

# Verdeckung von Sinustönen durch Rauschen mit spektraler Lücke bei gleichzeitiger Modulation mit zeitlich kohärenten Pegelschwankungen

Ramona Grzeschik<sup>1, 2</sup>, Björn Lübken<sup>1</sup> und Jesko L. Verhey<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Email: ramona.grzeschik@med.ovgu.de

## Einleitung

Eine fundamentale Eigenschaft des auditorischen Systems ist die Frequenz-Orts-Transformation (Tonotopie) in der Cochlea. In der Psychoakustik wird dieser Prozess häufig als eine Bank von überlappenden auditorischen Bandpassfiltern modelliert. Für die psychoakustische Bestimmung der Filtercharakteristik werden Verdeckungsexperimente mit Sinussignal und rauschhaften Verdecker genutzt. Hierzu gehören das Bandbreitenexperiment mit einem Bandpassrauschen an der Signalfrequenz und das „Notched-Noise“ Experiment, bei dem der Rauschverdecker eine spektrale Lücke an der Signalfrequenz aufweist. Mit Hilfe des Bandbreitenexperimentes lässt sich die Bandbreite des auditorischen Filters abschätzen [1]. Dabei wird die Detektionsschwelle eines Sinuston-Signals ermittelt, welches gleichzeitig mit einem Rauschträger dargeboten wird. Die Mittenfrequenz des Rauschträgers entspricht stets der Frequenz des Signals. Bei gleichbleibender Energiedichte wird die Bandbreite des Rauschträgers schrittweise erhöht und die Detektionsschwelle des Signals in Abhängigkeit der Bandbreiten gemessen. Mit zunehmender Bandbreite des Rauschträgers nimmt auch die Detektionsschwelle des Signals zu, allerdings nur bis zu einem bestimmten Punkt. Ab dann bleiben die Detektionsschwellen beinahe konstant. Dieser Punkt wird als Frequenzgruppenbreite bezeichnet. Nimmt man für den auditorischen Filter eine rechteckige Form an so beschreibt diese Frequenzgruppenbreite die Abschneidefrequenzen des Filters.

Mit Notched-Noise Experimenten ist es möglich, die Filterform nachzuvollziehen [2]. Im Gegensatz zu den Bandbreitenexperimenten besitzt der Rauschträger nun eine spektrale Lücke (engl. „notch“) welche um die Frequenz des Signals zentriert ist. Die Detektionsschwelle des Signals wird bei diesen Experimenten in Abhängigkeit dieser Lückenbreite gemessen, wobei die Bandbreite des Rauschträgers konstant bleibt. Mit zunehmender Lückenbreite nimmt die Detektionsschwelle des Signals ab. Dieses Resultat zeigt, dass auditorische Filter endliche Flankensteilheiten aufweisen, also nicht rechteckig sind.

Einige Experimente zeigen, dass die Informationen der auditorischen Filter nicht unabhängig verarbeitet werden. Ein Effekt der auf solche frequenzübergreifenden Prozesse hindeutet ist comodulation masking release (CMR). Dabei verringern sich die Detektionsschwellen des Signals, wenn z.B. beim Bandbreitenexperiment dem Rauschträger bei gleichbleibender Energiedichte zeitlich kohärente

Pegelschwankungen aufgeprägt werden, er also komoduliert ist [3].

Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Ansatz, bei dem der Einfluss der Komodulation in einem Notched-Noise Experiment untersucht wird. Auch bei diesem Experiment sollten wegen der endlichen Filterflankensteilheit die Filtersignale, welche Mittenfrequenzen innerhalb der Lücke haben, mit den Filtersignalen deren Mittenfrequenzen außerhalb der Lücke liegen, komoduliert sein. Das bedeutet, dass für ein Sinuston in der spektralen Lücke ebenfalls ein CMR messbar sein müsste, obwohl Signal und Verdecker sich nicht spektral überlappen, wie bei CMR Experimenten sonst üblich.

In dem ersten Experiment wurden Detektionsschwellen eines Sinustons in Abhängigkeit von unmodulierten und komodulierten Rauschträgern mit spektralen Lücken von 0 Hz bis 400 Hz gemessen. Ein zweites Experiment wurde durchgeführt um den Einfluss der Erzeugung des modulierten Verdeckers (ohne spektraler Lücke) auf die Detektionsschwellen zu untersuchen.

