

Aus der Abteilung für Experimentelle Audiologie  
der Medizinischen Fakultät  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Einfluss der Aktivierung des efferenten Systems auf die monaurale  
und binaurale Frequenzselektivität des Gehörs

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. med.

(doctor medicinae)

An der Medizinischen Fakultät  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

vorgelegt von Felix Dymel

aus Kiel

Frauenfeld, den 26.10.2025

## Bibliographische Beschreibung:

Dymel, Felix:

Einfluss der Aktivierung des efferenten Systems auf die monaurale und binaurale Frequenzselektivität des Gehörs. -2024. – 71 Bl., 19 Abb., 4 Tab.

## Kurzreferat

Der mediale olivocochleäre Reflex (MOC-Reflex) führt zu einer Veränderung der cochleären Verarbeitung. Die vorliegende Arbeit untersucht, inwiefern die Aktivierung des MOC-Reflexes auch zu einer Veränderung der binauralen Verarbeitung führt. Hierzu wird die Detektion von einem Sinuston mit einer Frequenz von 500 Hz als Zielsignal in Anwesenheit eines diotisch dargebotenen verdeckenden Rauschens untersucht. Das Zielsignal war entweder ebenfalls diotisch oder hatte einen interauralen Phasendifferenz von  $\pi$  (dichotisch); der Unterschied der Schwellen für die beiden interauralen Konditionen wird als binauraler Gewinn bezeichnet. Das verdeckende Rauschen (Maskierer) wurde immer diotisch dargeboten und das Zielsignal wurde im Maskierer entweder zeitlich zentriert (Simultanverdeckung) oder nach Abschalten des Maskierers (Nachverdeckung) positioniert. Es wurde ein sogenanntes Notched-Noise-Paradigma verwendet, bei dem die Maskierer eine spektrale Lücke von 400 Hz an der Signalfrequenz hatten oder diese Lücke nicht hatten. Der Unterschied der Schwelle mit und ohne Lücke kann als Abschätzung der Frequenzauflösung des Gehörs genutzt werden. Zur Aktivierung des MOC-Reflexes wurde ein sogenannter Precursor mit einer spektralen Lücke von 400 Hz oder 800 Hz vor dem Signal-Maskierer-Komplex dargeboten. In beiden Experimenten (Simultan- und Nachverdeckung) zeigte sich wie erwartet eine Verringerung des Schwellenwertes des Zielsignales, wenn eine spektrale Lücke in den Maskierer eingeführt wurde. Dieser Effekt war für diotische Zielsignale größer als für dichotische, was zu einer Reduktion der binaural masking level difference (BMLD) für Maskierer mit einer spektralen Lücke führt und als Hinweis auf eine effektiv geringere spektrale Auflösung bei der binauralen Verarbeitung angesehen werden kann. Der Precursor verringerte den Effekt der Lückenbreite auf die BMLD. Dies deutet darauf hin, dass der Effekt des Precursors das auditorische System geringer beeinflusst, wenn es sich binauraler Reize bedient.

## **Schlüsselwörter**

Notched-Noise-Masking, Binaural, BMLD, MOC-Reflex, Precursor, Primer, Simultanverdeckung, Nachverdeckung

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
1.1.	Anatomie und Physiologie des peripheren Gehörs.....	2
1.2.	Das olivocochleäre System.....	6
1.3.	Grundlagen der Psychoakustik .....	8
1.4.	Schwerhörigkeit.....	17
1.5.	Motivation .....	20
2.	Material und Methoden .....	20
2.1.	Probanden.....	20
2.2.	Signale.....	21
2.3.	Methoden.....	23
2.4.	Aufbau .....	24
3.	Ergebnisse .....	25
3.1.	Ergebnisse der Individualdaten .....	25
3.2.	Ergebnisse der Mittelwerte.....	35
4.	Diskussion .....	44
4.1.	Vergleich der diotischen und dichotischen Daten ohne Anwesenheit des Precursor .....	44
4.2.	Vergleich der Ergebnisse in Anwesenheit des Precursors.....	48
4.3.	Der Einfluss der Nachverdeckung eines Notched-Noise Precursors.....	50
4.4.	Einfluss des MOC-Reflexes auf die Ergebnisse.....	51
4.5.	Mögliche andere Prozesse und Methoden, die den Effekt des Precursor erklären.....	55
5.	Zusammenfassung .....	57
6.	Literaturverzeichnis.....	58

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Abb.	Abbildung
ÄHZ/IHZ	Äußere Haarzellen/Innere Haarzellen
AFC	Alternative Forced-Choice
BM	Basilarmembran
BMLD	Binaural-Masking-Level-Difference
Bzw.	Beziehungsweise
CAP	Compound Action Potentials
CAS	Contralateral Acoustic Suppression
CF	Charakteristische Frequenz
CI	Cochlea Implantat
ERB	Equivalent Rectangular Bandwidth
FTC	Frequenz-Tuning-Kurve
LOCB	Laterales Olivocochleäres Bündel
M.	Musculus
MOC-Bündel	Mediales Olivocochleäres Bündel
MOC-Reflex	Medialer Olivocochleärer Reflex
N.	Nervus
Ncl.	Nucleus
NH	Normalhörende
NNP4	Notched-Noise-Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz
NNP8	Notched-Noise-Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz
NoP	Precursor ohne spektrale Lücke
$N_0$	Maskierer ohne spektrale Lücke
$N_{400}$	Maskierer mit einer spektralen Lücke von 400 Hz
IS	Innenohrschwerhörigkeit
OAE	Otoakustische Emission
OCB	Olivocochleäres Bündel
OCS	Olivocochleäres System
PTC	Psychophysische-Tuning-Kurve
S.	Siehe
SPL	Sound Pressure Level
$S_0$	Zielsignal ohne interauraler Phasendifferenz

$S_\pi$	Zielsignal mit einer interauralen Phasendifferenz von $\pi$
Vgl.	Vergleiche
VP	Versuchsperson
ZNS	Zentrales Nervensystem

---

## Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
dB	Dezibel	[dB]
Hz	Hertz	[1/s]
ms	Millisekunden	[ms]
nm	Nanometer	[nm]

---



# 1. Einleitung

In der folgenden Arbeit geht es um den Einfluss des efferenten Systems auf die monaurale und binaurale Frequenzselektivität des Gehörs.

Um die Verständlichkeit von Sprache von Normalhörenden in einer geräuschvollen Umgebung zu verbessern, bedient sich das Gehör unterschiedlichen Mechanismen. Einer dieser ist ein im Hirnstamm gelegener neuronaler Feedback-Effekt, welcher als medialer olivocochleärer Reflex (MOC-Reflex) bezeichnet wird. Der MOC-Reflex wurde in diversen Studien, unter anderem durch Nutzung von otoakustischen Emissionen oder psychoakustischen Experimenten, in monauralen Prozessen untersucht. Ein weiterer Mechanismus ist das Hören mit beiden Ohren (binaurales Hören) selbst. Hierbei kann das Signal des Interesses (die Sprache) von Störgeräuschen unterschieden werden. Bisher wurden die Mechanismen nahezu einzeln untersucht, ohne beispielsweise den Einfluss des MOC-Reflexes auf binaurale Prozesse zu untersuchen. Unter anderem ist das Ziel dieser Arbeit zu untersuchen, ob der Einfluss des MOC-Reflexes auf binaurale Prozesse gleich dem monauraler Prozesse ist oder ob er diese spezifisch beeinflusst.

Um diesen Zusammenhang zu verstehen, ist es unerlässlich sich vorher mit den anatomischen und physiologischen Gegebenheiten des Gehörs zu beschäftigen, sowie mit den Methoden dieser Arbeit, die die Ergebnisse objektivieren.

Um die Verständlichkeit von Sprache in einer geräuschvollen Umgebung zu untersuchen, bedient sich die Psychoakustik an Maskierungsexperimenten. Hierbei wird ein Zielsignal (meistens ein Sinuston) von einem Maskierer (meistens ein Rauschen mit einer bestimmten Frequenzbandbreite) verdeckt. Dadurch wird die eben genannte Situation simuliert. Um den MOC-Reflex auszulösen wird ein Precursor, meist ein Ton oder Rauschen, vor dem Maskierer-Zielsignal-Komplex dargeboten.

Ein wesentlicher Aspekt des Gehörs ist seine Frequenzselektivität. Um diese auszumessen, konnten sich im Laufe der Jahre unterschiedliche Methoden etablieren. Eine dieser ist unter anderem die von Patterson (1976) entwickelte Notched-Noise Methode. Hierbei dient als Maskierer ein Rauschen mit einer spektralen Lücke zentriert um das Zielsignal.

Im Vergleich zu Normalhörenden zeigen Schwerhörende eine reduzierte Frequenzselektivität des Gehörs. Dies liegt unter anderem an dem Verlust der Funktion der äußeren Haarzellen. Da der MOC-Reflex die Funktion der äußeren Haarzellen beeinflusst, können Schwerhörende sich diesem nicht bedienen. Um eine Schwerhörigkeit zu behandeln, werden meistens Hörhilfen angepasst. Diese lösen allerdings noch nicht im ausreichenden Maße das Problem der Verständlichkeit von Sprache eines Schwerhörenden in einer geräuschvollen Umgebung. Daher ist es unerlässlich die Grundlagen der Funktion des Gehörs noch besser zu verstehen, um Systeme zu etablieren, die eine Schwerhörigkeit erfolgreich behandeln.

Im Folgenden werden nun die Grundlagen, die Motivation und ein Ausblick für die mögliche Anwendung der Ergebnisse dieser Arbeit gegeben. Hierbei werden die zum Verständnis der oben genannten Zusammenhänge beschrieben und erklärt.

### **1.1. Anatomie und Physiologie des peripheren Gehörs**

Das Gehör besteht aus vier Teilen. Das äußere Ohr, das Mittelohr, das Innenohr und der Hörnerv mit den einzelnen neuronalen Ebenen der Hörempfindung. Das äußere Ohr und das Mittelohr dienen hauptsächlich der Schallweiterleitung, Impedanzanpassung und Schutzmechanismen bei hohen Schalldruckpegeln. Das Innenohr besteht aus dem Gleichgewichtsorgan und dem Hörorgan. mit der Cochlea und dem darin enthaltenen Corti-Organ.

Die Cochlea besteht aus dem Schneckengang, welcher sich zweieinhalb Mal um die eigene Achse windet. Der Schneckengang ist in drei aufeinander stehenden Räumen aufgeteilt: der Scala vestibuli, dem Ductus cochlearis und der Scala tympani. Die Scala tympani und Scala vestibuli sind am Apex der Cochlea über das Helicotrema miteinander verbunden und mit Perilymphe gefüllt. Der Ductus cochlearis wird zur Scala vestibuli von der Reissner-Membran und zur Scala tympani von der Basilarmembran (BM) mit dem darauf sitzenden Corti-Organ abgegrenzt. In dem Corti-Organ sind ca. 3500 innere und 11000 äußere Haarzellen enthalten. In einer Reihe befinden sich drei äußere und eine innere Haarzelle. Über die Haarzellen ragt die Tektorialmembran, welche Kontakt zu den Stereozilien der äußeren Haarzellen hat. Die Stereozilien der inneren Haarzellen ragen in die Endolymphe, mit welcher der Ductus cochlearis gefüllt ist und sind untereinander mit Tip-Links verbunden. (Speckmann et al. 2013).

Trifft Schall auf das Ohr, so wird seine aufgenommene Schwingung über die Gehörknöchelchenkette und das ovale Fenster auf die Perilymphe der Scala vestibuli übertragen. Die Bewegung der Perilymphe setzt sich fort und bringt dabei die Reissner-Membran in Schwingung. Aufgrund der Inkomprimierbarkeit der Endolymphe im Ductus cochlearis, überträgt sich die Auslenkung der Reissner-Membran auf die Basilarmembran in Form einer Wanderwelle (Abb. 1).



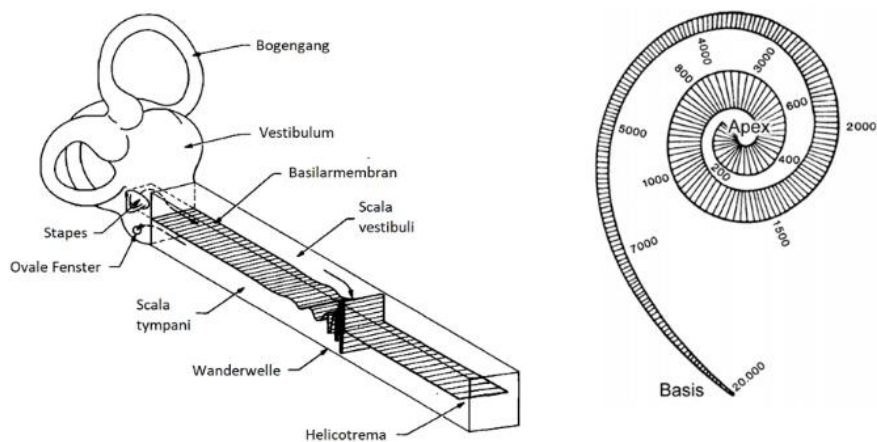


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wanderwellenbewegung (links) (Møller 2000) und der Frequenz-Ort-Transformation (rechts) (Warren 1999) in der Cochlea.

Dabei bewegt sich das Schwingungsmaximum von basal nach apikal. Aufgrund der Abnahme der Steifigkeit, steigt die Amplitude in Richtung apikal an und erreicht an der frequenzspezifischen Stelle des Stimulus (charakteristischen Frequenz, CF) ihr Maximum. Békésy entdeckte 1947 an Kadavern, dass die Wanderwelle ihre maximale Amplitude, abhängig von der Frequenz des Signals, an unterschiedlichen Stellen der BM hat (Békésy 1947). Für hohe Frequenzen ist diese an der Basis der Cochlea und für tiefe am Apex. Dies wird auch als Frequenztonotopie der Basilarmembran bezeichnet. Dabei bildet jeder Ort auf der BM eine andere Frequenz ab (Abb.1). Jeder dieser Orte auf der BM kann als ein Bandpassfilter angesehen werden, mit seiner zentralen Frequenz an dem Ort der jeweiligen CF. Aufgrund dieser Eigenschaften fungiert die BM als ein Fourier-Analysator. Signale mit unterschiedlichen Frequenzen werden durch die BM in ihre einzelnen spektralen Komponenten zerlegt. Jede Frequenz löst ihre eigene Wanderwelle mit der maximalen Auslenkung an dem Ort auf der BM ihrer CF aus.

Durch die Wanderwelle kommt es an ihrer CF zu einem Amplitudenmaximum. Es kommt zu einer Scherbewegung zwischen der BM und der Tektorialmembran, was zu einer Auslenkung der Stereozilien der äußeren Haarzellen führt. Die Bewegung der BM allein reicht nicht aus, um die Stereozilien der inneren Haarzellen ausulenken. Es kommt zu einer Dehnung der Tip-Links, was zu einer Öffnung von Transduktionskanäle führt und somit zu einer Aktivierung der äußeren Haarzelle. Hierdurch kommt es zu Konfigurationsänderungen des kontraktilen Proteins, Prestin, wodurch die äußeren Haarzellen mit der gleichen Frequenz wie die BM oszillieren und die Amplitude der Wanderwelle um ca. das 100-fache verstärkt wird. Dies führt zu einer erhöhten Sensitivität und Frequenzselektivität der Cochlea bei niedrigen bis moderaten Intensitäten (Ashmore 1987; Benser et al. 1996). Durch die aktive Verstärkung der Amplitude der Wanderwelle an ihrer CF kommt es durch die Bewegung der Endolymphe zu einer Auslenkung der Stereozilien der inneren Haarzellen. Auch hier öffnen sich Transduktionskanäle und

depolarisieren die Zelle. Es kommt zu einer schnellen Freisetzung von Glutamat in den synaptischen Spalt, welches die afferenten Nervenfasern erregt (Pickles et al. 1987).

Die Cochlea kann vereinfacht als ein System mit einem Input und einem Output gesehen werden. Das System der Cochlea verhält sich als ein nicht-lineares System. Ursache dafür ist das nicht-lineare Schwingungsverhalten der BM aufgrund der cochleären Verstärkung durch die äußeren Haarzellen. Ein lineares Verhalten der Basilarmembran, bei dem die Bewegung der BM unabhängig von der Intensität des Stimulus ist, findet sich nur bei der „passiven“ oder toten BM (Dallos 1992). Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der Bewegung der Basilarmembran in Abhängigkeit von der Intensität des Stimulus bei seiner charakteristischen Frequenz.

