell M1 mit geänderter Frequenzachse. Für einen Off-frequency-Filter sind die Einbrüche verschoben.

Übereinstimmung zu den experimentellen Daten erhält man mit Parametersatz M1, der an Daten aus einem Suppressionsexperiment mit $f_{SE} = 1$ kHz, $L_{SE} = 40$ dB SPL angepasst wurde. Die Suppressionsbereiche der M2-Parametersätze sind kleiner und teilweise zu höheren Suppressor-Pegeln verschoben. Für den Parametersatz M1 erkennt man außerdem Einbrüche im Suppressionsbereich bei bestimmten Suppressorfrequenzen. Dieser Effekt ist in der Struktur des Modells begründet und nicht nur auf Parametersatz M1 beschränkt. Er tritt auch für die M2-Parametersätze bei höheren Pegeln auf (nicht gezeigt). Um die Ursache zu klären, ist es hilfreich, eine lineare Frequenzachse zu nutzen (siehe Abb. 3).

Man erkennt, dass die Einbrüche gerade für jene Suppressorfrequenzen auftreten, deren ungeradzahliges Vielfache der Bestfrequenz des DRNL-Filters entsprechen. In diesen Konfigurationen entstehen wegen der kompressiven Kennlinie im nichtlinearen Pfad ungeradzahliges Obertöne, die im nachfolgenden Gammatonfilter eine Anregung hervorrufen, die dem Suppressionseffekt entgegenwirkt.

Die in Abb. 3 gezeigten Einbrüche in den Suppressionsbereichen sind in psychoakustischen Daten nicht vorhanden. Der zugrundeliegende Effekt, die Entstehung von Obertönen aufgrund der kompressiven Basilmembranmechanik, ist allerdings aus physiologischen Experimenten bekannt. Eine mögliche Erklärung für diesen scheinbaren Widerspruch ist, dass im Wahrnehmungsexperiment mehr als ein Filter ausgewertet wird. Für benachbarte Filter (Off-frequency) verschieben sich auch die Frequenzen der Einbrüche, sodass eine größere Suppression als im Filter der Signalfrequenz (On-frequency) möglich ist. In Abb. 3 ist grau gestrichelt der Suppressionsbereich des 2250 Hz-Filters mit gleichbleibender

Suppressor-Frequenz eingezeichnet. Für die Frequenz-Pegel-Kombination, die durch das hellblaue Kreuz markiert ist, erhält man im Off-frequency-Filter eine 4 dB größere Suppressionsvorhersage als im On-frequency-Filter.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung von verschiedenen Versionen des DRNL-Modells zu sehr unterschiedlichen Vorhersagen im Kompressions- und Suppressionsexperiment führt, auch wenn die Parameteränderungen klein sind. Die Wahl des Parametersatzes kann deshalb Simulationsergebnisse empfindlich beeinflussen. Ob die vom Modell vorhergesagten Einbrüche in den Suppressionsbereichen eine physiologische Grundlage haben, sollten zukünftige Studien klären.

Literatur

- [1] Meddis, R., O'Mard, L. P., und Lopez-Poveda, E. A.: A computational algorithm for computing nonlinear auditory frequency selectivity. *The Journal of the Acoustical Society of America* 109.6 (2001), 2852-2861
- [2] Plack, C. J., Oxenham, A. J., und Drga, V.: Linear and nonlinear processes in temporal masking. *Acta acustica united with acustica* 88.3 (2002), 348-358
- [3] Lopez-Poveda, E. A., und Meddis, R.: A human nonlinear cochlear filterbank. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110.6 (2001), 3107-3118
- [4] Jepsen, M. L., Ewert, S. D., und Dau, T.: A computational model of human auditory signal processing and perception. *The Journal of the Acoustical Society of America* 124.1 (2008), 422-438
- [5] Ernst, S. M. A., Rennie, J., Kollmeier, B., und Verhey, J. L.: Suppression and comodulation masking release in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America* 128.1 (2010), 300-309
- [6] Plack, C. J., und Oxenham, A. J.: Basilar-membrane nonlinearity estimated by pulsation threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America* 107.1 (2000), 501-507