## Versuchspersonen

Am ersten Experiment nahmen zwölf Versuchspersonen (8 weiblich, Alter 25-37, Mittel 31 Jahre) teil. Davon wurden neun auch in dem zweiten Experiment gemessen (5 weiblich, Alter 25-38, Mittel 31 Jahre). Alle Versuchspersonen gaben ihre schriftliche Einwilligung und erhielten eine Aufwandsentschädigung für die Teilnahme. Des Weiteren wiesen alle ein normales Audiogramm mit Hörschwellen von unter oder gleich 10 dB HL an den audiometrischen Frequenzen von 125 Hz bis 4 kHz auf.

## Stimuli

Als Signal wurde in beiden Experimenten ein 500-Hz Sinuston dargeboten. In dem ersten Experiment bestand der Verdecker aus einem Breitbandrauschen (30-1000 Hz) mit spektralen Lücken von 0, 50, 100, 200 und 400 Hz, welche um die Signalfrequenz von 500 Hz zentriert waren. Das Rauschen war entweder unmoduliert (Bedingung UN) oder komoduliert (Bedingung CM). Der Verdecker wurde wie folgt generiert: (1) in der Zeitdomäne wurde ein 500 ms langes weißes Rauschen erzeugt. Für das komodulierte Rauschen wurde dieses mit einem 12,5 Hz breiten Tiefpassrauschen multipliziert. (2) Mittels Fouriertransformation wurde das Rauschen in die Frequenzdomäne transferiert. (3) Frequenzen außerhalb der gewünschten Frequenzbereiche wurden auf Null gesetzt. (4) Mittels einer inversen Fouriertransformation wurde das Rauschen wieder

in die Zeitdomäne zurück transferiert. (5) Abschließend wurde das Rauschen mit einem 50 ms Kosinusfenster weich ein- und ausgeblendet. Die Verdeckter im zweiten Experiment waren erneut Breitbandrauschen von 30-1000 Hz. Allerdings wurden nun ihre zeitlichen Eigenschaften verändert und einzig die 0-Hz Lückenbreite betrachtet. Es wurden vier Modulationsbedingungen untersucht: (1) unmoduliert (Bedingung UN) und (2) komoduliert, wobei der Verdeckter aus einem Rauschträger bestand welcher mit einem 12,5 Hz Tiefpassrauschen multipliziert wurde (Bedingung CM1). Beide Verdeckertypen wurden bereits im ersten Experiment verwendet. (3) Für die dritte Modulationsbedingung (CM2) wurden für den Verdeckter zwei unabhängige Rauschträger mit dem gleichen 12,5 Hz Tiefpassrauschen multipliziert. Anschließend wurde einer der beiden Rauschträger von 30-500 Hz und der zweite von 500-1000 Hz bandbegrenzt. Abschließend wurden beide Rauschträger addiert. Somit hatte der Verdeckter die gleiche Energiedichte wie die ersten beiden Verdeckter. Allerdings wurde nun die Modulationstiefe an der Signalfrequenz dadurch reduziert, dass die Rauschträger erst moduliert und dann bandbegrenzt wurden. (4) Der Verdeckter für die vierte Modulationsbedingung (CM3) war ähnlich zu dem Verdeckter von CM2. Statt eines Modulators wurden nun zwei unterschiedliche 12,5 Hz Tiefpassrauschen für die beiden Rauschträger verwendet.

## Verfahren

Für die Ermittlung der Detektionsschwellen wurde ein drei-Intervall alternative-forced-choice (3AFC) Verfahren mit adaptiver Pegelanpassung verwendet. Jedes Intervall war 500 ms lang, die Intervalle wurden durch eine Ruhephase von 300 ms voneinander getrennt. Für jedes Intervall pro Trial wurde jeweils der gleiche Verdeckter verwendet. Für jeden Trial wurde ein neuer Verdeckter generiert. In einem zufällig ausgewählten Intervall pro Trial wurde das Signal gleichzeitig mit dem Verdeckter dargeboten. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, mittels Drücken der entsprechenden Taste auf der Tastatur, das Intervall mit dem Signal anzuzeigen. Nach jedem Trial wurde eine visuelle Rückmeldung gegeben. Der Signalpegel wurde entsprechend einer „one-up two-down“ Regel eingestellt. Die anfängliche Schrittgröße betrug 6 dB und wurde nach jeder zweiten Umkehrung halbiert bis eine Schrittgröße von 2 dB erreicht wurde. Ab dann wurde der Durchlauf für weitere acht Umkehrungen durchgeführt. Die letzten sechs Umkehrungen flossen in die Schwellenermittlung ein. Alle Probanden wurden insgesamt vier Mal gemessen, wobei die Daten der letzten drei Messungen für die Datenanalyse verwendet wurden. Die individuellen Schwellen wurden aus dem Mittelwert dieser drei Messungen ermittelt. Für die Statistik wurden gepaarte t-Tests berechnet und nachträglich für multiples Testen Bonferroni-korrigiert [4].