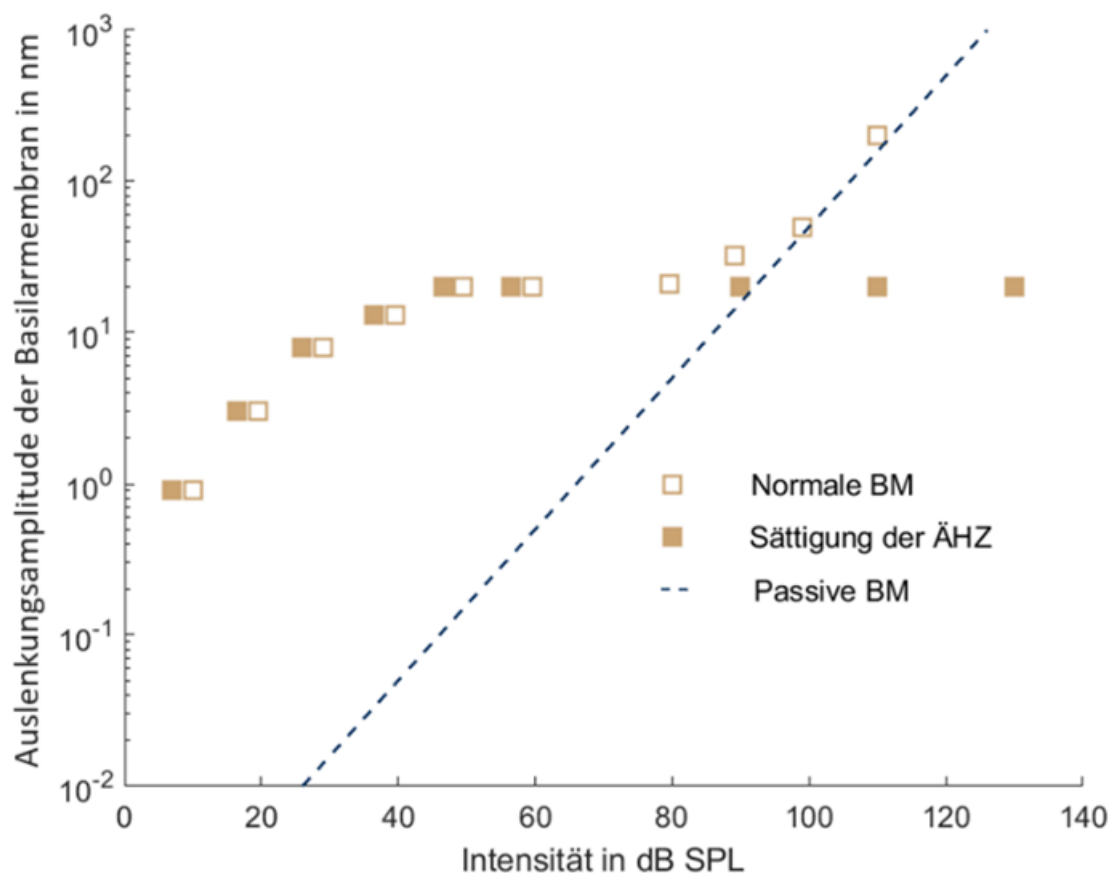


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bewegung der Basilarmembran in Abhängigkeit von der Intensität des Schalls (modifiziert nach (Johnstone et al. 1986)). Die Y-Achse zeigt die Auslenkungsamplitude der Basilarmembran in nm und die X-Achse deren Abhängigkeit von der Intensität in dB SPL des Stimulus. Die gelben gefüllten Quadrate zeigen die Auslenkungsamplitude der Basilarmembran mit Sättigung der äußeren Haarzellen (ÄHZ), ohne passive Eigenschaften der BM. Die blauen nicht gefüllten Rauten zeigen die passive Mechanik der Basilarmembran, ohne aktive Verstärkung durch die äußeren Haarzellen. Die gelben nicht gefüllten Quadrate zeigen den nichtlinearen Verlauf der Input/Output-Funktion der Basilarmembran des Normalhörenden. Deren Verlauf zeigt somit eine Kombination aus dem Verlauf der beiden anderen.

Bei Intensitäten im geringen bis moderaten Bereich kommt es zu einer aktiven Verstärkung der Bewegung der BM durch die Aktivität der äußeren Haarzellen. Darauf folgt eine Sättigung der äußeren Haarzellen, wodurch es zu keiner großen Veränderung der Amplitude der BM kommt. Es entsteht ein Sattelpunkt. Wird die Intensität weiter erhöht, so folgt ein linearer Anstieg aufgrund der „passiven“ mechanischen Eigenschaften der BM der den Ergebnissen von von Bekèsy entspricht (Pickles 2013).

Die Exzitation eines Neurons durch einen Sinuston an seiner CF kann durch einen anderen Ton inhibiert werden (Sachs und Kiang 1968). Dieser Effekt wird Zwei-Ton-Suppression genannt. Der suppressierende Ton wird Suppressor und der suppressierte Ton, Suppressee, bezeichnet. Arthur et al. konnten 1971 zeigen, dass die Exzitation eines Neurons, welches an seiner CF stimuliert wird, um mindestens 20% reduziert werden kann, wenn ein zweiter Ton außerhalb seiner Tuning-Kurve mit einer bestimmten Intensität und Frequenz dazu kommt (Arthur et al. 1971). Der schraffierte Bereich in Abbildung 3 zeigt die nötige Intensität und Frequenz des zweiten Tons, um als Suppressor zu fungieren. Aus der Abbildung kann zusätzlich geschlussfolgert werden, dass die Exzitation eines Neurons durch einen Suppressor suppressed werden kann, obwohl der Suppressor das Neuron selbst nicht erregt und kann es immer noch suppressieren, selbst wenn es in der Tuning-Kurve des Neurons liegt (Moore 2012; Pickles 2013).

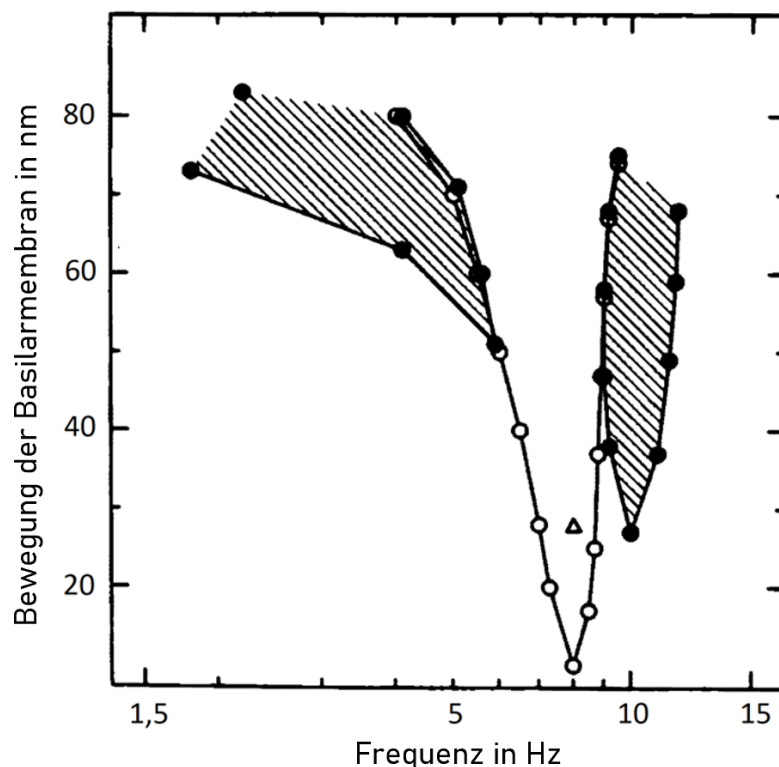


Abbildung 3: Darstellung der Bereiche in denen ein Suppressor einen Suppressee suppressiert. Die nicht-gefüllten Kreise zeigen die Tuning-Kurve eines Tones mit einer Frequenz von 8 kHz (Dreieck). Der schraffierte Bereich zeigt den Bereich, in dem ein Suppressor liegen kann, um den in der Abbildung gezeigten Suppressee zu suppressieren (modifiziert nach (Arthur et al. 1971)).

Der Suppressionseffekt endet innerhalb von ca. 0,1 Millisekunden nach dem Ende des Suppressors. Dies zeigt, dass der Mechanismus der Suppression nicht auf Ebene des Neurons, sondern auf Ebene der Basalmembran stattfindet, da 0,1 Millisekunden unter der Refraktärzeit von Neuronen liegen.

## 1.2. Das olivocochleäre System

Vom Ncl. olivaris superior geht das olivocochleäre Bündel (OCB) aus (Abb. 4). Dieser Kern enthält die ersten Neurone, welche von beiden Seiten der Hörbahn Afferenzen erhalten. Sie erhalten von Schall induzierte Signale vom Ncl. cochlearis und Signale aus höheren Ebenen des ZNS (Guinan 2018). Der Ncl. olivaris superior teilt sich in drei Anteile auf. Einem medialen, einem lateralen und dem Trapezkörper (Møller 2000). Das OCB geht hauptsächlich vom medialen und lateralen ab. Man unterscheidet das mediale olivocochleäre Bündel (MOCB) und das laterale olivocochleäre Bündel (LOCB).

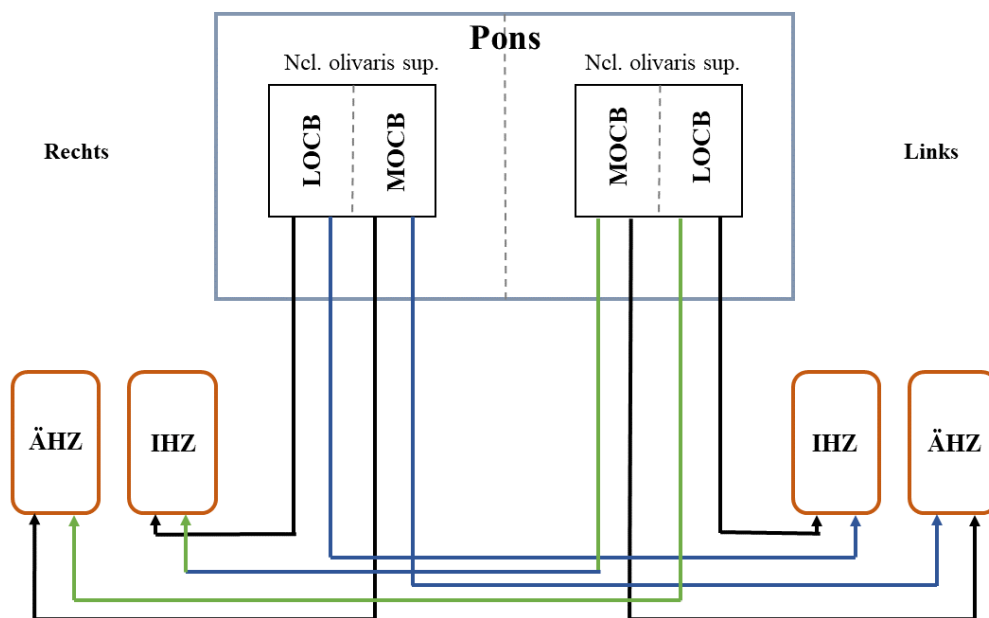


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Verlaufs des olivocochleären Bündels. Die schwarzen Linien zeigen die ipsilateralen OCB's, die grünen und blauen die kreuzenden OCB's. IHZ steht für die inneren Haarzellen und ÄHZ für die äußeren Haarzellen.

Das MOCB geht von Zellen des medialen superioren Olivenkomplexes ab und endet hauptsächlich kontralateral an der Basis der äußeren Haarzellen der Cochlea (Pickles 2013). Deren Zellkörper sind groß und haben dicke myelinisierte Axone (Guinan et al. 1983). Das LOCB geht von Zellen des lateralen superioren Olivenkomplexes aus und enden hauptsächlich ipsilateral im Bereich der inneren Haarzellen, welche Synapsen zu den Dendriten der Afferenzen der inneren Haarzellen bilden (Warr et al. 1997). Die Zellkörper des LOCB sind eher klein und die Axone sind dünn und unmyelinisiert (Guinan et al. 1983). Die Anteile an Faser und die Anzahl an Neuronen unterscheiden sich je nach Spezies. In Katzen und

Mäusen ist das Verhältnis zwischen MOCB und LOCB 65% zu 35% (Warr 1992; Campbell und Henson 1988) und beim Menschen 70% zu 30% (Arnesen 1984).

Die Reaktion der Cochlea auf Schall wird auf Ebene der äußeren Haarzellen durch den medialen olivocochleären Reflex (MOC-Reflex) modifiziert, der durch Schall aktiviert wird (Guinan 2018). Die Neurone in der Cochlea senden das Signal über ihre Axone in den posteroventralen Teil des Ncl. cochlearis, welcher wiederum das Signal zum medialen Teil des Ncl. olivaris superior auf der ipsi- und kontralateralen Seite im Hirnstamm sendet. Von dort zieht das MOCB über den N. vestibulocochlearis zurück in die Cochlea und bildet Synapsen an der Basis der äußeren Haarzellen (Pickles 2013). Zusätzlich erhalten die Neurone des MOCB Efferenzen aus höheren Ebenen des ZNS, welche Einfluss auf dem MOC-Reflex nehmen (Guinan 2018). Das MOCB bildet an der Basis der äußeren Haarzellen eine Synapse, welche diese durch die Ausschüttung von Azetylcholin beeinflusst (Eybalin 1993). Azetylcholin bindet an Alpha 9/10 nikotinerge Azetylcholin-Rezeptoren, wodurch es zu einem Kalziumeinstrom kommt (Wersinger und Fuchs 2010). Kalzium wirkt als sekundärer Messenger und führt unter anderem zu einer Verringerung der Steifigkeit der äußeren Haarzelle durch die Modifikation der Motilität des Zytoskeletts (Dallos et al. 1997). Durch den Einstrom von Kalzium kommt es durch die kalziuminduzierte Aktivierung von Kalium-Kanälen (SK2) zu einer Hyperpolarisation (Oliver et al. 2000). Eine Hyperpolarisierung erzeugt eine geringere Motilität der äußeren Haarzellen, was zu einer Verringerung der cochleären Verstärkung und Kompression und damit zu einer Linearisierung der Input/Output Funktion der Cochlea führt. Dies konnte im Tierversuch, physiologisch und psychoakustisch gezeigt werden (Murugasu und Russel 1996; Robles and Ruggero 2001; Frolenkov 2006; Krull and Strickland 2008; Jennings et al. 2009; Yasin et al. 2014).

Das olivocochleäre System (OCS) soll eine schützende Funktion für die Cochlea ausüben. Einige Studien zeigen, dass durch eine Aktivierung des OCS der Schaden an der Cochlea durch akustische Traumata verringert wird (Rajan 1988; Kujawa and Liberman 1997; Reiter and Liberman 1995; Maison and Liberman 2000). Allerdings gibt es auch Studien, die keinen schützenden Effekt des OCS auf die Cochlea zeigen (Hildesheimer et al. 1990; Liberman 1991). Kirk und Smith stellten sich die Frage, was für einen evolutionären Sinn der efferente Effekt des OCS auf die Cochlea haben könnte. Sie verglichen verschiedene Arbeiten zu diesem Thema und zeigten, dass in den meisten Arbeiten der akustische Stimulus, der zu einem akustischen Trauma der Cochlea führen sollte, eine Intensität von 100 bis 150 dB SPL hatte. Ihnen ist aufgefallen, dass die normale Umweltgeräuschkulisse selten eine Intensität von 70 dB SPL überschreitet. Sie folgten daraus, dass die evolutionäre Bedeutung dieses Systems hauptsächlich der Schutz der Cochlea vor nicht-traumatischen Signalen sein müsste (Kirk und Smith 2003). Maison et al. zeigten, dass bei Tieren, in denen das OCB geschädigt wurde, der Verlust von cochleären Synapsen um 40% höher ist im Vergleich zu normalen Tieren. Als akustischen Stimulus verwendeten sie ein Signal mit einer Intensität von 84 dB SPL, welches eine geringere Intensität als die

meisten Umweltgeräuschkulissen darstellt (Maison et al. 2013). Ähnliche Ergebnisse lieferten auch (Lieberman et al. 2014). Sie trennten in Mäusen chirurgisch die Efferenzen zur Cochlea und beobachteten den Verlust von Synapsen in der Cochlea. Auch sie konnten zeigen, dass dieser bei Mäusen ohne Efferenzen um einiges höher ist. Vergleichbare Erkenntnisse lieferten auch (Chumak et al. 2016). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass aus evolutionärer Sicht, die schützende Funktion des OCS auf die Cochlea eher für Intensitäten im "nicht-traumatischen" Bereich liegt. Für Reviews siehe (Kirk und Smith 2003; Fuente 2015).

Die Beeinflussung der Sprachverständlichkeit in geräuschvollen Umgebungen ist ein stark diskutiertes Thema in der Literatur. Grundlage für die Vermutung ist der Effekt des "Anti-Masking" durch den MOC-Reflex (Kawase et al. 1993). Giraud et al. konnten zeigen, dass der MOC-Reflex einen Anti-Masking-Effekt auf die Verständlichkeit von Sprache in geräuschvollen Umgebungen hat. Sie verglichen Patienten, die eine vestibuläre Neurotomie erhalten haben mit gesunden Probanden. Dabei fiel auf, dass bei Aktivierung des MOC-Reflexes mittels kontralateraler akustischer Stimulation die Sprachverständlichkeit in geräuschvollen Umgebungen, im Gegensatz zu der von gesunden Probanden, nicht verbessert wird (Giraud et al. 1997). Andere Studien kamen zu vergleichbaren Ergebnissen (May und McQuone 1995; Hienz et al. 1998). Scharf et al. oder auch Morand-Villeneuve et al. konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen vestibulär neurektomierten Patienten und gesunden Probanden in einem ähnlichen Experiment finden (Scharf et al. 1997; Morand-Villeneuve et al. 2002). In einem psychoakustischen Experiment konnten Wagner et al. zeigen, dass der MOC-Reflex die Sprachverständlichkeit in einer geräuschvollen Umgebung signifikant nicht verbessert (Wagner et al. 2008). Gegensätzliche Ergebnisse zeigten Mertes et al. in einem ähnlichen Experiment (Mertes et al. 2019). Zusammenfassend kann man sagen, dass der Einfluss des OCS auf die Sprachverständlichkeit noch weitgehend unklar ist.

### **1.3. Grundlagen der Psychoakustik**

Die Psychoakustik beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie akustische Reize die Hörwahrnehmung beeinflussen. Dabei werden Methoden entwickelt, um Hörempfindungen, die durch akustische Reize entstehen, zu messen. Hierbei können messbare physikalische Skalen mit Empfindungsgrößen in Bezug gebracht werden und somit objektiviert werden. Am häufigsten werden Reizschwellen gemessen. Hierbei handelt es sich um die geringste Reizschwelle durch einen akustischen Reiz, der noch zu einer Hörempfindung führt. Ein großer Schwerpunkt in der Psychoakustik widmet sich der Maskierung. Maskierung spielt in unserem Leben eine große Rolle und kommt in unterschiedlichen Situationen unseres Lebens vor. Führt man beispielsweise mit jemandem in einer ruhigen Umgebung eine Unterhaltung, so kann man sich bei normaler Lautstärke verstehen. Befindet man sich nun in einer geräuschvollen Umgebung, zum Beispiel auf einer Party oder an einer Baustelle, so kann man die Person schlechter oder gar nicht mehr verstehen. Der Umgebungslärm verdeckt/maskiert die Sprache des

Gesprächspartners. Nun muss entweder lauter gesprochen oder die Geräuschkulisse leiser gemacht werden, um den Partner wieder zu verstehen. Die Untersuchung von Maskierungs-Effekten findet besonders in der Psychoakustik Anwendung. Maskierungseffekte entstehen, wenn ein Zielsignal durch ein anderes Signal, ein Maskierer (bspw. ein Ton, komplexe Töne oder Rauschen), verdeckt wird. Dadurch steigt die nötige Intensität des Zielsignals, an der es wahrgenommen werden kann. Als Schwellenwert kann z.B. diese nötige Intensität dienen, gemessen und interpretiert werden.

