Modellierung des Beitrag cochleärer Nichtlinearitäten auf die Verarbeitung von Komodulation

Martin Gottschalk, Jesko L. Verhey

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

Einleitung

Als Komodulation werden Frequenz-übergreifend gleiche zeitliche Pegelschwankungen bezeichnet. Komodulierte Verdecker haben im Allgemeinen eine geringere Verdeckungswirkung als nicht komodulierte Verdecker. Diesen Effekt bezeichnet man als Komodulationsgewinn (comodulation masking release - CMR). Als Mechanismus, der zu CMR führt, wurde vor allem die zentrale Verarbeitung diskutiert (sowohl die Frequenz-übergreifende Verarbeitung als auch die Verarbeitung innerhalb einer Frequenzgruppe). Einige Studien gehen auch davon aus, dass die periphere Verarbeitung einen Beitrag zu CMR liefert und dabei ähnlich wirkt wie die Zwei-Ton-Suppression, also als nichtlinearer Effekt der Cochleamechanik [1]. Typische CMR-Experimente und -Simulationen werden mit schmalen Rauschbändern als Verdeckern durchgeführt, die sich durch inhärente Pegelschwankungen auszeichnen. Ein peripherer Beitrag zu CMR tritt nach [1] vor allem auf, wenn der spektral entfernte Anteil des Verdeckers (flanking band - FB) einen höheren Pegel aufweist als der spektral am Signalton zentrierte Anteil des Verdeckers (on-frequency masker - OFM), und dieses sogar über eine spektrale Entfernung von mehreren Oktaven. Ziel der vorliegenden Studie ist es, ein Modell zur realistischen Vorhersage von Suppression als zugrundeliegendem Mechanismus zum peripheren CMR zu finden. Dies ist wichtig, um den relativen Beitrag des peripheren CMR zum gesamten CMR abzuschätzen.

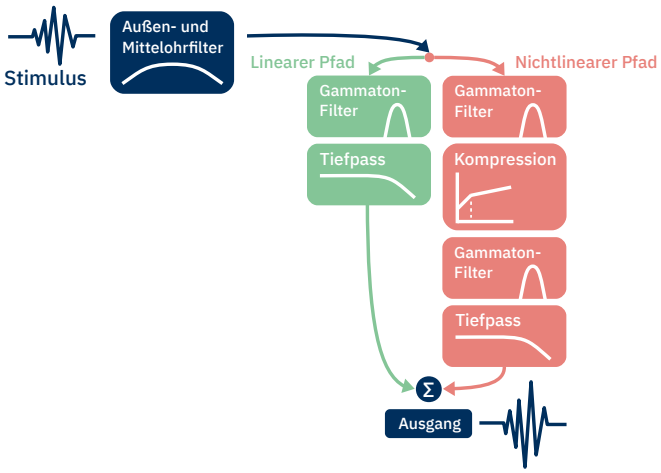

Abbildung 1: Das DRNL-Filter beschreibt die Bewegung eines Ortes auf der Basilarmembran in Abhängigkeit vom eingehenden Stimulus. Es besteht aus einem linearen Pfad, der die passive Antwort der Basilarmembran repräsentiert und einem nichtlinearen Pfad, der die Verstärkung durch die äußeren Haarzellen repräsentiert, die für höhere Eingangspegel kompressiv ist.

Modell

Ein Modell der Cochleamechanik ist das Dual-Resonance Nonlinear (DRNL) Filter, siehe Abb. 1. Es wurde für die Vorhersage von Suppressionsbereichen benutzt [2]. Eine andere Version dieses Filters mit anders gewählten Parametern bildet den peripheren Verarbeitungsteil des CASP-Modells [3], eines umfassenderen Hörmodells, das auch zentrale Verarbeitung einschließt. Das CASP-Modell wurde u. a. schon zur Vorhersage von CMR-Daten benutzt [4]. Im Fokus dieser Studie stehen die Vorhersagen der DRNL-Stufe, wie sie im CASP-Modell benutzt wurde (M_{CASP}-Modellversion). Außerdem wird eine weitere Modellversion mit veränderten Parametern vorgestellt, die die Abweichungen zu den experimentellen Daten reduziert (M_{mod}-Modellversion).

