

Phase-dependent Effects of Harmonics in Two-Tone Suppression

Martin Gottschalk, Jesko L. Verhey

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

Einleitung

Die Basilarmembranbewegung in der gesunden Cochlea hängt nichtlinear vom akustischen Eingangs-Reiz ab. Dies äußert sich u. a. in den bekannten Pegelabhängigkeiten der Basilarmembran-Bewegung: mit zunehmendem Eingangspegel wächst die Membranbewegung kompressiv und das Erregungsmuster wird einerseits breiter und andererseits Richtung Apex verschoben. Ein weiterer Aspekt ist die nichtlineare Interaktion von gleichzeitig dargebotenen Tönen verschiedener Frequenz; man nennt z. B. *Zwei-Ton-Suppression* den Effekt, dass die Membran- und Nervenantwort auf einen Ton (*Suppressee*) reduziert wird, wenn gleichzeitig auch ein zweiter Ton (*Suppressor*) mit geeigneter Frequenz-Pegel-Kombination dargeboten wird. Durch die kompressive Verarbeitung kommt es außerdem nicht nur zur Entstehung von Differenztönen auf der Ebene der Cochlea, sondern es entstehen auch harmonische Obertöne der einzelnen Töne [1], die bisher weniger ausführlich untersucht wurden.

In dieser Studie wurde untersucht, welchen Einfluss cochleäre harmonische Obertöne auf den Suppressionseffekt haben. Es werden Simulationen gezeigt, die eine Reduktion des Suppressionseffekts durch cochleäre Obertöne vorhersagen. Diese Reduktion tritt auf, wenn die Obertöne spektral in der Nähe der Suppressee-Frequenz auftreten, wodurch sich die vorhergesagten Suppressionsbereiche verkleinern. Für exakt ganzzahlige Frequenzverhältnisse sagen die Simulationen darüber hinaus eine Abhängigkeit von der Phasenbeziehung vorher: je nachdem, ob sich Oberton und Suppressee konstruktiv oder destruktiv überlagern, wird der Suppressionseffekt schwächer oder stärker.

Diese Studie zeigt außerdem die Ergebnisse eines psychophysikalischen Probandenexperiments. Mit diesem wurde die in den Simulationen vorhergesagte Phasenabhängigkeit des Suppressionseffektes überprüft.

Simulation

Zunächst wurde untersucht, inwieweit die Simulation des Suppressionseffekts von cochleären Obertönen und der Phasenbeziehung zwischen Obertönen und Suppressee beeinflusst wird.

Modell

Als Modell der nichtlinearen Verarbeitung wurde der *Dual-resonance Non-linear (DRNL) Filter* mit Parametern für das menschliche Gehör benutzt, die bereits zur Vorhersage von Zwei-Ton-Suppression verwendet worden sind

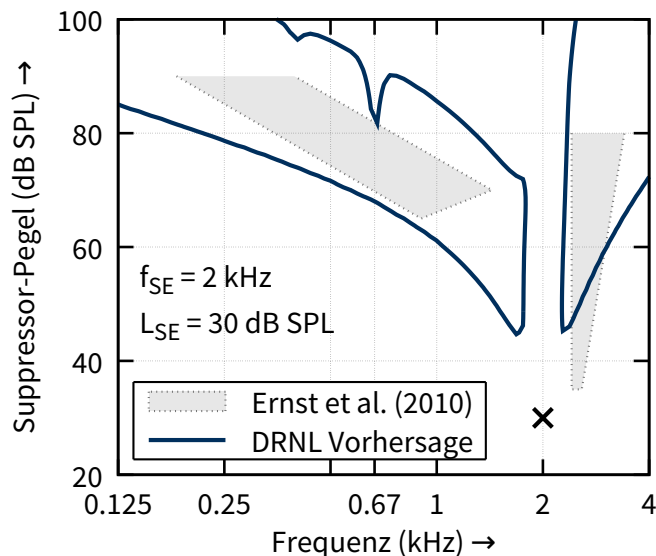


Abbildung 1: Simulierte Suppressionsbereiche im Vergleich mit psychoakustisch gemessenen Literaturdaten [3]. Die Dunkelblauen Linien sind Konturlinien für 3 dB Suppression. Die graue Flächen entsprechen abgeschätzten Suppressionsbereichen aus den Literaturdaten. Das Kreuz markiert die Frequenz und den Pegel des Suppressees. Auf der Abszisse ist die Suppressor-Frequenz abgetragen. Die Einbrüche in den Suppressionsbereichen der DRNL-Simulationen stammen von harmonischen Obertönen des Suppressors (siehe Text).