## Simulation

Zusätzlich zu den Messungen wurde eine modifizierte Version des Modells von Dau und Kollegen (1997) [5] implementiert und getestet. Für die Modellierung der Außen- und Mittelohrfilterung wurden Bandpassfilter (0,5 – 5,3 Hz

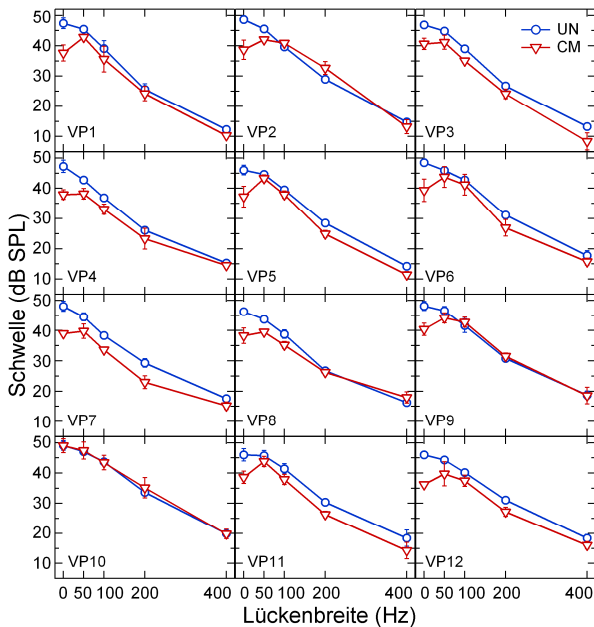
[6]) verwendet. Die Frequenzanalyse auf cochlearer Ebene erfolgte mittels einer Gammatonfilterbank vierter Ordnung mit einer Bandbreite von 1 ERB (engl. „equivalent rectangular bandwidth“ [7]). Ein Filter war um die Signalfrequenz zentriert. Weitere Filter waren ober- und unterhalb dieses Filters in 1-ERB Abständen angeordnet. Um die Ruheschwelle zu simulieren wurde weißes Rauschen mit einem Pegel von 7 dB zu den Gammatonfiltersausgängen hinzu addiert. Anschließend folgten Einhüllendenextraktion mit Halbwellengleichrichtung und Tiefpassfilterung. Um Adaptations- und Kompressionseffekte zu simulieren, wurden fünf aufeinanderfolgende Adaptationsschleifen verwendet [8]. Das Ausgangssignal der Adaptationsschleifen wurde mit einer Modulationsfilterbank analysiert [5]. Für die Simulation frequenzübergreifender Prozesse wurde ein Ansatz von Piechowiak und Kollegen (2007) [9] implementiert. Hierbei wurde die gewichtete Summe aller auditorischen Bandpassfilter der Modulationsfilterbank außerhalb der Signalfrequenz von dem Filter an der Signalfrequenz subtrahiert. Abschließend gab ein optimaler Detektor mittels Korrelationsanalyse an, ob das Signal erkannt wurde oder nicht. Für die Ermittlung der simulierten Detektionsschwellen wurde dasselbe 3AFC Verfahren wie für die Messungen verwendet.