Es werden hauptsächlich drei Arten von zeitlicher Maskierung unterschieden: Vorverdeckung, Simultanverdeckung und Nachverdeckung. Abbildung 5 zeigt schematisch den Verlauf der Schwellenwerte zwischen einem kurzen Zielsignal (nicht gezeigt) und einem Maskierer (in rot).

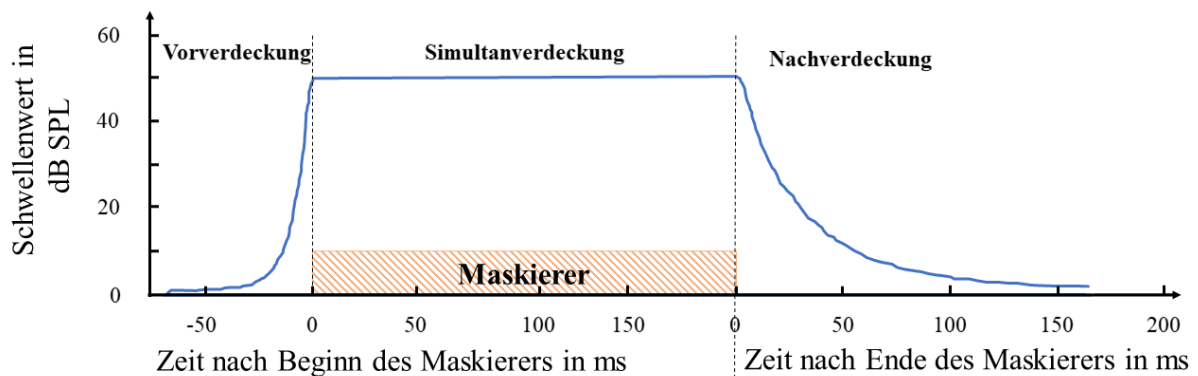


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Verlaufs der Schwellenwerte eines Zielsignals in Abhängigkeit von der Art des Maskierers und des Intervalls zwischen Zielsignal und Maskierer. Die Y-Achse zeigt den Schwellenwert in dB SPL und die X-Achse die Zeit vor und nach Beginn des Maskierers in ms. Die blaue Kurve zeigt die Schwellenwerte und das orangene Rechteck den Maskierer. Die vertikalen gestrichelten Linien zeigen den Beginn und das Ende des Maskierers. An der Stelle der gestrichelten Linien beginnt die Zeit erneut bei 0 (modifiziert nach (Zwicker und Fastl 1999)).

Wird ein Zielsignal einer bestimmten Frequenz zur gleichen Zeit von einem anderen Signal (Maskierer) verdeckt, spricht man von Simultanverdeckung. Dabei ist der Schwellenwert des Zielsignals unter anderem abhängig von der Intensität des Maskierers und der Dauer des Zielsignals. Je länger die Dauer des Zielsignals, desto leichter ist dieses zu hören und der Schwellenwert sinkt. Steigt die Intensität des Maskierers, so steigt der Schwellenwert, an dem das Zielsignal zu hören ist. Einen Einfluss nimmt auch der Zeitpunkt, an dem das Zielsignal im Maskierer beginnt. So kann er am Anfang, in der Mitte oder am Ende des Maskierers beginnen. Als „Overshoot“ wird zum Beispiel eine Erhöhung der Schwelle eines kurzen Zielsignals am Anfang eines Breitband-Maskierer bezeichnet. Von Nachverdeckung spricht man, wenn der Maskierer vor dem Beginn des Zielsignals endet. Vorverdeckung entsteht, wenn das Zielsignal vor dem Beginn des Maskierers endet.

Der Einfluss der Maskierung auf den Schwellenwert hängt, neben der Intensität des Maskierers, von der Dauer des Zielsignals und der zeitlichen Position des Zielsignals, relativ zum Maskierer, auch von einer Reihe anderer Parameter ab. Ein für die Arbeit wichtiger Parameter ist die interaurale Charakteristik von Zielsignal und Maskierer. Wird zum Beispiel auf beide Ohren ein diotisches Rauschen ( $N_0$ ) und ein diotisches Zielsignal ( $S_0$ ) gegeben, so stellt sich ein bestimmter Schwellenwert ein, an dem das Zielsignal gerade noch gehört wird. Wird nun das Zielsignal in seiner Phase in einem Ohr relativ zum anderen verändert, z.B. um  $180^\circ$  oder  $\pi$  ( $S_\pi$ ), so sinkt die Effektivität des Maskierers das Zielsignal zu verdecken und das Zielsignal wird leichter hörbar. Dies führt zu einer Verringerung des Schwellenwertes. Die Differenz zwischen den Schwellenwerten der diotischen ( $N_0S_0$ ) und dichotischen ( $N_0S_\pi$ ) Kondition wird als binauraler Gewinn oder Englisch „Binaurale Masking Level Difference“ (BMLD) bezeichnet und ist frequenzabhängig. Sie reicht dabei zwischen 25 dB bei kleinen Frequenzen mit Schmalbandrauschen und 15 dB mit Breitbandrauschen bis zu wenigen dB bei hohen Frequenzen (Zurek und Durlach 1987; van de Par und Kohlrausch 1999; Verhey und van de Par 2018). Bei Frequenzen über 1500 Hz sinkt die BMLD auf Werte von 2-3 dB, wenn das Zielsignal durch Breitbandrauschen maskiert wird (Durlach und Colburn 1978). Dies trifft aber nicht immer zu. Van de Par und Kohlrausch haben gezeigt, dass bei hohen Frequenzen durch Schmalbandrauschen auch eine größere BMLD erzielt werden kann. Somit zeigt dies nicht nur eine Frequenzabhängigkeit, sondern auch eine Abhängigkeit von der Bandbreite des Maskierers. Die BMLD wird mit kleiner werdender Bandbreite größer (van de Par und Kohlrausch 1999). Dennoch ist der Trend zu erkennen, dass die BMLD bei kleinen Frequenzen des Zielsignals am größten ist.

Die BMLD kann neben der Frequenzabhängigkeit auch durch andere Faktoren beeinflusst werden. Dazu gehört beispielsweise die Dauer oder Veränderung der spektralen Intensität des Maskierers während der simultanen Präsentation. Wenn die Dauer des Maskierers zunimmt, kann die BMLD ebenfalls ansteigen. Wenn die Dauer des Zielsignals steigt, sinken die Schwellenwerte von  $N_0S_0$  und  $N_0S_\pi$ . Die BMLD bleibt konstant. Eine Erhöhung der spektralen Intensität des Maskierers führt ebenfalls zu einer Steigerung der BMLD (Zwicker und Fastl 1999).

Eine besondere Eigenschaft des peripheren auditorischen Systems ist ihre Frequenzselektivität. Durch die Frequenzselektivität ist es möglich ein Signal einer Frequenz in der Anwesenheit anderer Signale anderer Frequenzen zu identifizieren. Das periphere auditorische System kann als eine Reihe sich überlappender Bandpassfilter betrachtet werden, mit jeweils einer eigenen zentralen Frequenz, wodurch jede hörbare Frequenz abgedeckt wird (Moore 2012). Dadurch kann der akustische Stimulus in seine spektralen Komponenten aufgespalten werden (Patterson und Nimmo-Smith 1980; Helmholtz 1981; Jennings und Strickland 2012a).

Maskierungsexperimente können genutzt werden, um die Frequenzselektivität des Gehörs zu charakterisieren. Dabei werden für diese Experimente Maskierer konstruiert, um die Charakteristik von



Filtern im Gehör darzustellen. Meistens handelt es sich um einen Ton oder ein Rauschen, welcher auf einen bestimmten Frequenzbereich beschränkt ist.

Wird ein Zielsignal durch ein Maskierer verdeckt, so steigt die nötige Intensität des Zielsignals, um noch wahrgenommen werden zu können. Ein Maskierer verdeckt das Zielsignal dabei umso besser, je geringer das Frequenzintervall zwischen dem Zielsignal und dem Maskierer ist. Anscheinend ist das Frequenzauflösungsvermögen des Gehörs nicht ausreichend genug, um an diesem Punkt beide Signale einzeln aufzulösen. Dieser Bereich wird als eine spektrale Filterung des Gehörs interpretiert, wodurch es über Maskierungsexperimente möglich ist, das Frequenzauflösungsvermögen und somit auch die Charakteristik solcher auditorischen Filter zu untersuchen (Zwicker und Fastl 1999; Moore 2012).

Es wird vermutet, dass hinter dem Mechanismus der Maskierung eine Überladung an neuronaler Aktivität durch den Maskierer steckt. Die Energie des Maskierers erzeugt im auditorischen Filter des Zielsignals eine neuronale Aktivität. Wird nun das Zielsignal eingeschaltet, so führt das Zielsignal zu keiner signifikanten Erhöhung der neuronalen Aktivität, wodurch das Zielsignal nicht mehr identifiziert werden kann (Moore 2012).

Filter werden in psychoakustischen Experimenten benutzt, um das Spektrum von Signalen zu verändern. Es lassen sich verschiedene Filter-Typen unterscheiden. Bandpass-Filter haben in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung. Ein Bandpass-Filter hat zwei Abschnidefrequenzen, welche oberhalb der höheren der beiden Abschnidefrequenzen und unterhalb der niedrigeren der Abschnidefrequenzen die Frequenzkomponenten abschwächt.

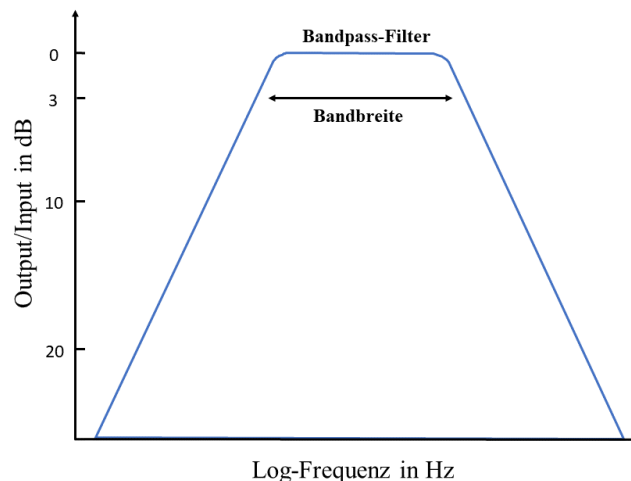


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Bandpass-Filters. Die Y-Achse zeigt den Quotienten zwischen Output und Input in dB und die X-Achse die Frequenz in Hz auf einer logarithmischen Skala (modifiziert nach (Moore 2012)).

Bei einem idealen Filter werden die Frequenzen nach der Abschnidefrequenz vollständig unterdrückt. Das heißt, dass keine Frequenzen nach der Abschnidefrequenz durch den Filter durchgelassen werden. In der Realität werden die Frequenzen, je weiter sie von der Abschnidefrequenz entfernt sind, immer stärker reduziert. Die Abschnidefrequenz wird an dem Punkt definiert, an dem der Output des Filters um 3 dB reduziert worden ist. Bei einem Bandpassfilter wird der Abstand zwischen zwei Abschnidefrequenzen als Bandbreite des Filters bezeichnet. Häufig wird der Begriff "Zentrale Frequenz" bei der Beschreibung von Filtern verwendet. Dabei handelt es sich bei symmetrischen Filtern um die Frequenz in der Mitte des Filters.

In der Psychoakustik haben sich zur Charakterisierung von Filtern äquivalente rechteckige Bandbreiten (engl. Equivalent Rectangular Bandwidth, ERB) etabliert. Die ERB eines Filters ist dabei genau so groß wie die Bandbreite eines idealen rechteckigen Filters. Wird dem hypothetischen rechteckigen Filter weißes Rauschen präsentiert, so lässt dieser genauso viel Rauschen passieren, wie der reale Filter (Hartmann 2005). Die ERB's können graphisch erstellt werden, indem die relative Intensität gegen die Frequenz in Hz in einem linearen System geplottet werden. Die maximale Höhe des Filters entspricht der realer Filter. Die ERB wird so angepasst, dass das Integral unter dem rechteckigen Filter genauso groß ist, wie das des realen Filters (Abb. 7) (Moore 2012).

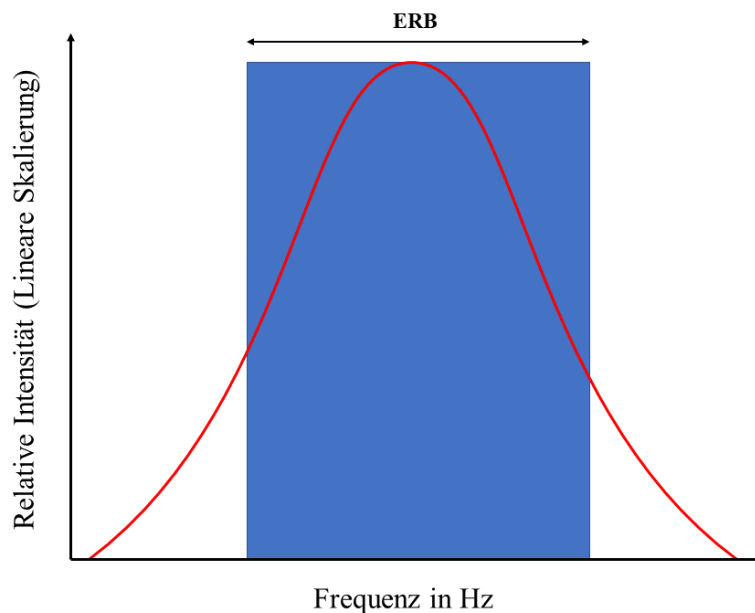


Abbildung 7: Schematische Darstellung der graphischen Erstellung eines rechteckigen Filters mit einer äquivalenten rechteckigen Bandbreite (ERB). Die Y-Achse zeigt die relative Intensität (Lineare Skalierung) und die X-Achse die Frequenz in Hz. Das blaue Rechteck zeigt den rechteckigen Filter und der die rote Kurve eine schematische Darstellung eines realen Filters. Der Flächeninhalt des rechteckigen Filters und realen Filters ist gleich groß.

In der Psychoakustik gibt es mittlerweile unterschiedliche Methoden zur Charakterisierung auditorischer Filter. Zwei für diese Arbeit relevante Methoden seien im Folgenden dargestellt.

Eine Methode zur Charakterisierung der auditorischen Frequenzselektivität ist das im Jahre 1940 von entwickelte Bandbreiten-Experiment (Fletcher 1940). Es wird der Schwellenwert eines Zielsignals (z.B. ein Sinuston) in Abhängigkeit von der Bandbreite eines Bandpass-Maskierers mit der Mittenfrequenz des Sinustons bestimmt (Abb. 8).

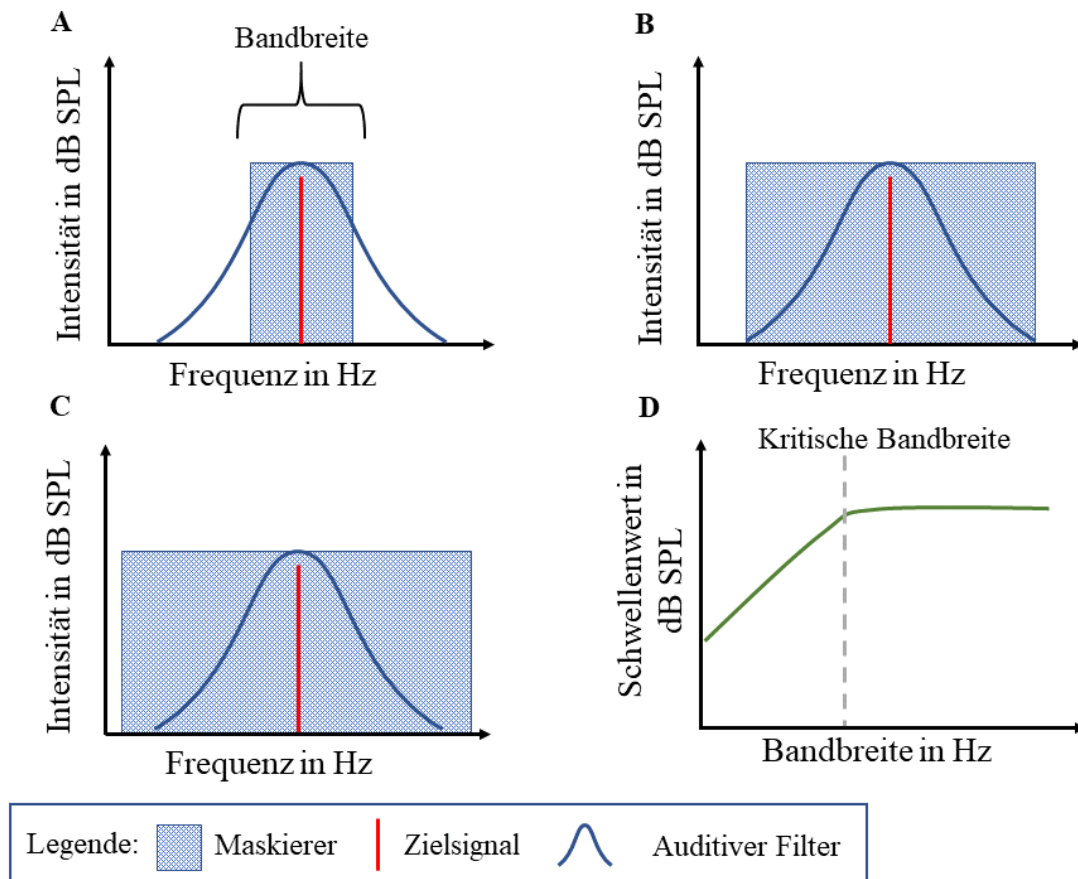


Abbildung 8: Schematische Darstellung von Fletchers Bandbreiten-Experiment. A, B und C zeigen das Experiment, D zeigt die dadurch erhaltenen Schwellenwerte in Abhängigkeit von der Bandbreite des Maskierers. Die rote durchgezogene Linie zeigt das Zielsignal, die blau gefüllten Rechtecke den Maskierer und die dunkelblaue Parabel eine schematische Darstellung des auditorischen Filters.