Die M_{mod}-Modellversion wurde von der M_{CASP}-Modellversion abgeleitet, da diese weit verbreitet ist und für einen breiten Bereich charakteristischer Frequenzen definiert ist, wodurch sie sich auch zur Konstruktion von parallelen Filterbänken eignet. Einige Parameter wurden neu gefittet und einige Eigenschaften wurden von einer anderen Modellversion adaptiert, die bereits für Suppressionssimulationen eingesetzt wurde [2]. Insgesamt unterscheidet sich die M_{mod}-Modellversion von der M_{CASP}-Modellversion in folgenden Punkten:

- Angepasste Parameter, die insgesamt zu mehr Suppression führen, vor allem für die größeren spektralen Abstände (siehe Tab. 1). Die Frequenzabhängigkeit (m-Wert) der einzelnen Modellparameter wurde i. A. nicht geändert, außer für den Parameter a (Übertragungsfaktor der nichtlinearen Kennlinie für kleinere Pegel). Der neue Wert wurde so gewählt, dass die Frequenzabhängigkeit des Übergangspegels zwischen kleinen und mittleren Pegeln in der Kompressionskennlinie, auch als Breakpoint bekannt, genauso groß ist wie in der M_{CASP}-Modellversion.

- Der Anstieg der Kompressionskennlinie für kleinere Pegel in der M_{CASP}-Modellversion ist 1 dB/dB, in der M_{mod}-Modellversion ist er 0,78 dB/dB.

- Ein zusätzliches Tiefpassfilter wurde hinzugefügt. Es sitzt im Signalweg vor der nichtlinearen Kompressionskennlinie. Dies erfordert keine zusätzlichen Parameter, da die Parameter des schon existierenden Tiefpassfilters im nichtlinearen Pfad übernommen wurden. Eine Kaskade von zwei Filtern wurde benutzt.

Tabelle 1: Die veränderten Parameter der M_{mod}-Modellversion im Vergleich mit den Originalparametern der M_{CASP}-Modellversion. Die Definition und Benennung der Parameter folgt den Originalveröffentlichungen [5, 3]. Für eine gegebene charakteristische Frequenz (CF) eines Filters berechnet sich der jeweilige Parameter aus p_0 und m mit dem Term $10^{p_0+m\log_{10}(\mathrm{CF})}$.

Parameter	M_{CASP} p_0	M_{CASP} m	M_{mod} p_0	M_{mod} m
BW_{nl}	-0.03193	0.77000	0.081456	0.77000
g	4.20405	-0.47909	3.9794	-0.47909
$a_{CF<1.5\,kHz}$	1.40298	0.81916	1.3848	0.33873
$a_{CF\geq1.5\,kHz}$	4.0047	0.00000	2.4606	0.00000
$b_{CF<1.5\,kHz}$	1.61912	-0.81867	1.5033	-0.81867
$b_{CF\geq1.5\,kHz}$	-0.98105	0.00000	-1.0969	0.00000

Methoden

Zum Vergleich der Modellvorhersagen mit experimentellen Daten wurde ein Satz von Suppressionsdaten und CMR-Daten [6] benutzt, die gemeinsam in derselben Gruppe von Versuchspersonen gemessen wurden.

Statt die Suppression durch direkte Simulation eines Nachverdeckungsexperiments (wie es üblicherweise zur psychoakustischen Ausmessung der Suppression genutzt wird) zu bestimmen, wurde die Suppressionsvorhersage wie folgt aus der Modellantwort auf die Verdecker berechnet:

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

Verglichen wurden dabei die RMS-Werte der Filterantwort auf den unterdrückten verdeckenden Ton (Suppressee, SE) allein mit der Antwort auf Suppressee und Suppressor zusammen (SE+SR). Unter der Annahme, dass Nachverdeckung durch lineare zeitliche Integration der Energie beschreibbar ist, haben diese Filterantworten die gleiche Pegeldifferenz wie Schwellen im Nachverdeckungsexperiment.

Die CMR-Vorhersagen wurden durch Simulation eines adaptiven Zwangswahlverfahren mit dem Modell als künstliche Versuchperson ermittelt. Die Entscheidungsstufe dieses Prozesses enthielt eine Hüllkurvenextraktion durch Halbwellengleichrichtung und Tiefpassfilterung, eine gleitende zeitliche Mittelung und einen Maximumsdetektor [1].

Ergebnisse

Abb. 2 zeigt die Modellvorhersagen zur Suppression im Vergleich mit den experimentellen Daten. Die Suppressionsvorhersagen der beiden Modellversionen unterschieden sich. Für Suppressortöne mit kleinerer Frequenz als Suppressee- und Signalton (negative Oktavabstände) gab es drei Frequenz-Pegel-Kombinationen mit Suppression (Balken nach unten) in den experimentellen Daten. Nur an einem dieser Datenpunkte sagte auch die M_{CASP}-Modellversion Suppression hervor. Die M_{mod}-Modellversion sagte Suppression für alle drei dieser Datenpunkte hervor, allerdings leicht überschätzt. Für Sup-