[2]. Ein DRNL-Filter repräsentiert einen Ort auf der Basilarmembran. Es besteht aus zwei parallelen Pfaden, die einerseits das lineare, passive Membranverhalten und andererseits die aktive Verarbeitung (*cochleärer Verstärker*) repräsentieren. Der aktive Pfad enthält eine nichtlineare Kennlinie, die im Modell Kompression, Suppression, Differenztöne und harmonische Obertöne erzeugt. Das DRNL-Filter wird üblicherweise als parallele Filterbank realisiert. In dieser Studie wurde nur das Verhalten eines einzelnen Filters betrachtet.

Methode

Das Simulations-Paradigma lehnt sich an typische psychoakustische Studien zur Messung der Suppression mithilfe von Nachverdeckung an, siehe u. a. [3]. Dort wurde ein Suppressee-Ton mit konstanter Frequenz und konstantem Pegel betrachtet. Unabhängige Variablen waren die Frequenz und der Pegel des Suppressors. Der Suppressionseffekt wurde dort folgendermaßen gemessen: ein kurzer Signal-Tonpuls wurde durch einen Verdeckter verdeckt. Seine Mithörschwelle wurde dabei adaptiv bestimmt. In der Referenzkonfiguration bestand der Verdeckter nur aus dem Suppressee-Ton. Durch Addition eines Suppressor-

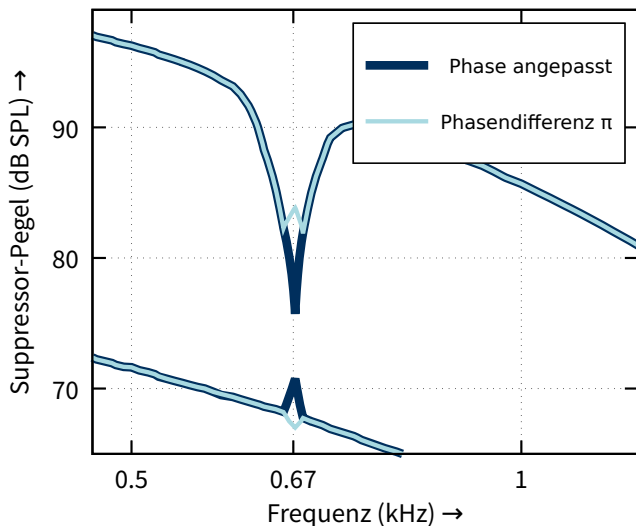


Abbildung 2: Simulierte Suppressionsbereiche (Konturlinien 3 dB). Die Darstellung ist analog zu Abb. 1, allerdings für einen kleineren Bereich der Suppressor-Parameter. Die zwei Linien entsprechen angepassten Phasenbeziehungen für eine gleiche Phasenlage zwischen Suppressor und dem Oberton des Suppressors (dunkelblau) und einer Phasendifferenz π (hellblau).

Tons mit geeigneter Frequenz-Pegel-Kombination zum Verdeckter sank die Mithörschwelle des Signals. Die Differenz der Mithörschwellen zwischen den Konfigurationen "Suppressor allein" und "Suppressor + Suppressor" ist die psychoakustisch gemessene Suppression und wurde als Maß für die Reduktion der Membranantwort durch die Darbietung des Suppressors interpretiert.