Der Maskierer hat eine konstante spektrale Leistungsdichte, wodurch sich die Energie des Maskierers mit zunehmender Bandbreite erhöht. Bei jeder Verdopplung der Bandbreite des Maskierers erhöht sich die Maskiererenergie um 3 dB. Je größer die Bandbreite des Maskierers, desto höher wird der Schwellenwert, da mehr Energie des Maskierers in den auditorischen Filter des Zielsignals fällt. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird größer. Ab einer bestimmten Bandbreite lässt sich der Schwellenwert nicht mehr erhöhen, da nun der maximale Anteil der Energie des Maskierers den Filter passiert (Schooneveldt and Moore 1989). Dieser Punkt wird, insbesondere im englischen Sprachraum, „kritische Bandbreite“ (critical bandwidth) genannt. Teil D der Abbildung 8 zeigt schematisch die Ergebnisse eines

solchen Experimentes. Die grüne Kurve zeigt den Schwellenwert des Zielsignals in Abhängigkeit von der Bandbreite des Maskierers. An dem Ort mit der vertikalen gestrichelten Linie, ist die Bandbreite erreicht, an dem der Schwellenwert sich nicht mehr verändert (Kritische Bandbreite). Auf Grundlage dieser Erkenntnis leitete Fletcher das Power-Spektrum Model ab. Wird ein Zielsignal (z.B. ein Ton) durch ein Geräusch maskiert, wird ein Filter zur Detektion des Zielsignales benutzt, dessen Mittenfrequenz in der Nähe der Frequenz des Zielsignales liegt. Nur Zielsignale und Maskierer, die im Frequenzbereich des Filter liegen, können den Filter passieren und nur der Frequenzbereich des Maskierers, der im Frequenzbereich des Filters liegt, kann das Zielsignal maskieren (Moore 2012). Zwicker bestimmte die Frequenzgruppenbreiten (im deutschen Raum verbreiteter Begriff für "Kritische Bandbreite") für verschiedene Mittenfrequenzen und stellte damit die Bark-Skala auf (Zwicker 1961). Bis zu einer Mittenfrequenz von 500 Hz behalten die Frequenzgruppenbreiten einen Wert von 100 Hz. Ab 500 Hz steigen sie an und entsprechen vereinfacht 20% der Mitten-Frequenz (Zwicker und Fastl 1999).

Eine weitere Methode ist die im Jahre 1976 von Patterson entwickelte Notched-Noise Methode (Patterson 1976). Diese ist in der Lage, ohne den Einfluss von Off-Frequency Listening, auditorische Filter zu bestimmen. Dies unterscheidet sie von der Methode von Fletcher.

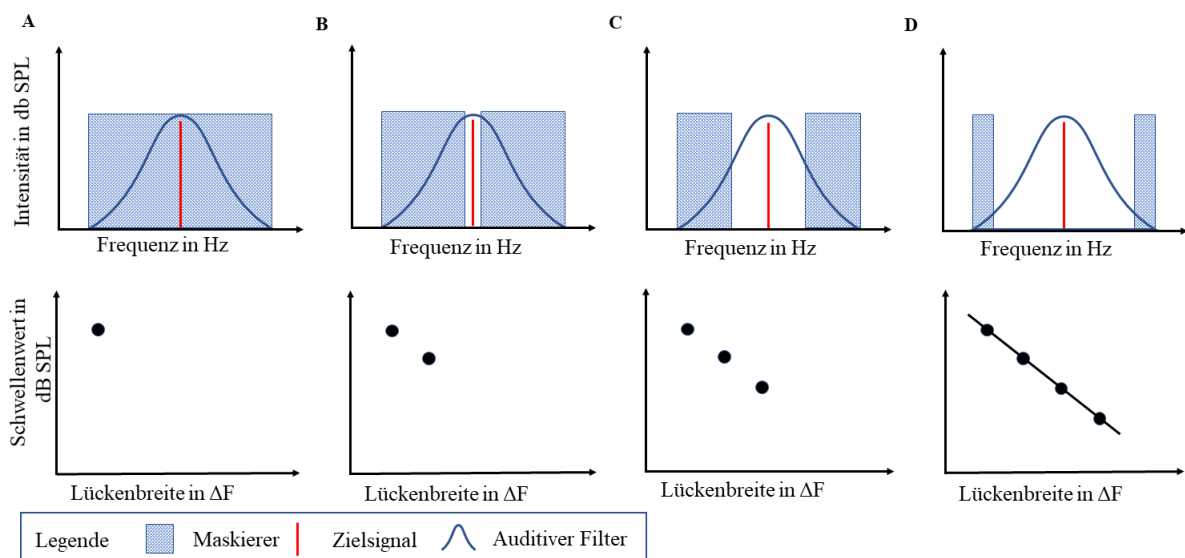


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Notched-Noise Methode. Die obere Zeile zeigt die Methode und die untere Zeile die Schwellenwerte in Abhängigkeit von der Breite der Lücke des Maskierers. Die rote durchgezogene Linie zeigt das Zielsignal, die blau gefüllten Rechtecke den Maskierer und die dunkelblaue Parabel eine schematische Darstellung des auditorischen Filters. Von A nach D nimmt die spektrale Lücke des Maskierers zu.

Abbildung 9 zeigt eine schematische Darstellung der Notched-Noise Methode. Ein Zielsignal einer festen Frequenz wird von einem Maskierer mit einer spektralen Lücke (engl. Notched-Noise Masker) maskiert. Die Mitte der Lücke hat dieselbe Frequenz wie das Zielsignal. Nun werden die Schwellenwerte

des Zielsignals, in Abhängigkeit von der Größe der Lücke im Maskierer, gemessen. Je größer die Lücke des Maskierers wird, desto weniger Energie des Maskierers passiert den auditorischen Filter. Dies ist durch die schraffierte Fläche unter der Kurve dargestellt. Dadurch, dass nun weniger Energie den Filter passiert, verbessert sich das Signal-Rausch-Verhältnis im Output des Filters und der Schwellenwert sinkt. Daraus lässt sich schließen, dass der ermittelte Schwellenwert das Signal-Rausch-Verhältnis widerspiegelt und somit die Fläche unter der Filterkurve in Abhängigkeit von der Maskierlückenbreite abbildet (Moore 2012). Daher kann die Steigung der Schwellenwerte in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers auf die Breite des Filters hindeuten. Eine größere Steigung der Kurve würde auf einen schmalen Filter hindeuten. Im Gegensatz zu Fletchers Experiment kann durch die Notched-Noise Methode auf die Form der Filter geschlossen werden, wohingegen durch Fletchers Methode nur die effektive Bandbreite der Filter abgeschätzt werden kann (Verhey und van de Par 2018). Durch die simultane Aktivität des Maskierers auf beiden Schenkeln des auditorischen Filters, kann Off-Frequency Listening minimiert werden. Das auditorische System kann als eine Reihe überlappender Filter angesehen werden. Es wäre möglich, dass das auditorische System einen Vorteil darin hat, nicht den Filter mit einer CF des Zielsignals zu benutzen, sondern einen der überlappenden Filter in der Nähe des Zielsignals. Durch die Notched-Noise Methode werden auditorische Filter in der Nähe des Filters des Zielsignals anteilig mehr mit Rauschen stimuliert, als der Filter mit der CF des Zielsignals. Dadurch ist das Signal-Rausch-Verhältnis des Filters des Zielsignals besser als das der anderen Filter, wodurch eine Benutzung der anderen Filter weniger von Vorteil ist (Jennings und Strickland 2012a).

Durch die Zentrierung des Notched-Noise Maskierers an die Frequenz des Zielsignals, ist es streng genommen nur möglich symmetrische Filter zu bestimmen. In der Realität sind diese jedoch häufig asymmetrisch. Um diese Asymmetrien zu bestimmen, kann die Zentrierung des Notched-Noise Maskierers versetzt werden. Dazu gibt es zahlreiche Untersuchungen (Patterson und Moore 1986; Glasberg und Moore 1990).

Anhand der Notched-Noise Methode stellten Moore und seine Kollegen zahlreiche Studien an, um neben der Charakterisierung der Filter auch neue Bandbreiten der Filter zu bestimmen. Diese weichen von der Bark-Skala ab. Die sind kleiner und sind auch unter 500 Hz noch frequenzabhängig (Hartmann 2005). Diese wird in der Literatur auch ERB-Skala genannt.

In der vorliegenden Arbeit sollen psychoakustische Maskierungsexperimente zur Charakterisierung des MOC-Reflexes bei der binauralen Verarbeitung genutzt werden. Psychoakustische Studien (Strickland 2004; Strickland 2008; Yasin et al. 2014) und Studien zu otoakustischen Emissionen (OAE) (Kim et al. 2001; Backus und Guinan 2006) haben schon den Einfluss des MOC-Reflexes auf die Detektierbarkeit eines üblicherweise monauralen Zielsignals untersucht. Dafür wurde meistens ein Vorsignal genutzt, um den MOC-Reflex zu aktivieren.

OAE's definiert man im allgemeinen als Signale, die durch die Aktivität der äußeren Haarzellen erzeugt und durch feine Mikrophone im Gehörgang gemessen werden können. Kontralaterale akustische

Suppression (engl. contralateral acoustic suppression, CAS) ist ein Phänomen, welches die Amplitude von OAE's verringert. Sie wird durch die Präsentation eines kontralateralen Signals auf das Ohr erzeugt und kann im ipsilateralen Ohr gemessen werden (Veuille et al. 1991; Berlin et al. 1994). Die CAS führt zu einer Aktivierung des MOC-Reflexes, verändert die Mechanik der äußeren Haarzellen und somit zu einer Suppression der OAE's (Maison et al. 1999).

Psychoakustische Methoden zur Bestimmung eines Effektes des MOC-Reflexes bestehen in der Regel aus drei Komponenten. Sie bestehen aus einem Zielsignal, dessen Schwellenwert bestimmt wird und einem Maskierer, der das Zielsignal maskiert. Zur Aktivierung des MOC-Reflexes wird meist ein Vorsignal (Precursor) vor dem Signal-Maskierer-Komplex präsentiert (Aufbau eines Maskierers und Vorsignals kann in den Methoden nachgelesen werden). Dabei ist es wichtig den richtigen Abstand zwischen dem Vorsignal und dem Signal-Maskierer-Komplex zu wählen. Der Beginn des MOC-Reflexes im Menschen hat eine Verzögerung von 20 und 40 ms und eine Dauer, zwischen Anstieg und Abfall, von 280 ms (Backus und Guinan 2006). Andererseits sollte der Abstand nicht zu klein gewählt werden, um den Effekt der Nachverdeckung des Precursors auf das Zielsignal zu erhöhen (Verhey et al. 2017). Studien zeigen, dass ein Precursor die cochleäre Verstärkung, Kompression und die Frequenzselektivität verändern kann (Guinan und Gifford 1988; Strickland 2004; Strickland 2008; Yasin et al. 2014). In einer Studie von (Yasin et al. 2014) konnte gezeigt werden, dass die Aktivierung des MOC-Reflexes durch das Einschalten eines Precursors ( $\geq 40$  dB SPL) vor dem Zielsignal zu einer Verringerung der maximalen cochleären Verstärkung und Kompression führt. Dies linearisiert die Funktion der Cochlea für Precursor-Intensitäten von 50–70 dB SPL. In der Vergangenheit gab es nicht wirklich Untersuchungen zum Einfluss des MOC-Reflexes auf das binaurale Hören. Sie nutzten keine spezifischen Precursor, sondern andere Maskierungssignale vor dem Zielsignal und betitelten dies als „Nachverdeckungs-Geräusche“. Dies könnte schon in damaligen Studien, wenn auch nicht gewollt, zur Aktivierung des MOC-Reflexes geführt haben und die Ergebnisse dahingehend interpretierbar gemacht haben. In einer Studie wurde in einem Simultanverdeckungs-Experiment gezeigt, dass in einer  $N_0S_\pi$  Kondition das Zielsignal besser detektierbar war, wenn das Geräusch (Precursor) vor dem Beginn des Zielsignals eingeschaltet wurde (McFadden 1966). Ähnliches zeigten auch (Yost 1985) und (Gilkey et al. 1990). Yasin und Henning untersuchten den Einfluss des Effektes von Vor- und Nachverdeckung auf ein simultanverdecktes Zielsignal und die BMLD. Sie nahmen an, dass der dahinterliegende Effekt auf die Nutzung mehrerer Strategien beruht. Unter anderem soll es zu einer Nutzung mehrerer auditorischen Filter und einer Verringerung der cochleären Verstärkung durch das Geräusch gekommen sein (Yasin und Henning 2012).

Verhey et al. untersuchten 2017 den Einfluss des MOC-Reflexes auf die binaurale Frequenzselektivität mit einem Paradigma, das dem von Yasin et al. ähnelte, d.h., in dem ein Precursor zur expliziten Auslösung des MOC-Reflexes vor einem Zielsignal-Maskierer-Komplex dargeboten wurde. Es wurden Schwellenwerte eines 1000 Hz Zielsignals gemessen, welches von einem diotischen Maskierer ohne oder mit spektraler Lücke mit einer Dauer von 25 ms verdeckt worden ist. Das Zielsignal wurde sowohl

diotisch ( $S_0$ ) als auch dichotisch ( $S_\pi$ ) präsentiert. Maskierer und Zielsignal wurden simultan dargeboten. Um den MOC-Reflex zu aktivieren, wurde ein Breitband-Precursor mit einer Dauer von 325 ms vor dem simultanen Signal-Maskierer-Komplex präsentiert. Sie zeigten, dass der Precursor die Frequenzselektivität reduziert. Dabei war der Einfluss des Precursors bei der Kondition mit einem dichotischen Zielsignal geringer als bei einem diotischen Zielsignal. Die Autoren vermuteten einen spezifischen Effekt des MOC-Reflexes auf das binaurale System. Allerdings war der Unterschied zwischen den Messwerten der diotischen und dichotischen Zielsignale nicht groß. Gründe hierfür könnten die tiefe Frequenz von 1000 Hz und die kurze Zielsignaldauer von 25 ms gewesen sein. Zusätzlich war es nicht möglich, aufgrund der Simultanmaskierung, Suppressionseffekte der Cochlea von Maskierungseffekten zu trennen, welche direkten Einfluss auf die Frequenzselektivität gehabt haben könnten. Dies könnte unter anderem dazu geführt haben, dass der Precursor einen geringeren Einfluss auf das binaurale System hatte. Auch wurde gezeigt, dass der Precursor selbst das Zielsignal (auch ohne Maskierer) verdeckt hatte (Verhey et al. 2017).

#### **1.4. Schwerhörigkeit**

Studien aus der Physiologie zeigten, dass die Basilarmembran in der Cochlea gesunder Menschen für akustische Signale an ihrer CF eine starke Kompression zeigt. Untersuchungen an Schwerhörenden zeigten, dass ein Verlust oder Reduktion dieses Mechanismus zu einer größeren Steigung von Lautheit, einer reduzierten Frequenzselektivität, einer verlängerten Nachverdeckung und einer Verlängerung der kleinsten detektierbaren Pausendauer in Schmalbandrauschen, führt (Rosengard et al. 2005). Schwerhörende haben das Problem, sich in einer Kulisse mit unterschiedlichen Geräuschen aus unterschiedlichen Richtungen zurechtzufinden. Im Vergleich zu Normalhörenden haben sie Schwierigkeiten, sich auf einen Stimulus in einer geräuschvollen Umgebung zu konzentrieren (Bronkhorst und Plomp 1992; Peissig und Kollmeier 1997). Hierfür gibt es unterschiedliche Gründe. Ein Grund hierfür könnte sein, dass Schwerhörende meist eine reduzierte Frequenzselektivität aufweisen (Glasberg 1986; Tyler 1986). Die Frequenzselektivität des Gehörs erfolgt auf unterschiedlichen Ebenen des Gehörs, vor allem in der Cochlea und retrocochleär. Dabei bildet die Basis die Cochlea (Moore 1986). Bei Normalhörenden (NH) sind die äußeren Haarzellen maßgeblich an der Verstärkung der Basilarmembranbewegung bei niedrigen bis moderaten Schallintensitäten beteiligt – insbesondere an der Stelle ihrer charakteristischen Frequenz. Sie tragen dadurch sowohl zu einer verbesserten Hörbarkeit des Stimulus als auch zu einer erhöhten Frequenzselektivität bei (Davis 1983). Bei Menschen mit einer Innenohrschwerhörigkeit (IS) kommt es zu einer Schädigung der äußeren Haarzellen. Eine Aktivierung des MOC-Reflexes verändert die mechanischen Eigenschaften der äußeren Haarzellen, indem deren Bewegung gehemmt wird (Frolenkov 2006). Peters und Robert untersuchten auditorische Filter von tiefen (100, 200, 400 und 800 Hz) Frequenzen bei jungen und alten Menschen mit einer IS. Sie nutzten ein Notched-Noise Experiment in ähnlicher Art und Weise wie oben beschrieben. Um auch asymmetrische Filter zu messen, wurden die Zielsignale

sowohl symmetrisch als auch asymmetrisch maskiert. Sie zeigten breitere Filter für IS im Vergleich zu NH. Des Weiteren zeigten sie, dass die Filterbreiten mit zunehmender Schwerhörigkeit zunehmen würden (Peters und Robert 1992).

In einer anderen Studie wurden die auditorischen Filter bei Menschen mit einer unilateralen Schwerhörigkeit. Auch hier wurde die Notched-Noise Methode verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die Filter in dem schwerhörenden Ohr breiter als in dem normalhörenden Ohr waren (Glasberg 1986).