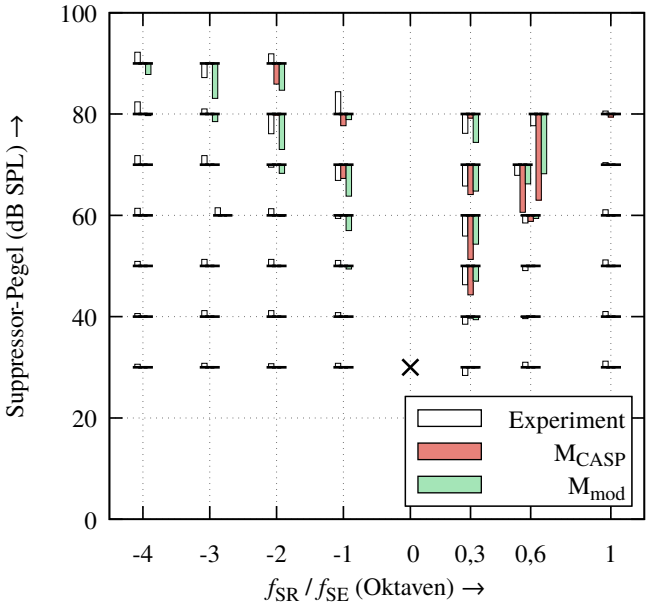

Abbildung 2: Suppression in Abhängigkeit vom spektralen Abstand zwischen Suppressor und Suppressee sowie vom Suppressor-Pegel. Experimentelle Daten [6] im Vergleich mit den Vorhersagen der DRNL-Modelle. Die Länge und Richtung der Balken stellt die Größe der Suppression dar. Nach unten zeigende Balken stehen für Suppression, nach oben zeigende Balken stehen für zusätzliche Verdeckung. Die Länge der Balken folgt derselben Skalierung wie die Ordinate.

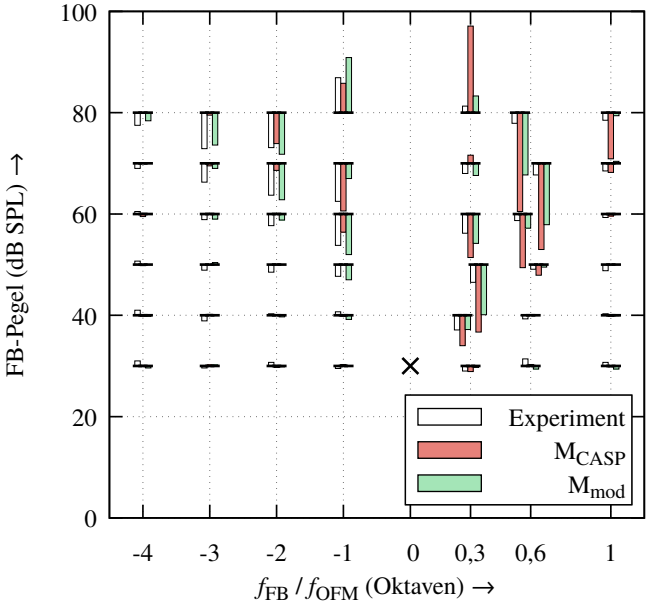

Abbildung 3: CMR in Abhängigkeit vom spektralen Abstand zwischen FB und OFM sowie vom FB-Pegel. Experimentelle Daten [6] im Vergleich mit den Vorhersagen der DRNL-Modelle. Darstellung und Skalierung der Balken wie in Abb. 2.

Tabelle 2: Mittlere Abweichungen (RMS) in dB zwischen den experimentellen Daten und den Modellvorhersagen.

	M_{CASP}	M_{mod}
Suppression	3.2	2.6
CMR	5.3	2.8

pressortöne mit größerer Frequenz als Suppressee- und Signalton (positive Abstände) stimmten die Vorhersagen der Modelle an vielen Frequenz-Pegel-Kombinationen gut mit den experimentellen Daten überein. Ausgenommen davon waren allerdings die tiefsten Suppressorpegel 30 und 40 dB SPL bei einem spektralen Abstand von 0,3 Oktaven, für die beide Modelle im Widerspruch zu den experimentellen Daten keine Suppression vorhersagten. Außerdem unterschätzte die M_{CASP}-Modellversion die Suppression bei 0,3 Oktaven und 80 dB SPL sehr stark, die M_{mod}-Modellversion aber nicht. Bei einem Abstand von 0,6 Oktaven und den höheren Pegeln 70 und 80 dB SPL überschätzten beide Modellversionen die Suppression, die M_{mod}-Modellversion allerdings weniger stark.