## Ergebnisse Messungen

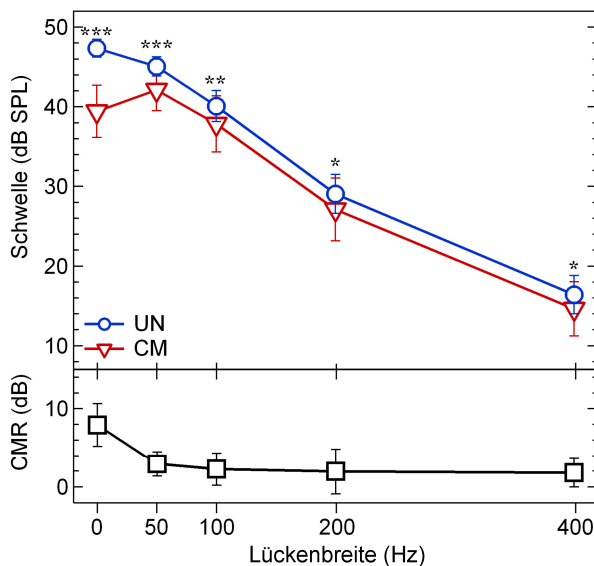
In Abbildung 1 sind die individuellen Detektionsschwellen aus dem ersten Experiment für die unmodulierte (UN, Kreise) und komodulierte (CM, Dreiecke) Bedingung aller zwölf Versuchspersonen als Funktion der Lückenbreite abgebildet. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung aus drei Messwiederholungen an. Die einzelnen Felder sind von oben links nach unten rechts nach dem Anstieg der unmodulierten Schwellen von steil zu flach angeordnet. Alle Versuchspersonen zeigen einen abfallenden Schwellenverlauf der unmodulierten Bedingung mit zunehmender Lückenbreite. Dieser Abfall variierte zwischen den einzelnen Versuchspersonen, was die unterschiedlichen Formen der individuellen auditorischen Filter widerspiegelt. Die Schwellen für die komodulierte Bedingung waren im Allgemeinen niedriger als die entsprechenden unmodulierten Schwellen, was auf einen positiven CMR hindeutet. Manche Versuchspersonen zeigten einen entgegengesetzten Effekt und somit einen negativen CMR: bspw. VP2 bei Lückenbreite 100 und 200 Hz oder VP9 bei fast allen Lückenbreiten. Versuchsperson 10 zeigte keinen CMR bei allen Lückenbreiten. Bei fast allen Versuchspersonen stieg die Schwelle der komodulierten Bedingung von 0 Hz Lückenbreite auf 50 Hz Lückenbreite an. Die Ausprägung dieses Anstiegs variierte zwischen den einzelnen Versuchspersonen.

Die gemittelten Schwellen über alle Versuchspersonen der unmodulierten und komodulierten Bedingung sind in Abbildung 2 im oberen Feld dargestellt. Der Unterschied zwischen beiden Bedingungen, d.h. der CMR, ist im unteren Feld abgebildet. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung über alle zwölf Versuchspersonen an. Wie bei den Einzeldaten nahmen auch hier die Detektionsschwellen

für die unmodulierte Bedingung mit zunehmender Lückenbreite ab. Für die komodulierte Bedingung stieg die Schwelle an wenn die Lückenbreite von 0 Hz auf 50 Hz vergrößert wurde, und fiel mit zunehmender Lückenbreite ab. Aufgrund der verschiedenen individuellen Filterformen nahm auch die Standardabweichung mit zunehmender Lückenbreite zu. Der CMR war an allen Lückenbreiten ausgeprägt und fiel von 8 dB bei 0 Hz Lückenbreite auf 2 dB bei 400 Hz Lückenbreite ab.



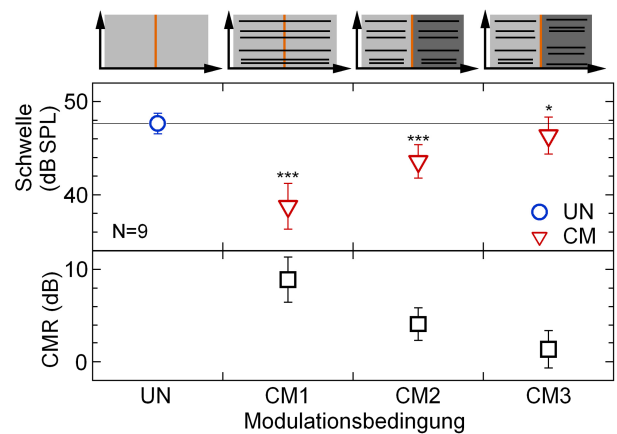
**Abbildung 1:** Individuelle Detektionsschwellen für die unmodulierte (UN, Kreise) und komodulierte (CM, Dreiecke) Bedingung aller zwölf Versuchspersonen aus dem ersten Experiment. Die Fehlerbalken geben die individuelle Standardabweichung von drei Messungen an.



**Abbildung 2:** Gemittelte Detektionsschwellen ( $n=12; \pm SD$ ) aus dem ersten Experiment für die unmodulierte (UN, Kreise) und komodulierte (CM, Dreiecke) Bedingung (oberes Feld) und der entsprechende CMR (unteres Feld). Der signifikante CMR ist durch Sterne gekennzeichnet (\*\*\*)  $p < 0,001$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*  $p < 0,05$ ).