Kreft et al. untersuchten den Einfluss des MOC-Reflexes auf IS im Vergleich zu NH mittels der Notched-Noise Methode. Zur Aktivierung des MOC-Reflexes wurde ein Vorsignal, mit derselben spektralen Lücke, vor dem Signal-Maskierer-Komplex präsentiert. Sie zeigten, dass bei IS die Schwellenwertreduzierung durch das Vorsignal geringer war als bei NH. Dies deutet auf eine geringere Aktivität des MOC-Reflexes bei IS als bei NH hin (Kreft et al. 2018). Andere Studien kamen zu ähnlichen Ergebnissen, in denen der "overshoot" gemessen wurde. Hierbei kam es auch zu einer Reduzierung des "overshoot" bei IS im Vergleich zu NH (Bacon und Takahashi 1992; Strickland und Krishnan 2005; Jennings et al. 2016). Es wird vermutet, dass die Verbesserung durch "overshoot" aufgrund einer Reduktion der cochleären Verstärkung durch den MOC-Reflex erzeugt wird (Jennings et al. 2016).

Nitschmann et al. stellten die Hypothese auf, dass Schwerhörigkeit auch die binaurale Frequenzselektivität beeinflusst. Sie verglichen die ERB monauraler und binauraler auditorischer Filter von Normal- und Schwerhörenden. Auch hier wurde die Notched-Noise Methode verwendet. Sie zeigten breitere monaurale und binaurale Filter bei Schwerhörenden. Interessanterweise war der Quotient der monauralen und binauralen ERB zwischen Normal- und Schwerhörenden ähnlich. Dies könnte darauf hindeuten, dass es bei Schwerhörenden nicht zusätzlich zu einer Reduktion der Frequenzselektivität durch retrocochleäre Einschränkungen kommt, sondern Schwerhörigkeit auf Ebenen des Gehörs vor der binauralen Verarbeitung beeinflusst wird (Nitschmann et al. 2010; Verhey et al. 2017). Plack et al. zeigten, dass Schwerhörigkeit zu einer Reduktion der cochleären Verstärkung und Veränderungen in der Kompression führt (Plack et al. 2004).

Um Schwerhörenden zu helfen, hat die Menschheit technische Hilfsmittel entwickelt, um dies zu kompensieren. Das wohl älteste und noch heute am häufigsten gebrauchte Hilfsmittel, ist der Handfächer. Dabei wird die Hand fächerförmig hinter das Ohr gehalten und erzeugt eine Verstärkung von 10–15 dB von Frequenzen unter 2000 Hz (Hüls 1999). Weitergehend wurden Tierhörner verwendet oder im Mittelalter mit anderen technischen Hilfsmitteln experimentiert. Nachteil dieser Hilfsmittel war, dass das für Sprache wichtige Frequenzspektrum von 2000–5000 Hz nicht verstärkt wurde. Um dieses Problem zu lösen konnten psychoakustische Messungen helfen, die Störungen der Wahrnehmung von akustischen Signalen zu identifizieren und zu beschreiben, sowie Hörhilfen und Strategien zu entwickeln, diese zu kompensieren. Zu den hauptsächlichen Störungen von Schwerhörenden gehört das



Recruitment von Lautheit und eine reduzierte Frequenzselektivität (Moore 2007). Bei sämtlichen Schwerhörigkeiten muss der Pegel eines akustischen Signals, im Vergleich zu Normalhörenden, erhöht werden, damit eine Empfindung erzeugt wird. Bei Innenohrschwerhörigen steigt die Lautheit bei zunehmendem Pegel steiler an als bei Normalhörenden (Recruitment). Dies führt dazu, dass bei leisen akustischen Signalen der Schwerhörende nichts hört aber bei steigendem Pegel die Unbehaglichkeitsschwelle durch das akustische Signal schneller erreicht wird. Ein modernes Hörgerät kann dies kompensieren. Bei Schallleitungsstörungen reicht oft die Strategie der linearen Verstärkung. Dabei wird bei einem Patienten der Hörverlust in dB gemessen. Das Hörgerät wird nun den Pegel am Eingang messen und das Ausgabesignal um den gemessenen Hörverlust erhöhen. Um unbehagliche oder schädliche Pegel zu vermeiden, wird der Pegel um einen maximalen begrenzt. Bei Recruitment wird sich der Strategie der nicht-linearen Verstärkung bedient. Dabei wird der Pegel bei geringen Pegeln im Input stärker verstärkt als bei hohen Pegeln. Dies wird bei jedem Pegel automatisch angepasst. In der Hörgerätetechnik wird dies auch automatische Verstärkungskontrolle (engl. Automatic Gain Control, AGC) genannt (Kießling et al. 2017). Sprache bewegt sich zwischen Pegeln von ca. 30 dB (Killion 1997). Bei einer Konversation springt der Pegel von einer Situation zur nächsten. Bei Personen mit Recruitment ist der Bereich, indem komfortabel gehört werden kann geringer. Für dieses Problem gibt es die Strategie der langsam-reagierenden-ACG's. Dabei wird die Verstärkung langsam von einer Situation zur nächsten angepasst. Allerdings gibt es Situationen, in denen kurzfristig ein akustisches Signal mit hoher Intensität auftaucht. Bei langsam reagierenden ACG's tritt daher das Problem auf, dass das Hörgerät für eine Zeit die Verstärkung zu weit runter regelt und die Person die Konversation nicht mehr hört. Hierfür wurde ein zusätzliches schnell reagierendes Programm integriert, welches für solche Situationen die Verstärkung schnell wieder auf das Ausgangslevel reguliert. Bei Schwerhörigen zeigen Tonaudiogramme, dass der Hörverlust frequenzabhängig ist. Das heißt es gibt für unterschiedliche Frequenzen einen anderen Hörverlust. Dies kann mit Multiband Hörgeräten angepasst werden. Das akustische Signal wird im Input durch eine Reihe von Bandpassfiltern in verschiedene Frequenzbänder aufgeteilt und die Verstärkung anhand des Tonaudiogramms eingestellt (Moore 2012).

Durch die Versorgung von Patient:innen mit Schwerhörigkeit kann das Sprachverstehen mithilfe von Hörgeräten deutlich verbessert und mit Cochlea-Implantaten (CI) überhaupt erst ermöglicht werden. Allerdings steht die Technologie noch der Herausforderung gegenüber, die Sprachverständlichkeit in einer Umgebung mit Geräuschen oder die Konversation mit mehreren Partnern gleichzeitig zu verbessern. Dabei ist es wichtig zunächst Systeme im menschlichen Gehör zu identifizieren und zu charakterisieren, die für die Unterdrückung von Geräuschen verantwortlich sind. Anschließend kann damit eine technische Weiterentwicklung von Hörhilfen stattfinden.

## **1.5. Motivation**

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses des MOC-Reflexes auf die Frequenzselektivität des binauralen Hörens. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob der Einfluss des MOC-Reflexes auf die monaurale und binaurale Frequenzselektivität gleich ist oder ob der MOC-Reflex noch einen spezifischen Einfluss auf binaurale Prozesse hat.

Diese Arbeit erweitert mit neuen Experimenten die Ergebnisse der Studie von Verhey et al. 2017, die dieses Thema erstmals explizit untersucht hatte. Das Design der neuen Experimente war so gewählt, dass die Probleme in der Studie von Verhey et al. 2017 beseitigt werden. Um einen größeren Unterschied der Maskierung diotischer und dichotischer Zielsignal zu erhalten, wurden Schwellenwerte eines 500 Hz Zielsignal anstatt eines 1000 Hz Zielsignals bestimmt. Um eine Verdeckungswirkung des Precursors möglichst auszuschließen, wurde als Precursor anstelle eines Breitbandrauschens ein Bandpassrauschen mit einer spektralen Lücke verwendet. Auch wurde das Zielsignal nicht nur in einer Simultanverdeckungskondition gemessen, sondern auch in einer Nachverdeckungskondition, also einer Kondition, in der die cochleäre Suppression keinen Einfluss auf die Abschätzung der spektralen Selektivität haben sollte.

## **2. Material und Methoden**

In diesem Abschnitt werden die Experimente vorgestellt. Dieser Abschnitt ist unterteilt in die Vorstellung der Probanden, die verwendeten Signale, die benutzte Methode und die verwendeten Materialien.

### **2.1. Probanden**

Dreizehn normalhörende erwachsene Probanden (9 Frauen, 4 Männer) haben an dem Experiment teilgenommen. Das Alter der Versuchspersonen (VP) lag zwischen 21 und 40 Jahren. Drei Probanden waren Mitarbeiter aus der Abteilung für Experimentelle Audiologie und zehn wurden von außerhalb der Abteilung rekrutiert. Abgesehen von den Mitarbeitern der Abteilung für Experimentelle Audiologie wurden alle VP für ihre Teilnahme bezahlt. Die Teilnahme aller Probanden war freiwillig. Zwei von dreizehn VP hatten bereits Erfahrung mit Maskierungs-Experimenten. Alle VP hatten in der Standardaudiometrie bei Frequenzen zwischen 0,125 und 8,0 kHz eine Hörschwelle von  $\leq 15$  dB. Die Anzahl der Versuchspersonen entsprach denen früherer vergleichbarer Studien.

Die Studie wurde durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke Universität überprüft (Ethikvotum 10/13) und richtete sich nach den Prinzipien der Deklaration von Helsinki. Für jede VP liegt eine Einverständniserklärung vor.

## 2.2. Signale

Es wurden drei verschiedene Signaltypen verwendet: Zielsignal, Maskierer und Precursor. Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung der Spektrogramme dieser Signale.

Das Zielsignal ist in jedem Teilbild der Abbildung als ein roter horizontaler Balken dargestellt. Das Zielsignal hatte eine Dauer von 10 ms inklusiver 5 ms an- und absteigender Rampen. Das Zielsignal wurde auf beide Ohren entweder in Phase (diotisch,  $S_0$ ) oder mit einer interauralen Phasenverschiebung von  $\pi$  (dichotisch,  $S_\pi$ ) präsentiert.

Der Maskierer ist in der Abbildung als eine grüne vertikale Fläche dargestellt. Als Maskierer wurde ein 30 ms langes bandpassgefiltertes Rauschen (60-2000 Hz) verwendet. Der Maskierer wurde entweder mit einer spektralen Lücke von 400 Hz, die arithmetisch um die Zielsignalfrequenz zentriert wurde oder ohne spektrale Lücke präsentiert. In den Teilbildern der Abbildung 10 ist der Maskierer ohne spektraler Lücke dargestellt. Die horizontal gestrichelten Linien zeigen spektrale Kanten für die Lückenbreite von 400 Hz an. Der Maskierer wurde zu jeder Zeit diotisch mit einer spektralen Leistungsdichte von 30 dB SPL präsentiert.

Um eine Selbst-Aktivierung des MOC-Reflex durch den Signal-Maskierer-Komplex zu verhindern, wurde dessen Dauer so gering wie möglich gehalten (Backus und Guinan 2006). Im Experiment der Simultanverdeckung hatte der Signal-Maskierer-Komplex eine Gesamtdauer von 30 ms und im Experiment der Nachverdeckung eine Gesamtdauer von 40 ms.

Die horizontalen blauen Flächen zeigen den Precursor. Der Precursor war ein Bandpassrauschen mit einer Frequenzbreite von 60-2000 Hz mit einer spektralen Lücke bei 500 Hz von entweder 400 Hz (NNP4) oder 800 Hz (NNP8) und eine spektrale Leistungsdichte von 30 dB SPL. Der Precursor war 325 ms lang inklusive 5 ms an- und absteigenden Rampen. Der Precursor begann zum Zeitpunkt 0 ms eines jeden Intervalls. Das Zielsignal wurde immer 380 ms nach Beginn des Intervalls präsentiert. Der Maskierer wurde beim Simultanverdeckungsexperiment 370 ms und beim Nachverdeckungsexperiment 350 ms nach Intervallbeginn präsentiert. Somit bestand zwischen dem Precursor und Signal-Maskierer-Komplex eine geräuschlose Pause von 45 ms bei Simultanverdeckungsexperiment und 25 ms bei Nachverdeckungsexperiment. Der zeitliche Abstand Precursor-Ende und Zielsignal-Beginn war hingegen in beiden Experimenten 55 ms.

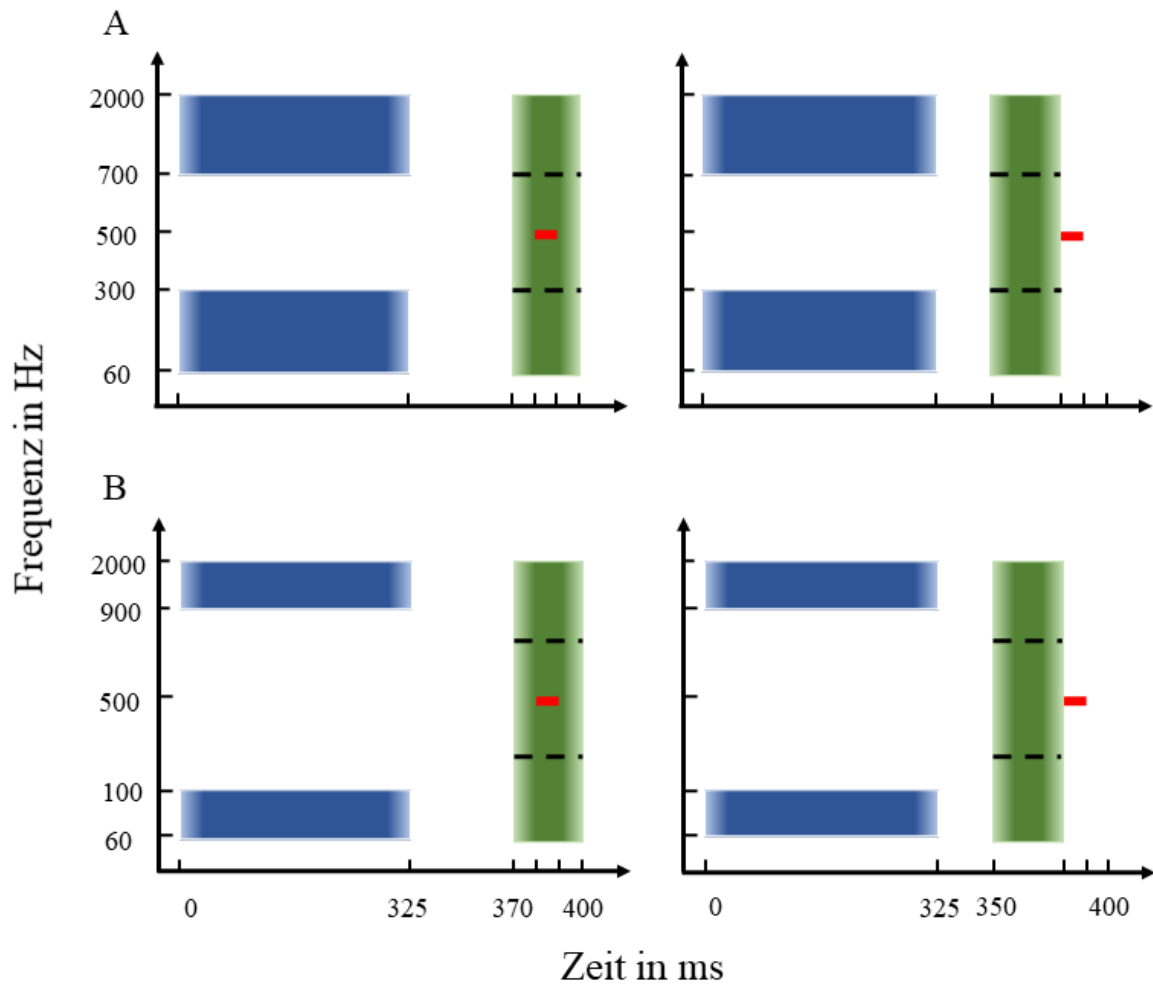


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Signale. Die Y-Achse jedes Teilbildes beschreibt die Frequenz in Hz und die X-Achse die Zeit in ms. Auf den linken Teilbildern sind die Signale in dem Experiment der Simultanverdeckung und auf den rechten Teilbildern die des Experimentes der Nachverdeckung dargestellt. Der rote horizontale Balken zeigt das Zielsignal, die blauen horizontalen Balken den Precursor und der grüne vertikale Balken den Maskierer. Das Abblenden der Farbe stellt die 5ms an- und absteigenden Rampen dar. Der Maskierer ist hier ohne Lücke dargestellt. Für den Maskierer mit Lücke werden die Grenzen der 400 Hz Lücke durch gestrichelte schwarze Linien gekennzeichnet. Der Precursor startet bei 0 ms und endet bei 325ms. Das Zielsignal hat eine Dauer von 10 ms und beginnt nach 380 ms. Der Maskierer hat eine Dauer von 30 ms. Der Start variiert und ist bei der Simultan- und Nachverdeckung 370 und 350 ms nach Beginn des Intervalls. Für die Teilbilder der Reihe A hat der Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz und für die der Reihe B eine Lückenbreite von 800 Hz (modifiziert nach (Dymel et al. 2021)).