Für die Suppressions-Simulationen in dieser Studie gilt die folgende Vereinfachung: unter der Annahme, dass Nachverdeckung einem linearen Prozess entspricht, nämlich der Detektion des Signals hinter einer zeitlich gewichteten Integration der Membranaktivität, entspricht eine Änderung der Mithörschwellen einer gleich großen Änderung der Membranaktivitäten. Daher wurde auf die Simulation von Nachverdeckung verzichtet. Wie in Gl. 1 zu sehen ist, wurden direkt die RMS-Werte der Modellantworten auf die Verdeckter in den Konfigurationen "Suppressor allein" und "Suppressor + Suppressor" miteinander verglichen.

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

Das verwendete DRNL-Filter hatte dabei eine charakteristische Frequenz, die mit der Frequenz des Suppressors (2 kHz) übereinstimmte. Der Suppressor-Pegel betrug 30 dB SPL.

Ergebnisse

In Abb. 1 sind die Ergebnisse der Simulation mit dem DRNL-Filter dargestellt und mit psychoakustischen Literaturdaten verglichen. Genau wie die experimentellen

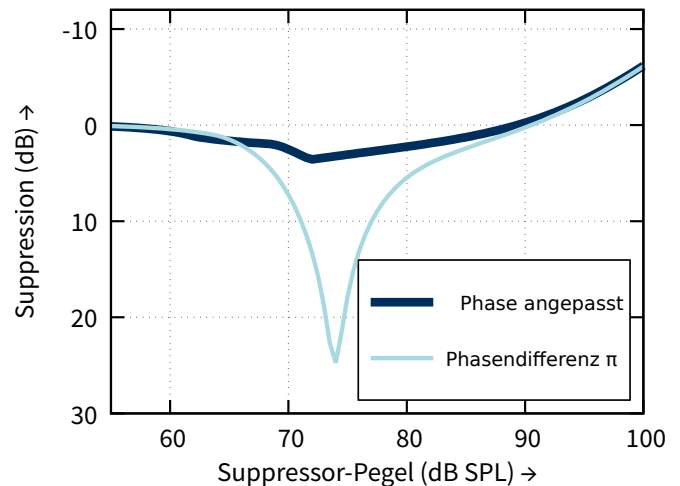


Abbildung 3: Simulationsdaten zur Abhängigkeit der Suppression vom Suppressor-Pegel für $f_{\text{Suppressee}} = 0.67$ kHz. Die Darstellung entspricht einem vertikalen Linescan durch Abb. 2 mit den entsprechenden Farben.

Daten zeigte die Simulation Suppression in zwei Bereichen: für Suppressortöne mit höherer (*high-side*) und mit niedrigerer (*low-side*) Frequenz als der Suppressor. Die Größe der Suppressionsbereiche werden vom DRNL-Filter überschätzt. In den Simulationen zeigten sich außerdem Einbrüche in den Suppressionsbereichen. Sie traten für Konfigurationen auf, in denen Suppressor und Suppressor ungefähr das Frequenzverhältnis 1:5 und 1:3 hatten. Die Ursache dieser Einbrüche waren Obertöne des Suppressors, die von der nichtlinearen Kennlinie im aktiven Pfad des Filters erzeugt wurden. Sie erhöhten die Energie der Filterantwort, was dem Suppressionseffekt entgegenwirkte.

Abbildung 2 zeigt, dass es für exakt ungeradzahlige Frequenzverhältnisse (in diesem Fall 1:3) außerdem eine Phasenabhängigkeit gab. Je nachdem, ob der Oberton des Suppressors in Phase (dunkelblau) oder gegenphasig (hellblau) zum Suppressor eingestellt war, trat eine Verkleinerung oder Vergrößerung des Suppressionsbereiches auf. Auch dieser Effekt ging auf eine Änderung der Energie der Filterantwort zurück. In der gegenphasigen Konfiguration (hellblau) führte die destruktive Überlagerung von Oberton und Suppressor zu einer Reduktion der Filterantwort. Eine Erhöhung der Filterantwort in der gleichphasigen Konfiguration (dunkelblau) wirkte dem Suppressionseffekt entgegen, führte also zu einer Verkleinerung des Suppressionsbereiches.