Die t-Tests bestätigten, dass die Schwellen für die komodulierte Bedingung für alle Lückenbreiten signifikant niedriger waren als für die unmodulierte Bedingung.

Die Ergebnisse der Messungen aus Experiment 2 sind in Abbildung 3 dargestellt. Abgebildet sind sie gemittelten Detektionsschwellen mit Standardabweichung der neun Probanden für die vier Modulationsbedingungen. In dem oberen Feld der Abbildung sind die schematischen Spektrogramme der einzelnen Bedingungen dargestellt. Das untere Feld der Abbildung zeigt den CMR für jede der drei komodulierten Bedingungen. Die Ergebnisse der unmodulierten Bedingung UN und der komodulierten Bedingung CM1 sind vergleichbar mit den Ergebnissen der entsprechenden Bedingungen aus Experiment 1 bei einer Lückenbreite von 0 Hz (vgl. Abbildung 2). Der CMR (UN-CM1) betrug 9 dB. Somit ist er nur um 1 dB größer als bei Experiment 1, was darauf hinweist, dass eine geringere Anzahl an Probanden kaum einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Mit zunehmender Reduktion der Modulationstiefe um die Signalfrequenz nahmen die Schwellen für die komodulierten Bedingungen CM2 und CM3 zu und damit der CMR ab (UN-CM2: 4 dB; UN-CM3: weniger als 1,5 dB). Somit verschlechtert die Verwendung verschiedener Modulatoren für die Frequenzen ober- und unterhalb der Signalfrequenz den Nutzen von Komodulation. Die t-Tests bestätigten, dass die Schwellen für die komodulierten Bedingungen signifikant niedriger waren als für die unmodulierte Bedingung.

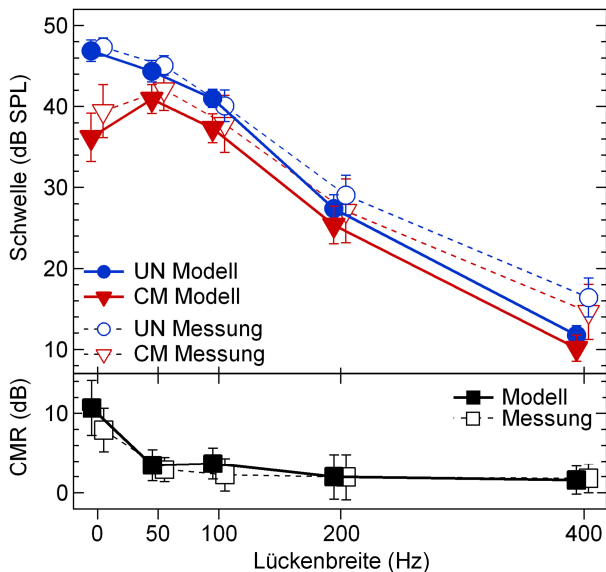


**Abbildung 3:** Gemittelte Detektionsschwellen ( $n=9; \pm SD$ ) aus dem zweiten Experiment für die unmodulierte (UN, Kreis) und komodulierten (CM, Dreiecke) Bedingungen (mittleres Feld) und der entsprechende CMR (unteres Feld). Der signifikante CMR ist durch Sterne gekennzeichnet (\*\*\*)  $p < 0,001$ ; \*  $p < 0,05$ ). Das obere Feld stellt die schematischen Spektrogramme der einzelnen Modulationsbedingungen dar.

### Ergebnisse Simulationen

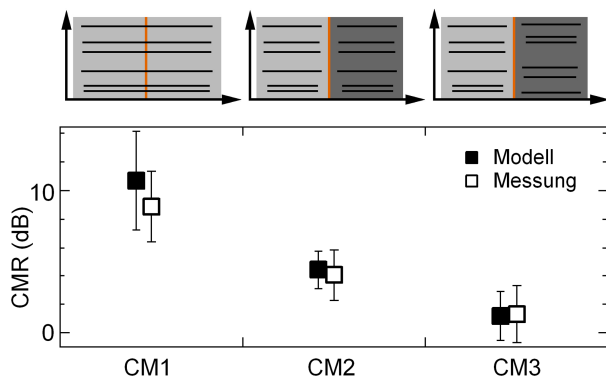
In Abbildung 4 sind die simulierten Detektionsschwellen (gefüllte Symbole) zusammen mit den Ergebnissen der Messungen aus dem ersten Experiment (offene Symbole; vgl. Abb. 2) dargestellt. Die Standardabweichung der simulierten Daten ergibt sich aus 20 simulierten Schwellen. Im Allgemeinen konnte das Modell die Daten gut vorhersagen. Tendenziell wurde durch das Modell eine schmalere Filterform abgeschätzt, was sich durch einen