### 2.3. Methoden

Das Experiment wurde mit einem adaptiven Dreintervallverfahren (Three-Alternative Forced-Choice, 3 AFC), sowie einer adaptierenden “2-down, 1-up” Regel durchgeführt. Diese Methode erlaubt die Bestimmung von Schwellenwerten bei 70,7% korrekten Antworten (Levitt 1971). In Abbildung 11 ist eine schematische Darstellung eines Durchganges einer Kondition dargestellt. Der VP wurde in jedem Durchgang drei Intervalle präsentiert. Jedes Intervall hatte eine Länge von 400 ms mit einer Pause zwischen den Intervallen von 400 ms. In einem der drei Intervalle wurde per Zufall das Zielsignal präsentiert, während in den anderen beiden Intervallen das Zielsignal fehlte. Die Aufgabe der VP war es, das Zielsignal in einem der drei Intervalle zu identifizieren. Bei zwei aufeinander folgenden korrekten Identifizierungen wurde die Intensität des Zielsignals reduziert. Die initiale Intensität des Zielsignals betrug 85 dB SPL. Bei der ersten korrekten Identifizierung wurde die Intensität um 8 dB reduziert. Wurde das Intervall ohne Zielsignal ausgewählt, so erhöhte sich die Intensität wieder um diesen Betrag. Die Schrittweite halbierte sich bei jedem oberen Umkehrpunkt, bis 1 dB erreicht wurde. Ein Umkehrpunkt kennzeichnet den Wert in der sich die Richtung der Pegeländerung ändert. War die VP bei einer Schrittweite von 1 dB angekommen, wurden sechs weitere Umkehrpunkte gemessen und ein geometrischer Mittelwert der Zielsignalintensität, welcher den Schwellenwert darstellt, bestimmt. Für jede Kondition wurde die 3 AFC-Methode vier Mal durchgeführt. Aus den letzten drei geometrischen Mittelwerten wurde ein arithmetischer Mittelwert bestimmt, welcher die Schwellenwerte dieser Arbeit darstellt. Um das Experiment kennenzulernen, wurde die erste Durchführung der Methode als Training gewertet und nicht in die Auswertung miteinbezogen.

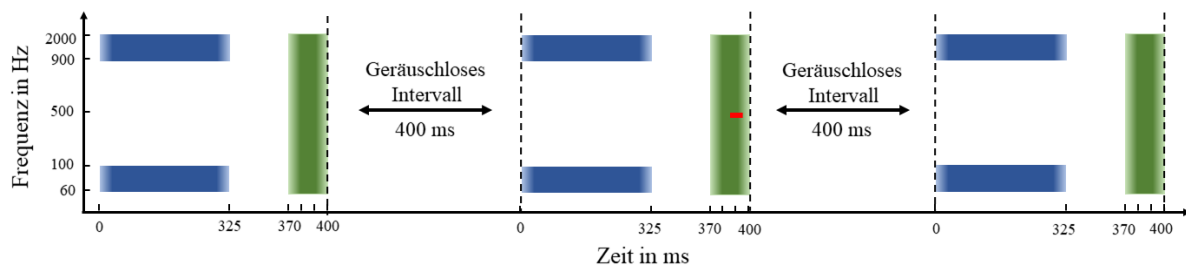


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Durchganges einer Kondition des Simultanverdeckungsexperiments. Die Y-Achse zeigt die Frequenz in Hz und die X-Achse die Zeit in ms. Es sind drei Intervalle einer Kondition mit einer Dauer von jeweils 400 ms gezeigt. Zwischen den Intervallen ist eine 400 ms lange geräuschlose Pause mit einem horizontalen Doppelpfeil markiert. Die blauen horizontalen Balken zeigen den Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz. Der grüne vertikale Balken zeigt den Maskierer ohne Lücke. Der rote horizontale Balken zeigt das Zielsignal. Das Zielsignal wird in diesem Beispiel im mittleren Intervall präsentiert.

In dieser Arbeit wurden die Schwellenwerte eines Zielsignals für die zwei in Abb. 10 dargestellten Maskierungsexperimente bestimmt. Im ersten Experiment wurden das Zielsignal und der Maskierer zur

gleichen Zeit präsentiert (Simultanverdeckung, Abb. 10, links) und im zweiten Experiment wurde das Zielsignal nach dem Ende des Maskierers präsentiert (Nachverdeckung, Abb. 10, rechts). Sowohl für die Simultanverdeckung als auch für die Nachverdeckung gab es 16 verschiedene Konditionen:

Neben den Konditionen, bei denen sowohl die Precursor als auch die Maskierer präsent waren (wie in Abb. 11 dargestellt) wurde noch die folgenden Schwellen bestimmt: 1) In Anwesenheit eines Maskierers aber ohne Precursor (NoP), 2) in Anwesenheit des Precursors aber ohne Maskierer und 3) in Ruhe. Die Konditionen 2) und 3) werden im Folgenden auch als Baseline-Kondition bezeichnet. Die zeitlichen Positionen der Stimuli im Intervall wurden für alle diese Konditionen gleich gelassen, d.h. zum Beispiel auch ohne Maskierer und Precursor begann das Zielsignal 380 ms nach Intervallbeginn.

## **2.4. Aufbau**

Das Experiment wurde in einem doppelwandigen, akustisch isolierten Raum durchgeführt. Die Probanden saßen in der Mitte des Raumes, lasen die Anweisungen des Experimentes auf einem Bildschirm ab und gaben ihre Antwort auf einer Tastatur ein.

Das Experiment wurde über das MATLAB AFC framework erzeugt (Ewert, 2013).

Die digitalen Signale wurden mit einer Sampling-Frequenz von 44,1 kHz erzeugt. Die Konvertierung der digitalen zu analogen Signalen geschah mit einer externen Soundkarte (RME Fireface 400, Haimhausen, Deutschland). Für die Übertragung auf das Ohr wurden Kopfhörer des Typs Sennheiser-HDA200, Wedemark, Deutschland, verwendet. Die Kopfhörer wurden zuvor mit einem künstlichen Ohr kalibriert.

### 3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt die Darstellung der Ergebnisse. Zunächst werden die Ergebnisse aus der Betrachtung der Individualwerte und der Mittelwerte vorgestellt. Anschließend erfolgt eine statistische Beurteilung.

#### 3.1. Ergebnisse der Individualdaten

In Abbildung 12 sind die Schwellenwerte eines simultan verdeckten Zielsignals in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers dargestellt. Die X-Achse zeigt die Lückenbreite des Maskierers in Hertz und die Y-Achse die Schwellenwerte des Zielsignals in Dezibel. Die blauen Quadrate zeigen die Schwellenwerte eines diotischen Zielsignals ( $S_0$ ) und die roten Rauten die eines dichotischen ( $S_\pi$ ). Die geschlossenen Symbole zeigen die Ergebnisse in Anwesenheit eines Precursors mit einer spektralen Lücke von 400 Hz (*NNP4*), die offenen Symbole die Schwellen ohne Precursor (*NoP*). Die gestrichelten horizontalen Linien zeigen die Schwellen in einer sogenannten Baseline-Kondition, d.h. ohne Maskierer. In der oberen linken Ecke jedes Teilbild ist kodiert, welche Daten gezeigt sind.

Im Folgenden Absatz geht es um die Beschreibung der Ergebnisse der Baseline-Kondition. Anschließend erfolgt die weitere Beschreibung der Ergebnisse mit eingeschaltetem Maskierer.

Die nicht ausgefüllten blauen Quadrate zeigen die Ruhehörschwellen. Dies ist der Schwellenwert bei einem diotischen Zielsignal, das heißt ohne den Einfluss eines Precursors oder einer Phasenverschiebung des Signals. Dieser wird als Referenz für die Veränderung der Schwellenwerte der anderen Konditionen genommen.

Bei eingeschaltetem Precursor erhöhte sich der Schwellenwert um ca. 2-8 dB für diotische Zielsignale. Dies galt für alle VP außer für V12. Bei V12 verringerte sich der Schwellenwert in Anwesenheit des Precursors. Für Schwellenwerte dichotischer Zielsignale erhöhten sich die Schwellenwerte im ca. 1-7 dB für alle VP außer für V7.

Wenn der Maskierer präsentiert wurde, so zeigten alle VP eine Erhöhung der Schwellenwerte. Je nach Maskiererlückenbreite und interauraler Phasenlage des Zielsignals zeigten sich individuelle Differenzen der Schwellenwerte mit und ohne Maskierer von ca. 10 bis 65 dB. In jeder Kondition zeigte jeder Versuchsteilnehmer eine Reduktion der Schwellenwerte durch eine Erhöhung der Lückenbreite des Maskierers von 0 Hz auf 400 Hz. Im Allgemeinen waren die Schwellen für Zielsignale, die mit einer interauralen Phasenverschiebung von  $\pi$  ( $S_\pi$ , dichotisch) präsentiert wurden, kleiner als für Zielsignale ohne interauraler Phasenverschiebung ( $S_0$ , diotisch). Nur bei V3 wurde kein Einfluss durch ein  $S_\pi$  bei einem Maskierer mit einer 400 Hz Lücke in Abwesenheit des Precursors beobachtet. Die größte Reduzierung zeigten V1, V2, V4, V5, V9 und V13 mit etwa 9-22 dB in allen Konditionen. Die anderen Teilnehmer zeigten ähnlich große Reduzierungen der Schwellenwerte in einigen Konditionen, jedoch

nicht in allen. Zum Beispiel zeigte V7 bei einem Maskierer ohne Lücke Schwellenwertreduzierungen von etwa 11-14 dB, jedoch nur von etwa 1-5 dB bei einem Maskierer mit Lücke.

Wurde der Precursor präsentiert, so verringerten sich die Schwellenwerte der  $S_\pi$  und  $S_0$  um ca. 0-15 dB. Dabei zeigten V1, V2, V4, V5 und V9 den geringsten Einfluss des Precursor (0-4 dB) für  $S_0$  und  $S_\pi$ . Bei V4 zeigte der Precursor nahezu keinen Einfluss auf den Schwellenwert eines  $S_\pi$  und bei V9 nahezu keinen Einfluss auf den Schwellenwert beider ( $S_0$ ,  $S_\pi$ ). Bei V11 zeigte sich sogar eine Erhöhung des Schwellenwertes eines  $S_0$ , welches von einem Maskierer ohne Lücke verdeckt wurde.

Zwischen den Schwellenwerten eines Maskierers mit und ohne Lücke kann eine Verbindungslinie gezogen werden. Die Verbindungslinien für die  $S_0$ -Kondition verliefen für V1, V4, V8 und V9 mit und ohne Precursor annähernd parallel. V2, V3, V6, V7, V10, V12 und V13 zeigten einen solchen parallelen Verlauf nicht. Generell zeigten sich bei einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz größere Differenzen zwischen den Schwellenwerten in An- oder Abwesenheit eines Precursor als bei dem Maskierer ohne Lücke. Dabei zeigten V3, V7 die größten Unterschiede. Bei V3 und V7 war dieser bei einem Maskierer ohne Lücke bei ca. 0,5 und 1 dB sowie bei einem Maskierer mit Lücke bei ca. 10 und 13 dB.

Für Schwellenwerte eines  $S_\pi$  waren die Verbindungslinien der Konditionen mit und ohne Precursor für zehn von dreizehn VP (V1, V2, V4-V6, V9-V13) annähernd parallel. Nur V3, V7 und V8 zeigten unterschiedliche Schwellenwertdifferenzen. Bei V3 und V7 waren die Differenzen zwischen den Schwellenwerten bei einem Maskierer mit Lücke größer als bei einem ohne. Bei V8 waren umgekehrte Tendenzen zu sehen.



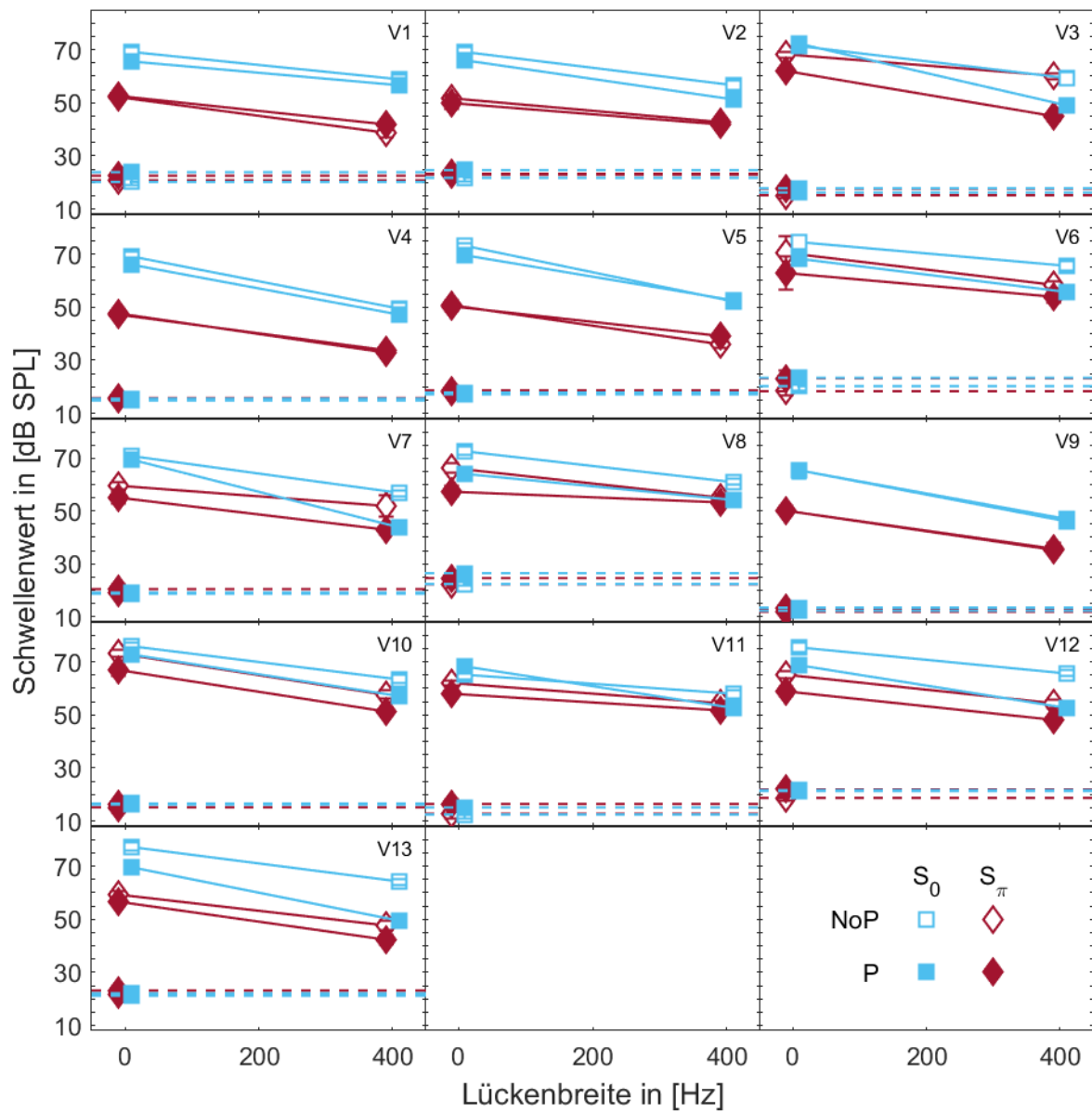


Abbildung 12: Dargestellt sind die gemittelten Schwellenwerte (V1–V13) in dB SPL über der Lückenbreite des Maskierers in Hz. Gezeigt werden Ergebnisse der Simultanverdeckung mit und ohne Precursor (400 Hz Lückenbreite). Ausgefüllte Symbole kennzeichnen Messungen mit Precursor (*NNP4*), offene ohne (*NoP*). Rote Rauten markieren das dichotische Zielsignal ( $S_\pi$ ), blaue Quadrate das diotische ( $S_0$ ). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Durchgezogene Linien stehen für Bedingungen mit Maskierer, gestrichelte für solche ohne; Quadrate sind um +5 Hz, Rauten um –5 Hz verschoben.

Abbildung 13 zeigt die Schwellenwerte des Zielsignals der verschiedenen Versuchspersonen (VP) in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers. Es handelt sich in dieser Abbildung um ein simultanverdecktes Zielsignal mit einem ein- oder ausgeschaltetem Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz (*NNP8*). Die X-Achse zeigt die Lückenbreite des Maskierers in Hz und die Y-Achse die Schwellenwerte des Zielsignals. Die blauen Quadrate zeigen die Schwellenwerte eines diotischen Zielsignals ( $S_0$ ) und die roten Rauten die eines dichotischen ( $S_\pi$ ). Die Symbole ohne Füllung zeigen die Daten ohne Anwesenheit eines *NNP8* und die gefüllten Symbole in Anwesenheit eines *NNP8*. Die gestrichelten horizontalen Linien zeigen die Baseline-Kondition, ohne Anwesenheit eines Maskierers.

Die Schwellenwerte der Baseline-Kondition ohne Precursor sind dieselben wie in Abbildung 12.

Bei eingeschaltetem *NNP8* zeigte sich eine Erhöhung für diotische Schwellenwerte von 1-4 dB für elf der 13 VP (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V8, V9, V11, V12, V13). Bei V7 und V10 hat der Precursor zu keiner Änderung der Schwelle ohne Maskierer geführt. Für Schwellenwerte eines  $S_\pi$  zeigten elf der dreizehn VP eine Schwellenwerterhöhung von ca. 1-5 dB. V7 zeigte eine Verringerung des Schwellenwertes um ca. 1 dB und für V4 zeigte sich keinen Einfluss des Precursors auf die Schwellen ohne Maskierer.

Die Schwellenwerte in Abwesenheit des Precursor sind dieselben wie in Abbildung 12. Insgesamt zeigt sich in Abbildung 13 bei den meisten VP eine Verringerung der Steigung der Verbindungslinien bei diotischen ( $S_0$ ) Zielsignalen, wenn ein *NNP8* eingeschaltet ist im Vergleich zu Abbildung 12, in der ein *NNP4* eingeschaltet war. Bei dichotischen ( $S_\pi$ ) Zielsignalen zeigte sich bei nahezu allen VP eine identische Steigung.

Wurde das Zielsignal dichotisch präsentiert ( $S_\pi$ ), so zeigten alle VP geringere Schwellenwerte im Vergleich zu diotisch ( $S_0$ ) präsentierten Zielsignalen. Für Schwellenwerte in An- und Abwesenheit des Precursors zeigten V1, V2, V4, V5 und V13 den deutlichsten Effekt mit einer Verringerung von ca. 10-18 dB. Den geringsten Effekt zeigten V3, V6, V8 und V10 von ca. 2-8 dB.