Abbildung. 3 ist eine alternative Darstellung für eine Teilmenge der Daten aus den Abb. 1 und 2. Gezeigt ist die Suppression für eine Suppressor-Frequenz von 667 Hz. Es handelt sich nicht um eine Konturlinie, sondern um die Darstellung der Suppression in Abhängigkeit vom Suppressor-Pegel. Man erkennt, dass auch die Größe der maximal erreichten Suppression von der Phasenlage abhängig. Bei demjenigen Suppressor-Pegel, für den die maximale Suppression auftrat, war gleichzeitig der Unterschied der beiden Phasenkonfigurationen maximal (mehr als 20 dB).

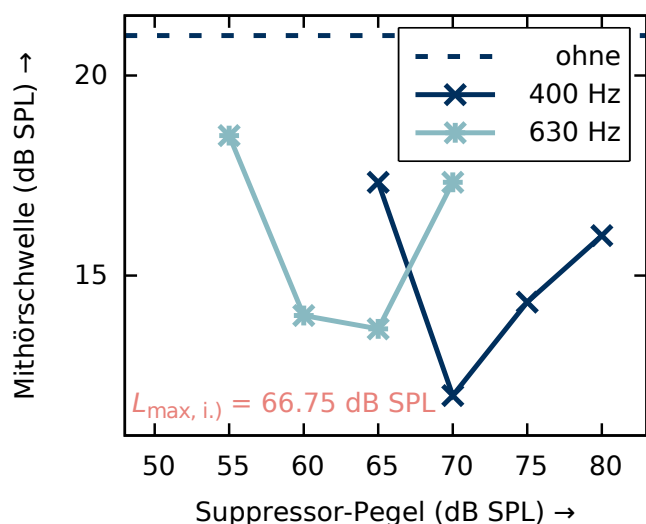


Abbildung 4: Ergebnisse des Versuchsteils i.) zur individuellen Bestimmung des Suppressor-Pegels für maximale Suppression. Gezeigt sind exemplarisch die Ergebnisse von Versuchsperson 1.

Experiment

In einem psychoakustischen Probandenexperiment wurde untersucht, inwiefern die Phasenabhängigkeit des Suppressionseffektes, der sich in den Simulationen gezeigt hat, auch experimentell aufzufinden ist. Die Suppression wurde dabei durch Messung von Mithörschwellen in einem Nachverdeckungsexperiment bestimmt. In Anlehnung an das Simulationsergebnis, dass der größte Phaseneffekt gerade bei demjenigen Suppressor-Pegel auftrat, der auch zur größten Suppression führte (siehe Abb. 3), wurde ein vorbereitender Versuchsteil i.) durchgeführt, bei dem der individuelle Suppressor-Pegel größter Suppression für die Probanden bestimmt werden sollte ($L_{\max, i.}$). Anschließend wurden im Hauptteil ii.) für diesen Suppressor-Pegel Suppressionsmessungen durchgeführt, bei denen die Phasenbeziehung zwischen Suppressor und Suppressee variiert wurden.

Methode

Zur adaptiven Schwellenmessung wurde ein 3-Intervall-Zwangswahlverfahren (3I-3AFC) mit der Schrittregel “2 hoch, 1 runter” verwendet. Stimuli wurden über Kopfhörer (Sennheiser HD 650, Kuppler-kalibriert mit Brüel & Kjør 4153) in einer doppelwandigen Hörkabine dargeboten. Es nahmen 11 normalhörende Versuchspersonen zwischen 18 und 35 Jahren teil. Alle Teilnehmenden hatten bei den audiometrischen Frequenzen zwischen 125 Hz und 4 kHz Hörschwellen von höchstens 15 dB HL. Zwei Versuchspersonen zeigten keine Suppression und nahmen deshalb nicht am Hauptversuch ii.) teil. Folgende Signalparameter wurden benutzt:

- Suppressee-Frequenz = Signal-Frequenz = 1 kHz
- Suppressee-Pegel = 30 dB SPL
- Suppressor-Frequenz = 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz
- Verdeckerdauer = 400 ms
- Signaldauer = 40 ms