steileren Schwellenverlauf widerspiegelt. Der CMR wurde durch das Modell insgesamt gut vorhergesagt. Der Unterschied zwischen gemessenem und simuliertem CMR betrug im Durchschnitt weniger als 0,5 dB. An den Lückenbreiten 0 Hz und 100 Hz wurden die Ergebnisse leicht überschätzt (Unterschied ca. 2 dB).



**Abbildung 4:** Gemittelte simulierte Detektionsschwellen (gefüllte Symbole) aus dem ersten Experiment für die unmodulierte (UN, Kreise) und komodierte (CM, Dreiecke) Bedingung (oberes Feld) und der entsprechende CMR (unteres Feld). Zum Vergleich sind die Messergebnisse mit offenen Symbolen leicht versetzt abgebildet.

Die simulierten CMR Ergebnisse (gefüllte Symbole) aus dem zweiten Experiment sind zusammen mit den gemessenen CMRs in Abbildung 5 dargestellt (offene Symbole). Die Standardabweichung der simulierten Daten ergibt sich aus 20 simulierten Schwellen. Für die Modulationsbedingung CM1 betrug der Unterschied zwischen simuliertem und gemessenem CMR ca. 2 dB. Die simulierten CMRs für die Modulationsbedingungen CM2 und CM3 unterschieden sich kaum von den gemessenen CMRs (Unterschied weniger als 0,5 dB).



**Abbildung 5:** Simulierte CMR Ergebnisse (gefüllte Symbole) aus dem zweiten Experiment. Zum Vergleich sind die CMRs aus den Messungen mit offenen Symbolen leicht versetzt abgebildet. Das obere Feld stellt die schematischen Spektrogramme der einzelnen Modulationsbedingungen dar.

## Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass eine Verbesserung der Schwelle durch Komodulation, d.h. ein CMR, auch im Notched-Noise Experiment gefunden wird. Der CMR war an allen Lückenbreiten vorhanden und unterschiedlich ausgeprägt. Der große CMR an der Lückenbreite von 0 Hz lässt sich durch die Art der Generierung des modulierten Verdeckers erklären. Die gewählte Reihenfolge von Modulation und Bandbegrenzung führt zu einer Reduktion der Modulationstiefe an den Seitenrändern der spektralen Lücken und vermindert so den Gewinn aus der Komodulation.

Das verwendete Modulationsfilterbankmodell scheint sich gut dafür zu eignen den CMR vorherzusagen, da sich die gemessenen CMRs von den simulierten CMRs im Mittel nur um 1 dB unterscheiden.

## Danksagung

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

## Literatur

- [1] Fletcher, H.: Auditory Patterns. Rev. Mod. Phys. 12 (1940), 47-65
- [2] Patterson, R. D.: Auditory filter shapes derived with noise stimuli. J. Acoust. Soc. Am. 59 (1976), 640-654
- [3] Hall, J. W., Haggard, M. P., and Fernandes, M. A.: Detection in noise by spectro-temporal pattern analysis. J. Acoust. Soc. Am. 76 (1984), 50-56
- [4] Holm, S.: A Simple sequentially rejective multiple test procedure. Scand. J. Statist. 6 (1979), 65-70
- [5] 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
- [6] Nitschmann, M and Verhey, J. L.: Binaural notched-noise masking and auditory-filter shape. J. Acoust. Soc. Am. 133 (2013), 2262-2271
- [7] Glasberg, B. R. and Moore, B. C.: Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformly exciting notched noise. J. Acoust. Soc. Am. 108 (2000), 2318-2318
- [8] Dau, T., Püschel, D. und Kohlrausch, A.: A quantitative model of the "effective" signal processing in the auditory system. I. Model structure. J. Acoust. Soc. Am. 99 (1996), 3615-3622
- [9] Piechowiak, T., Ewert, S. D., and Dau, T.: Modeling comodulation masking release using an equalization-cancellation mechanism. J. Acoust. Soc. Am. 121 (2007), 2111-2126