Wurde der Precursor eingeschaltet, so zeigten fünf der dreizehn VP (V1, V2, V4, V8, V9) keinen Einfluss auf die Schwellenwerte für das diotische Zielsignal ( $S_0$ ). V3, V5, V7 und V10 zeigten bei einer Maskiererlückenbreite von 400 Hz in Anwesenheit des Precursor nahezu keine Veränderung des Schwellenwertes. Für der Maskierer ohne spektrale Lücke zeigte V7 erhöhte Schwellenwerte (2 dB) wohingegen sich bei V3, V5 und V10 die Schwellenwerte um 2 dB verringerten.

Die anderen VP (V6, V11, V12, V13) zeigten einen deutlicheren Effekt des Precursors mit einer Erhöhung der Steigung der Verbindungslinien. Im Vergleich zu Abbildung 12 zeigt sich ein geringerer Effekt des Precursors.

Für Schwellenwerte eines  $S_\pi$  zeigten V1, V2, V4, V5, V9 und V11 den geringsten Einfluss in Anwesenheit des Precursor (ca. 0-3 dB) im Vergleich zu den anderen VP (V3, V6, V7, V8, V10, V12,

V13). Die anderen VP zeigten inhomogene Veränderungen durch die Anwesenheit des Precursor. V3 und V13 zeigten bei einem Maskierer mit Lücke eine Verringerung des Schwellenwertes um 6 dB und 4 dB. Bei einem Maskierer ohne Lücke zeigten sie keine Veränderung des Schwellenwertes. V8 zeigte eine Erhöhung des Schwellenwertes bei einem Maskierer mit Lücke um 5 dB. Bei einem Maskierer ohne Lücke zeigte auch diese keine Veränderung des Schwellenwertes. V7 und V12 zeigten eine Erhöhung des Schwellenwertes bei einem Maskierer ohne Lücke um 3 dB und 4dB. Bei einem Maskierer mit Lücke zeigten sie nahezu keinen Einfluss des Precursor. V10 zeigte eine Verringerung des Schwellenwertes bei einem Maskierer ohne Lücke um 8 dB. Bei einem Maskierer mit Lücke zeigten sie nahezu keinen Einfluss des Precursor. Bei V6 verringerten sich die Schwellenwerte bei einem Maskierer ohne Lücke und einem mit Lücke um ca. 4 dB. Dadurch zeigt sich auch die Änderung der Steigung der Verbindungslinien inhomogen. V3, V7, V12 und V13 zeigten eine Zunahme dieser. V2, V8, V10 zeigten eine Verringerung dieser. Die anderen VP zeigten keine Änderung der Steigung.

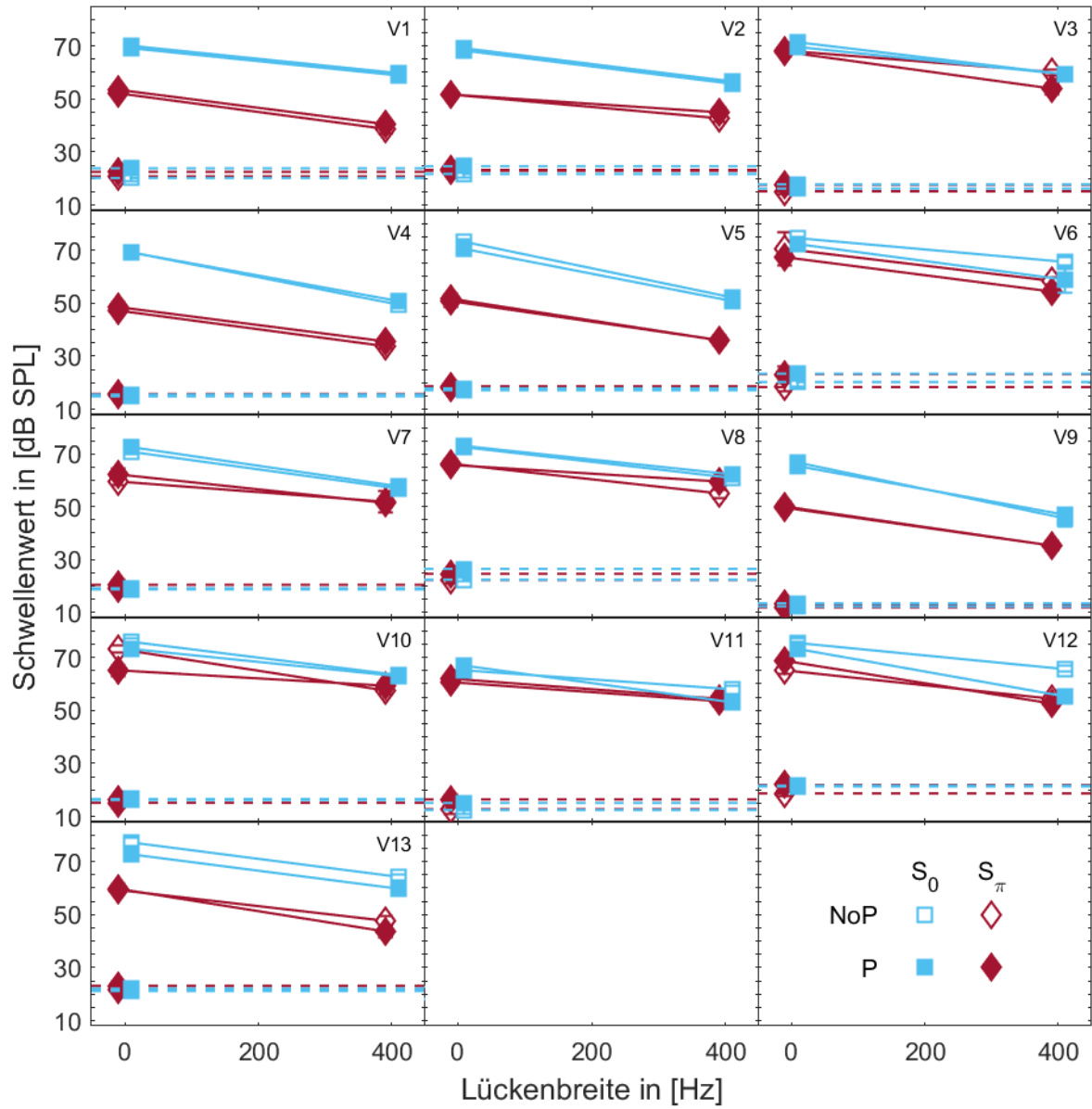


Abbildung 13: Dargestellt sind die gemittelten Schwellenwerte (V1–V13) in dB SPL über der Lückenbreite des Maskierers in Hz. Gezeigt werden Ergebnisse der Simultanverdeckung mit und ohne Precursor (800 Hz Lückenbreite). Ausgefüllte Symbole kennzeichnen Messungen mit Precursor (*NNP8*), offene ohne (*NoP*). Rote Rauten markieren das dichotische Zielsignal ( $S_\pi$ ), blaue Quadrate das diotische ( $S_0$ ). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Durchgezogene Linien stehen für Bedingungen mit Maskierer, gestrichelte für solche ohne; Quadrate sind um +5 Hz, Rauten um –5 Hz verschoben.

Abbildung 14 zeigt die Schwellenwerte des Zielsignals der verschiedenen Versuchspersonen (VP) und deren Mittelwerte in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers. Es handelt sich in dieser Abbildung um ein nachverdecktes Zielsignal mit einem ein- oder ausgeschaltetem Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz (*NNP4*). Die X-Achse zeigt die Lückenbreite des Maskierers in Hz und die Y-Achse die Schwellenwerte des Zielsignals. Die blauen Quadrate zeigen die Schwellenwerte eines diotischen Zielsignals ( $S_0$ ) und die roten Rauten die eines dichotischen ( $S_\pi$ ). Die Symbole ohne Füllung zeigen die Daten ohne Anwesenheit eines *NNP4* und die gefüllten Symbole in Anwesenheit eines *NNP4*. Die gestrichelten horizontalen Linien zeigen die Baseline-Kondition, ohne Anwesenheit eines Maskierers. Die Daten der Baseline-Kondition sind dieselben wie die in Abbildung 12.

Auch in Abbildung 14 zeigten nahezu alle VP eine Verringerung des Schwellenwertes durch eine Erhöhung der Lückenbreite des Maskierers von 0 Hz auf 400 Hz. Einzige Ausnahme war V3, bei der es zu einer Erhöhung des Schwellenwertes kam bei eingeschaltetem Precursor. Für Schwellenwerte eines dichotischen Zielsignals ( $S_\pi$ ) zeigten alle VP in den meisten Konditionen eine geringere Schwellenwerte als die eines diotischen Zielsignals ( $S_0$ ). Lediglich V3 zeigte eine Erhöhung der Schwellenwerte bei ein- und ausgeschaltetem Precursor für einen Maskierer mit einer Lücke.

Die Kondition, in der der Precursor eingeschaltet war, zeigte in dieser Abbildung einen gegenteiligen Effekt als in den Abbildungen 13 und 14. Für Schwellenwerte eines  $S_0$  zeigten elf von dreizehn VP (V1, V2, V3, V4, V5, V7, V8, V9, V10, V11, V12) eine Erhöhung der Schwellenwerte in Anwesenheit des Precursor. V6 zeigte keinen Einfluss auf die Schwellenwerte durch den Precursor und V13 einen geringeren Schwellenwert von 2 und 3 dB für einen Maskierer ohne und mit Lücke. V3 und V7 zeigten nur bei einem Maskierer mit Lücke einen geringeren Schwellenwert durch den Precursor von 1 und 5 dB. Die geringste Erhöhung der Schwellenwerte zeigten V9, V10 und V12 mit ca. 1-3 dB. Die elf von dreizehn VP (V1, V2, V3, V4, V5, V7, V8, V9, V10, V11, V12) zeigten auch eine größere Schwellenwerterhöhung bei einem Maskierer ohne Lücke als bei einem mit Lücke. V4, V9, V10, V11 und V12 zeigten sogar keinen Einfluss des Precursor bei einem Maskierer mit Lücke. V1, V2, V5 und V8 zeigten bei einem Maskierer mit Lücke eine Erhöhung des Schwellenwertes durch den Precursor von ca. 1-3 dB. Für einen Maskierer ohne Lücke zeigten die elf von dreizehn VP (V1, V2, V3, V4, V5, V7, V8, V9, V10, V11, V12) eine Schwellenwerterhöhung in Anwesenheit des Precursor von ca. 1-12 dB. Dabei zeigten V1, V2, V3, V5, V7, V8 und V10 die größten Schwellenwerterhöhungen von ca. 5-12 dB. V4, V9, V10, V11 und V12 zeigten die geringste Schwellenwerterhöhung mit ca. 1-3 dB.

Für Schwellenwerte eines  $S_\pi$  zeigte sich ein ähnlicher Trend. Auch hier war für elf von dreizehn VP (V1, V2, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12) der Schwellenwert durch die Anwesenheit des Precursor größer. V3 und V13 zeigten einen geringeren Schwellenwert von ca. 1-3 dB für einen Maskierer ohne Lücke und ca. 2-17 dB für einen mit Lücke. V7, V8 und V12 zeigten nur bei einem Maskierer mit Lücke geringere Schwellenwerte in Anwesenheit des Precursor von 1, 3 und 17 dB.

Sieben von dreizehn VP (V2, V4, V5, V6, V9, V10, V11) zeigten, wie auch bei diotischen Schwellenwerten, den Trend von einer größeren Schwellenwerterhöhung bei einem Maskierer ohne Lücke als bei einem mit Lücke. Die Schwellenwerte erhöhten sich bei einem Maskierer ohne Lücke um ca. 4-7 dB. Bei V6, V10 und V11 zeigte sich bei einem Maskierer mit Lücke nahezu kein Einfluss auf den Schwellenwert durch den Precursor. V9 zeigte eine Erhöhung von 4 dB.

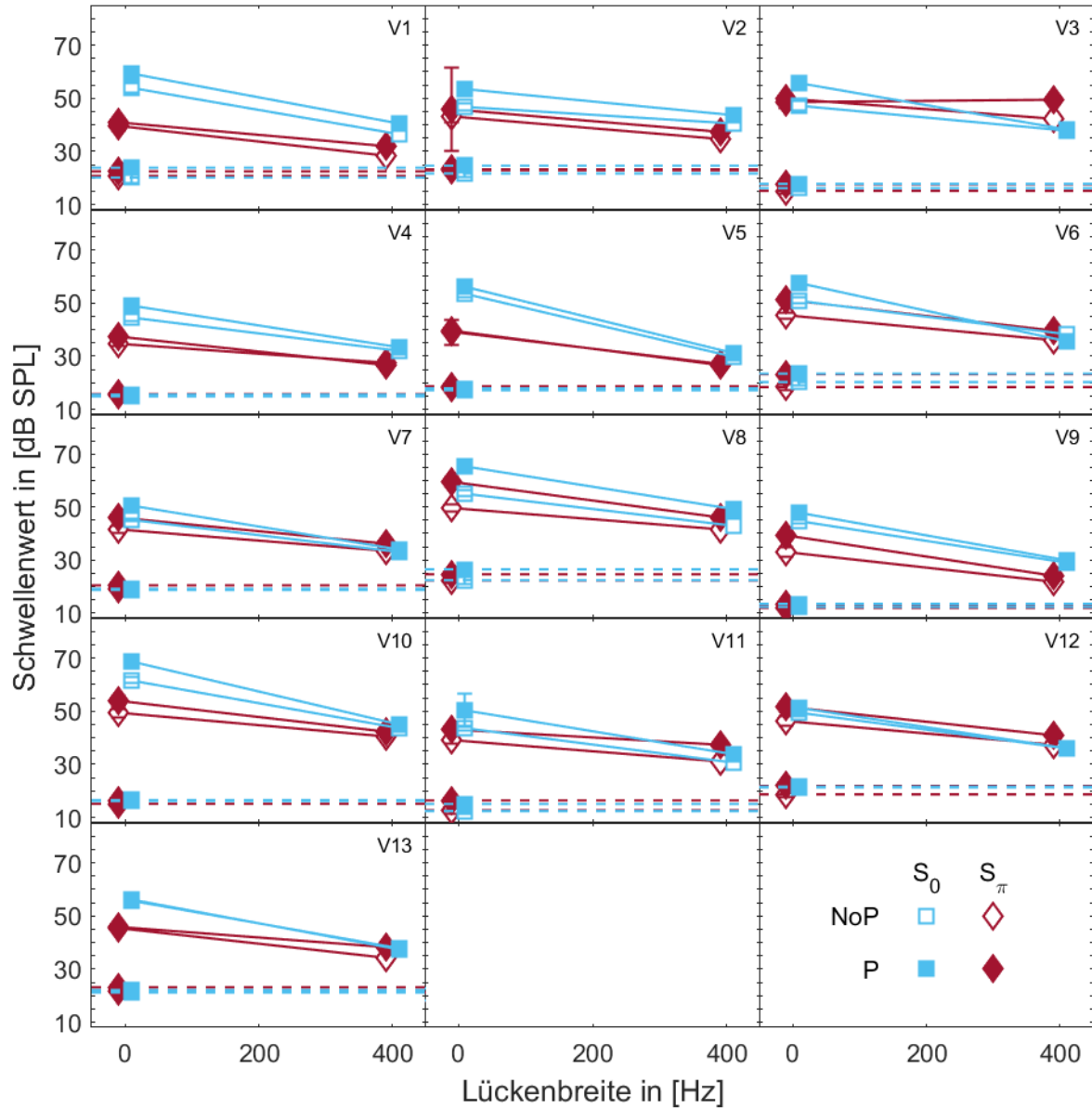


Abbildung 14: Dargestellt sind die gemittelten Schwellenwerte (V1–V13) in dB SPL über der Lückenbreite des Maskierers in Hz. Gezeigt werden Ergebnisse der Nachverdeckung mit und ohne Precursor (400 Hz Lückenbreite). Ausgefüllte Symbole kennzeichnen Messungen mit Precursor (*NNP4*), offene ohne (*NoP*). Rote Rauten markieren das dichotische Zielsignal ( $S_\pi$ ), blaue Quadrate das diotische ( $S_0$ ). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Durchgezogene Linien stehen für Bedingungen mit Maskierer, gestrichelte für solche ohne; Quadrate sind um +5 Hz, Rauten um –5 Hz verschoben.

Abbildung 15 zeigt die Schwellenwerte des Zielsignals der verschiedenen Versuchspersonen (VP) und deren Mittelwerte in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers. Es handelt sich in dieser Abbildung um ein nachverdecktes Zielsignal mit einem ein- oder ausgeschaltetem Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz (*NNP8*). Die X-Achse zeigt die Lückenbreite des Maskierers in [Hz] und die Y-Achse die Schwellenwerte des Zielsignals. Die blauen Quadrate zeigen die Schwellenwerte eines diotischen Zielsignals ( $S_0$ ) und die roten Rauten die eines dichotischen ( $S_\pi$ ). Die Symbole ohne Füllung zeigen die Daten ohne Anwesenheit eines *NNP8* und die gefüllten Symbole in Anwesenheit eines *NNP8*. Die gestrichelten horizontalen Linien zeigen die Baseline-Kondition, ohne Anwesenheit eines Maskierers. Die Daten Baseline-Kondition zeigt dieselben Ergebnisse wie in Abbildung 13.

Auch in Abbildung 15 zeigten alle VP eine Verringerung des Schwellenwertes durch eine Erhöhung der Lückenbreite des Maskierers von 0 Hz auf 400 Hz. Lediglich V3 zeigte für Schwellenwerte eines  $S_\pi$  in Anwesenheit des Precursor eine Erhöhung des Schwellenwertes, wenn die Lückenbreite des Maskierers erhöht wurde.

Wurde das Zielsignal dichotisch ( $S_\pi$ ) präsentiert, so sanken die Schwellenwerte für sieben von dreizehn VP (V1, V2, V4, V5, V8, V9, V10) in allen Konditionen im Vergleich zu diotisch präsentierten Zielsignalen. Es zeigte sich eine Schwellenwertreduzierung von ca. 2-13 dB in Abwesenheit und ca. 3-17 dB in Anwesenheit des Precursor. Die anderen VP zeigten in den meisten Konditionen eine Verringerung für Schwellenwerte eines  $S_\pi$ . V3, V6, V7, V11 und V12 zeigten beispielsweise bei einem Maskierer mit Lücke in Anwesenheit des Precursors höhere Schwellenwerte eines  $S_\pi$  von ca. 3-11 dB.