Die Frequenzen des Suppressees und des Suppressors sind anders gewählt als in den Simulationen. Dies ließ einige a-priori-Abschätzungen aus existierenden Literaturdaten [4] zu. Außerdem wurde eine Suppressor-Frequenz von 500 Hz (und deren Nachbarn) gewählt, was der Hälfte der Suppressee-Frequenz entspricht. Es wird also die Wirkung der zweiten Harmonischen untersucht, während in den Simulationen die dritte Harmonische untersucht wurde. Diese Konfiguration wurde gewählt, weil sich in physiologischen Daten [1] vor allem die zweite Harmonische zeigte. Im DRNL-Filter wird diese allerdings wegen der Symmetrie der nichtlinearen Kennlinie nicht erzeugt, sondern nur die ungeraden Harmonischen.

i.) Vorversuch Pegelabhängigkeit

In Anlehnung an das Simulationsergebnis bestand die Annahme, dass der Oberton des Suppressors und der Suppressee miteinander wechselwirken. Eine Bestimmung des Suppressorpegels maximaler Suppression wäre damit implizit von der korrekten Phasenbeziehung abhängig, die nicht a priori bekannt ist. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Suppressor-Pegel maximaler Suppression für zwei benachbarte Suppressor-Frequenzen (400 Hz, 630 Hz) bestimmt. Es wurde dann angenommen, dass der Pegel maximaler Suppression für einen 500 Hz-Suppressor dem Mittelwert der Pegel maximaler Suppression für die beiden benachbarten Frequenzen entspricht.

ii.) Hauptversuch Phasenabhängigkeit

Mit den 9 Versuchspersonen, die am Hauptversuch teilnahmen, wurde die Suppression abhängig von der Phasenbeziehung zwischen Suppressee und Suppressor gemessen. Als Suppressorpegel wurde der individuell ermittelte Pegel maximaler Suppression aus dem Vorversuch benutzt. Es wurden 8 Startphasen des Suppressors zwischen 0 und π untersucht. Dies entspricht Phasendifferenzen zwischen 0 und 2π zwischen dem Suppressee und dem Oberton (2. Harmonische) des Suppressors.

Ergebnisse

In Abb. 4 sind Mithörschwellen in Abhängigkeit vom Suppressor-Pegel im Vorversuch i.) dargestellt. Sie entsprechen typischen Literaturdaten, z. B. [4]. Für den Suppressor mit der Frequenz 630 Hz beträgt der Pegel maximaler Suppression 70 dB SPL, für 400 Hz unterscheiden sich die Schwellen bei 60 und 65 dB SPL um weniger als 1 dB. Wenn dieses Kriterium zutraf, wurde der Suppressor-Pegel maximaler Suppression als Mittelwert angenommen (in diesem Fall 62,5 dB SPL). Aus den zwei Pegeln maximaler Suppression für 400 Hz und 630 Hz wurden Pegel maximaler Suppression für 500 Hz durch Mittelwertbildung abgeschätzt. In Abb. 4 entsprach dies einem Suppressor-Pegel von 66.75 dB SPL.