Abb. 3 zeigt die Modellvorhersagen zum CMR im Vergleich mit den experimentellen Daten. In den experimentellen Daten trat CMR über große spektrale Abstände auch bei kleineren Pegeln auf, im Gegensatz zur Suppression. Dies interpretierten die Autoren [6] als Beitrag der zentralen Verarbeitung zum CMR, der deshalb wie erwartet von den hier verwendeten Modelversionen zur Simulation der nichtlinearen cochleären Verarbeitung nicht vorhergesagt werden konnte. Im Verhältnis der Vorhersagen zu den experimentellen Daten für höhere Pegel zeigten sich einige Gemeinsamkeiten mit dem Suppressionsexperiment (Abb. 2). Zum Beispiel sagte die M_{CASP}-Modellversion keine bzw. kaum CMR für spektrale Abstände von -4 und -3 Oktaven hervor. Die M_{mod}-Modellversion sagte dort zwar bei höheren Pegeln CMR hervor, allerdings auch zum Teil unterschätzt (bei 70 dB SPL). Bei FBs mit höheren Mittenfrequenzen als der Signalfrequenz (also positive Abstände) sagten beide Modellversionen für einige Frequenz-Pegel-Kombinationen einen gegenüber den experimentellen Daten deutlich überschätzten CMR vorher, z. B. bei 0,3 Oktaven und 50 dB SPL oder bei 0,6 Oktaven und 60 bis 80 dB SPL. Diese Überschätzung war für die M_{CASP}-Modellversion stärker ausgeprägt als für die M_{mod}-Modellversion. Außerdem sagte die M_{CASP}-Modellversion auch für den Abstand einer Oktave und den Pegel 80 dB SPL einen zu großen CMR vorher, die M_{mod}-Modellversion jedoch nicht. Tab. 2 zeigt die mittleren Abweichungen zwischen den experimentellen Daten und den Modellvorhersagen. Die mittleren Abweichungen der M_{mod}-Modellversion waren sowohl für Suppression als auch für CMR kleiner als die der M_{CASP}-Modellversion.

Diskussion

Die Suppressionsvorhersagen der M_{mod}-Modellversion waren näher an den experimentellen Daten als die der M_{CASP}-Modellversion. Dies wird in den RMS-Abweichungen deutlich. Für höhere spektrale Abstände, also tiefere Suppressortöne, waren die Unterschiede zwischen den Modellversionen am meisten ausgeprägt. Die bessere Übereinstimmung Vorhersagen der M_{mod}-Modellversion mit den experimentellen Daten für die tiefen Suppressortöne lassen sich auf breitere Gammatonfilter des nichtlinearen Pfades zurückführen (Parameter BW_{nl}).

Die M_{mod}-Modellversion sagt i. A. Suppression und CMR an denselben Frequenz-Pegel Kombinationen vorher, an denen sich die Effekte auch in den experimentellen Daten zeigen. Die Effektstärke ist dabei zum Teil aber überschätzt. Die Überschätzung von CMR für höhere FBs wurde aber in der M_{mod}-Modellversion im Vergleich zur M_{CASP}-Modellversion reduziert (vgl. den Datenpunkt bei 1 Oktave und 80 dB SPL). Dies lässt sich auf das zusätzliche Tiefpassfilter zurückführen. Insbesondere durch die Verbreiterung der Gammatonfilter wurde diese Änderung nötig.

Es zeigte sich, dass die Vorhersagen zu Suppression und CMR stark miteinander zusammenhängen. Unterschiede zwischen den zwei Modellversionen wirkten sich jeweils sehr ähnlich auf die vorhergesagten Suppressions- und CMR-Magnituden aus. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Modelle, die CMR-Effekte durch nichtlineare periphere Verarbeitungsstufen auch bei hohen Pegeldifferenzen vorhersagen sollen, in Bezug auf ihre Peripherie-Stufe validiert werden sollten und dass dazu auch Suppressionsdaten herangezogen werden können.

Literatur

[1] Stephan MA Ernst und Jesko L Verhey. Role of suppression and retro-cochlear processes in comodulation masking release. The Journal of the Acoustical Society of America 120.6 (2006), 3843–3852

[2] Christopher J Plack, Andrew J Oxenham und Vit Drga. Linear and nonlinear processes in temporal masking. Acta acustica united with acustica 88.3 (2002), 348–358

[3] Morten L Jepsen, Stephan D Ewert und Torsten Dau. A computational model of human auditory signal processing and perception. The Journal of the Acoustical Society of America 124.1 (2008), 422–438

[4] Torsten Dau, Tobias Piechowiak und Stephan D. Ewert. Modeling within-and across-channel processes in comodulation masking release. The Journal of the Acoustical Society of America 133.1 (2013), 350–364

[5] Enrique A Lopez-Poveda und Ray Meddis. A human nonlinear cochlear filterbank. The Journal of the Acoustical Society of America 110.6 (2001), 3107–3118

[6] Stephan MA Ernst, Jan Rennies, Birger Kollmeier und Jesko L Verhey. 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