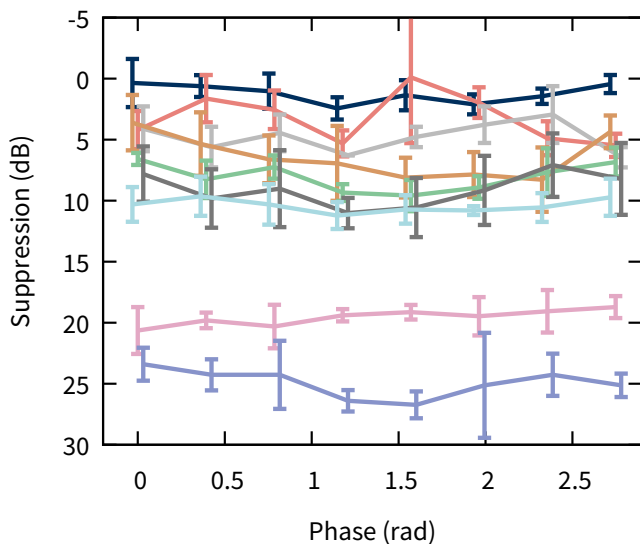


Abbildung 5: Ergebnisse des Versuchsteils ii.) zur Phasenabhängigkeit der Suppression. An der Abszisse ist die Startphase des Suppressors aufgetragen. Die acht verschiedenen Startphasen liegen in einem Bereich zwischen 0 und π . Die verschiedenen farbigen Linien entsprechen den Ergebnissen der verschiedenen Versuchspersonen mit Standardfehlern.

In Abb. 5 sind die Messungen zur Suppression in Abhängigkeit von der Startphase des Suppressors aus Versuchsteil ii.) dargestellt. Wie man sieht, unterscheidet sich die Größe der Suppression zwischen den einzelnen Versuchspersonen sehr stark. Dies ist einerseits im Einklang mit bisherigen Untersuchungen zur Suppression, die starke individuelle Unterschiede des Effektes gezeigt haben, z. B. [4]. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, dass durch das Verfahren im Vorversuch i.) der Pegel maximaler Suppression für $f_{\text{Suppressor}} = 500 \text{ Hz}$ nur ungenau bestimmt wurde, was dazu geführt hätte, dass einige Versuchspersonen nicht ihre maximale Suppression erreichten. Wie man sieht, zeigten die meisten Versuchspersonen keine Abhängigkeit der Suppression von der Startphase des Suppressors und damit von der Phasenbeziehung zwischen Suppressor und dem ersten Oberton des Suppressors. Versuchspersonen, deren Suppression sich mit der Phase änderte, hatten auch größere Standardfehler, also weniger konsistente Antworten. Die hier gezeigten Daten lassen also nicht auf eine Abhängigkeit der Suppression von der Phasenbeziehung zwischen Suppressor und Suppressor schließen.

Diskussion

Es besteht eine Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Simulation und den Ergebnissen des Versuchs, denn die im Modell auftretende Phasenabhängigkeit trat im Experiment nicht auf. Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen:

a) Die Suppressor-Pegel wurden falsch gewählt. Wenn der Oberton auf der Basilarmembran nicht die gleiche Amplitude hat wie die Membranantwort des Suppressors, ist eine vollständige Auslöschung selbst bei optimaler Phasenbeziehung nicht möglich. Je unterschiedlicher die Amplituden, desto kleiner ist der Einfluss der Phasenbeziehung.

Es ist möglich, dass sich das Verfahren aus Versuchsteil i.) nicht zur Bestimmung des optimalen Suppressor-Pegels eignet. Insbesondere basierte es auf der Annahme, dass der größte Phaseneffekt beim Pegel maximaler Suppression auftritt, was lediglich von den in Abb. 3 gezeigten Simulationen nahe gelegt wurde.

b) Die Wechselwirkung zwischen dem ersten Oberton des Suppressors und dem Suppressor auf der Basilarmembran ist möglicherweise keine einfache Überlagerung, sondern folgt einem komplexeren Mechanismus, in dem eine gegenseitige Auslöschung der beiden Töne auch bei gleichen Amplituden und entgegengesetzter Phasenlage nicht stattfindet.

Eine weitere Einschränkung der Vergleichbarkeit von Simulation und Experiment betrifft Off-frequency listening. Dies könnte im Hörversuch eine Rolle spielen, wird aber durch die Auswertung von nur einem DRNL-Filter im Modell nicht berücksichtigt.

Literatur

- [1] Nigel P Cooper. Harmonic distortion on the basilar membrane in the basal turn of the guinea-pig cochlea. *The Journal of physiology* 509.1 (1998), 277–288
- [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] Stephan MA Ernst u. a. 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
- [4] H Duifhuis. Level effects in psychophysical two-tone suppression. *The Journal of the Acoustical Society of America* 67.3 (1980), 914–927