Die Anwesenheit des Precursors führte insgesamt zu erhöhten Schwellenwerten des Zielsignals. Bei elf von dreizehn Versuchspersonen (V1, V2, V3, V4, V5, V7, V8, V9, V10, V11, V12) zeigte sich dieser Effekt deutlich, während V13 kaum beeinflusst war und V6 nur bei einem Maskierer mit Lücke eine Reduktion um 3 dB zeigte. Insgesamt war die Schwellenwerterhöhung bei einem Maskierer ohne Lücke stärker als bei einem mit Lücke: Zwölf von dreizehn Versuchspersonen zeigten Zunahmen von etwa 1–10 dB ohne und 1–7 dB mit Lücke. Die geringsten Erhöhungen traten bei V5, V9 und V12 auf (ca. 2–3 dB ohne bzw. 1–2 dB mit Lücke).

Für Schwellenwerte eines  $S_\pi$  zeigten auch elf von dreizehn VP (V1, V2, V3, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V13) erhöhte Schwellenwerte in Anwesenheit des Precursors. V4 zeigte nur bei einem Maskierer mit Lücke einen geringeren Schwellenwert von ca. 1 dB. V5 zeigte nahezu keinen Einfluss durch den Precursor. Eine größere Schwellenwerterhöhung bei einem Maskierer ohne Lücke als bei einem mit Lücke zeigten bei einem  $S_\pi$  nur 7/13 VP (V4, V6, V7, V8, V9, V10, V12) und damit eine Erhöhung der Steigung der Verbindungslinien. Es fand bei einem Maskierer ohne Lücke eine Erhöhung von ca. 3-10 dB und bei einem mit Lücke eine von ca. 1-4 dB statt. Vier von dreizehn VP (V1, V3, V11, V13) zeigten eine größere Schwellenwerterhöhung bei einem Maskierer mit Lücke in Anwesenheit des Precursor und damit eine Verringerung der Steigung der Verbindungslinien. Es zeigte sich eine Erhöhung von ca. 0-4

dB für einen Maskierer ohne Lücke und von ca. 3-7 dB für einen mit Lücke. V2 zeigte eine nahezu gleiche Schwellenwerterhöhung sowohl bei einem Maskierer ohne Lücke als auch bei einem mit Lücke in Anwesenheit des Precursors von 3 dB.

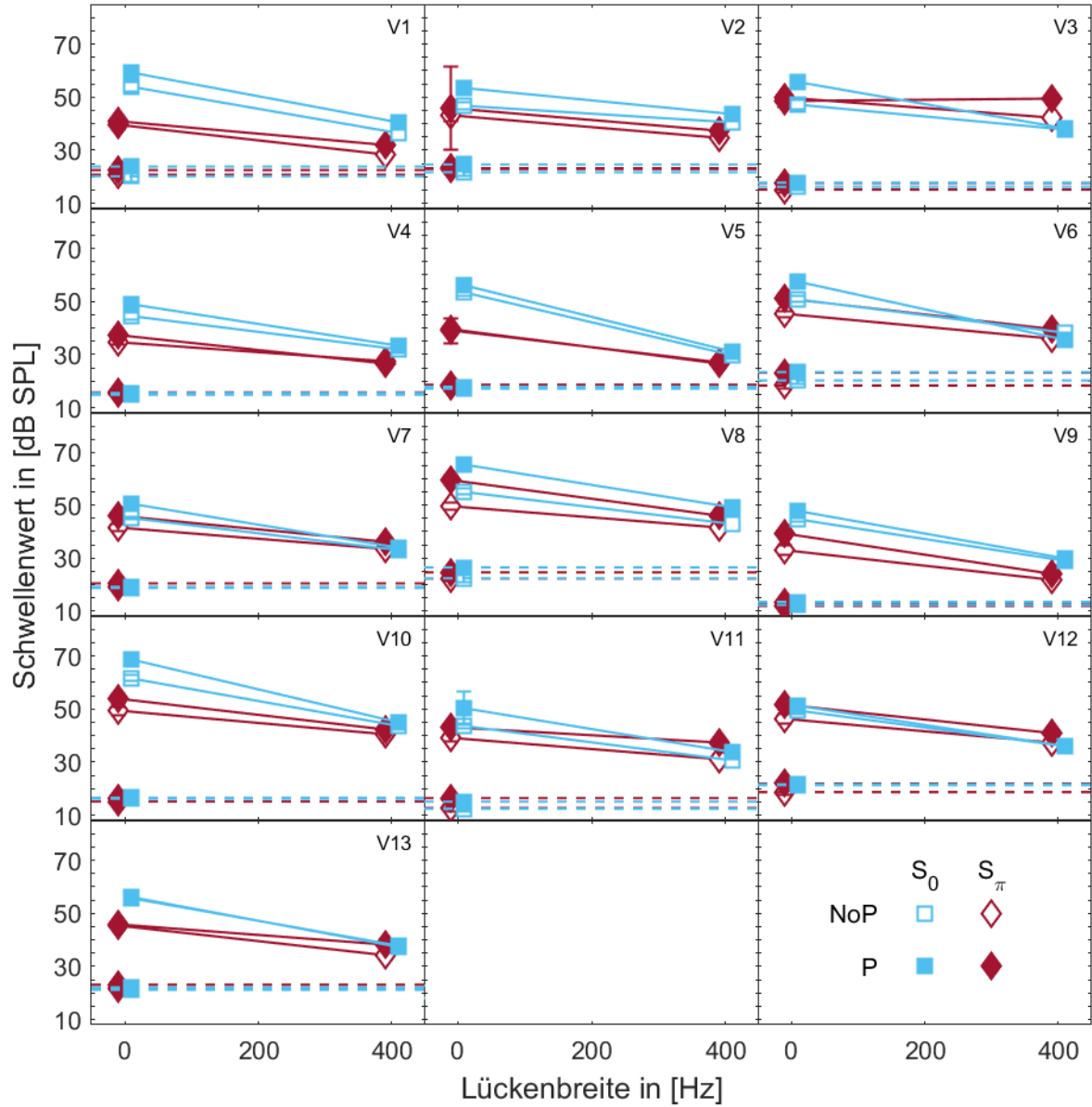


Abbildung 15: Dargestellt sind die gemittelten Schwellenwerte (V1–V13) in dB SPL über der Lückenbreite des Maskierers in Hz. Gezeigt werden Ergebnisse der Nachverdeckung mit und ohne Precursor (800 Hz Lückenbreite). Ausgefüllte Symbole kennzeichnen Messungen mit Precursor (*NNP8*), offene ohne (*NoP*). Rote Rauten markieren das dichotische Zielsignal ( $S_\pi$ ), blaue Quadrate das diotische ( $S_0$ ). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Durchgezogene Linien stehen für Bedingungen mit Maskierer, gestrichelte für solche ohne; Quadrate sind um +5 Hz, Rauten um -5 Hz verschoben.



### 3.2. Ergebnisse der Mittelwerte

Abbildung 16 zeigt die Mittelwerte der Schwellenwerte aller Versuchspersonen für die verschiedenen Konditionen. Dabei zeigt die linke Seite (A und C) die Schwellenwerte bei der Simultanverdeckung und die rechte (B und D) die der Nachverdeckung. Die obere Reihe (A und B) zeigt die Ergebnisse in Anwesenheit oder Abwesenheit eines Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz (*NNP4*) und die untere (C und D) mit 800 Hz (*NNP8*). Die gestrichelten Linien zeigen die Schwellenwerte ohne Maskierer.

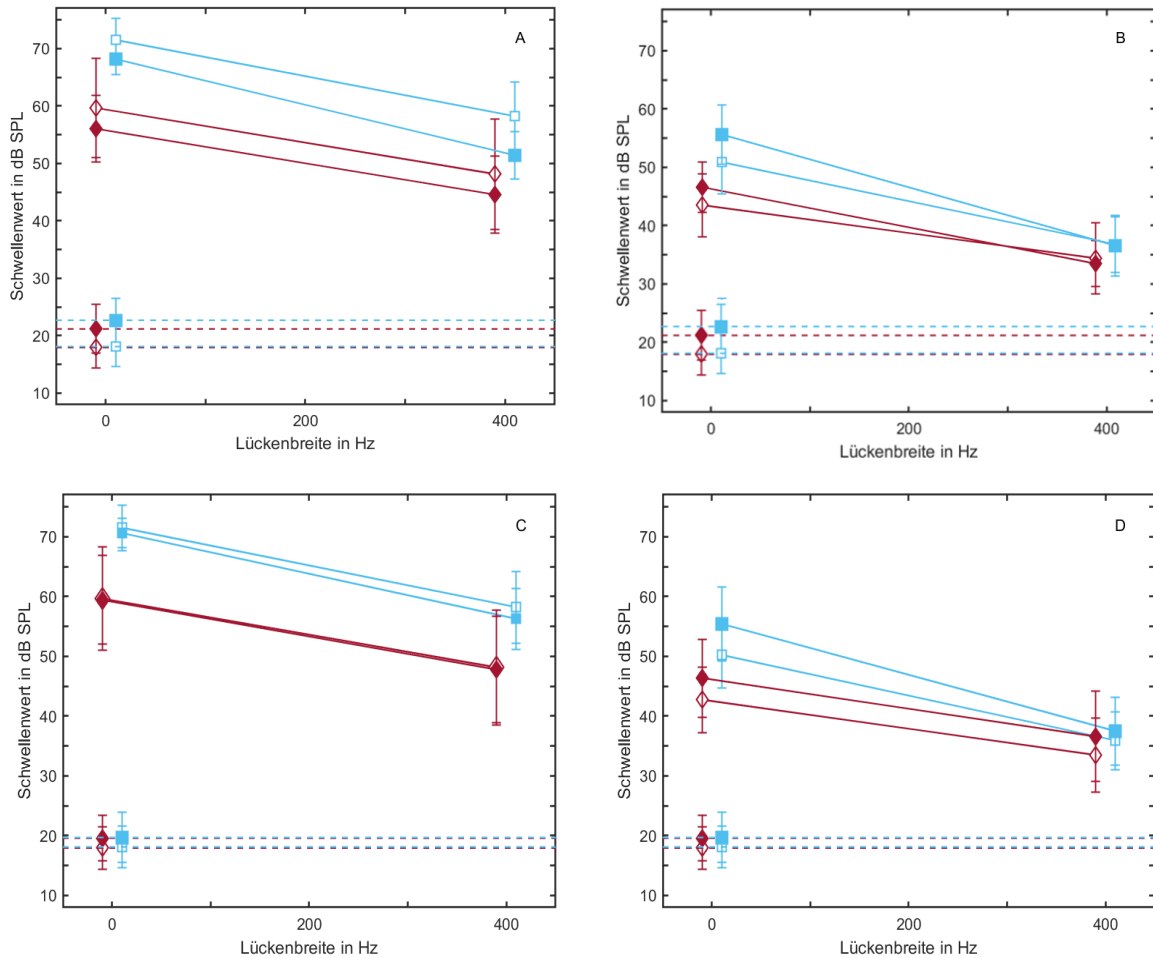


Abbildung 16: Dargestellt sind die Mittelwerte der Schwellenwerte des Zielsignals (in dB SPL) aller Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Maskiererlückenbreite (in Hz). Die linken Teilabbildungen zeigen die Ergebnisse der Simultanverdeckung (A, C), die rechten der Nachverdeckung (B, D). Oben sind die Daten mit einem 400-Hz-Precursor (*NNP4*) und unten mit einem 800-Hz-Precursor (*NNP8*) dargestellt. Durchgezogene Linien kennzeichnen Bedingungen mit Maskierer, gestrichelte Linien solche ohne Maskierer. Ausgefüllte Symbole stehen für Messungen mit Precursor, offene für Messungen ohne Precursor. Die orangefarbenen Symbole repräsentieren die dichotische Bedingung ( $S_{\pi}$ ), die blauen die diotische ( $S_0$ ). Zur besseren Lesbarkeit sind die Quadrate auf der X-Achse um 5 Hz nach rechts und die Rauten um 5 Hz nach links verschoben. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an. Die Abbildung wurde modifiziert nach (Dymel et al. 2021).

Insgesamt zeigte sich eine Verringerung der Schwellenwerte durch eine Erhöhung der Lückenbreite des Maskierers von 0 Hz auf 400 Hz. Sowohl in allen Signalphasen- ( $S_0$ ,  $S_\pi$ ) als auch in allen Precursor- ( $NoP$ ,  $NNP4$ ,  $NNP8$ ) und Maskierervarianten (Simultan- und Nachverdeckung). In Abwesenheit des Precursors verringert sich der Schwellenwert eines diotischen Zielsignals ( $S_0$ ) um 13 dB, wenn die Lückenbreite des Maskierers von 0 auf 400 Hz erhöht wurde. Die Schwellenwerte eines dichotischen Zielsignals ( $S_\pi$ ) sanken um 11 dB. Diese Schwellen sind in allen Teilbildern als Referenz dargestellt. In Teilbild A sind zudem die simultanverdeckten Schwellenwerte in Anwesenheit eines  $NNP4$  gezeigt. In Anwesenheit des Precursor sanken die Schwellenwerte um 27 dB für diotische und 11 dB für dichotische Zielsignale. In Teilbild C sind die simultanverdeckten Schwellenwerte in Anwesenheit eines  $NNP8$  enthalten. Hier verringerten sich die Schwellenwerte um 14 dB für diotische und um 12 dB für dichotische Zielsignale. Teilbild B und D enthalten die Schwellenwerte eines Zielsignals in einer Nachverdeckungssituation. Es zeigte sich eine Reduzierung der Schwellenwerte diotischer Zielsignale ohne die Anwesenheit eines Precursor um 19 dB. Für Schwellenwerte dichotischer Zielsignale verringerten sich diese um 9 dB. Teilbild B zeigt die Schwellenwerte in Anwesenheit eines  $NNP4$ . Bei eingeschaltetem Precursor verringerten sich die Schwellenwerte um 19 dB für dichotische und um 13 dB für dichotische Zielsignale. Teilbild D zeigt die Schwellenwerte in Anwesenheit eines  $NNP8$ . In diesem Teilbild zeigte sich eine Verringerung der Schwellenwerte um 18 dB für diotische und um 10 dB für dichotische Zielsignale. Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse bildet Tabelle 1 ab.

	Simultanverdeckung		Nachverdeckung	
	$S_0 N_{0/400Hz}$	$S_\pi N_{0/400Hz}$	$S_0 N_{0/400Hz}$	$S_\pi N_{0/400Hz}$
NoP	13	11	19	9
NNP4	27	11	19	13
NNP8	14	12	18	10

Tabelle 1: Tabellarische Darstellung der Differenzen der Schwellenwerte zwischen einem Maskierer ohne spektrale Lücke und mit einer spektralen Lücke von 400 Hz ( $N_{0/400Hz}$ ) in dB SPL. Die Werte wurden auf ganze Zahlen gerundet.  $S_0 N_{0/400Hz}$  steht für die Differenzen der Schwellenwerte der diotischen und  $S_\pi N_{0/400Hz}$  für die der Zielsignale.  $NoP$  zeigt die Werte ohne Precursor,  $NNP4$  mit Precursor einer Lückenbreite von 400 Hz und  $NNP8$  mit Precursor einer Lückenbreite von 800 Hz.

Wurde das Zielsignal dichotisch präsentiert, so zeigte sich im Vergleich zu diotischen Zielsignalen eine Verringerung der Schwellenwerte in allen Konditionen. Tabelle 2 zeigt die Schwellenwertdifferenzen der einzelnen Konditionen zwischen diotischen und dichotischen Zielsignalen. Es zeigten sich sowohl in der Simultan- als auch in der Nachverdeckung bei einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz ( $N_{400Hz}$ ) geringere Schwellenwertdifferenzen als bei einem ohne Lücke ( $N_{0Hz}$ ).

	Simultanverdeckung		Nachverdeckung	
	$N_{0Hz}$	$N_{400Hz}$	$N_{0Hz}$	$N_{400Hz}$
NoP	12	10	7	2
NNP4	12	7	9	3
NNP8	11	8	9	1

Tabelle 2: Darstellung der Differenzen der Schwellenwerte zwischen diotischen und dichotischen Zielsignalen der einzelnen Konditionen. Die Daten sind jeweils auf ganze Zahlen gerundet.  $N_0$  steht für den Maskierer ohne Lücke und  $N_{400}$  für einen Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz. *NoP* steht für die Kondition ohne Precursor, *NNP4* für einen Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz und *NNP8* für einen Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz.

Teilbild A und C der Abbildung 16 zeigen die Schwellenwerte der Simultanverdeckung. Es zeigte sich eine Verringerung der Schwellenwerte in Anwesenheit eines Precursor. Dabei reduzierten sich die Schwellenwerte in Anwesenheit des *NNP8* (Teilbild C) weniger als in Anwesenheit eines *NNP4* (Teilbild A). Für Schwellenwerte eines dichotischen Zielsignals zeigte sich sogar nahezu kein Effekt in Anwesenheit eines *NNP8* (Teilbild C). Sowohl in Teilbild A als auch in Teilbild C zeigte sich für Schwellenwerte eines diotischen Zielsignals bei einem Maskierer mit Lücke eine größerer Schwellenwertverringernug als bei einem ohne Lücke. Für Schwellenwerte eines dichotischen Zielsignals waren die Schwellenwertdifferenzen in Teilbild A und C gleich. Teilbild B und D zeigen die Schwellenwerte der nachverdeckten Zielsignale. Durch die Anwesenheit eines Precursor wurden die Schwellenwerte im Vergleich zu Teilbild A und C erhöht. Teilbild B zeigt die Schwellenwerte in An- oder Abwesenheit eines *NNP4*. In dieser Abbildung zeigte sich nur eine Erhöhung der Schwellenwerte bei einem Maskierer ohne Lücke für diotische und dichotische Zielsignale. Bei einem Maskierer mit Lücke zeigte sich für Schwellenwerte diotischer Zielsignale kein Einfluss durch den Precursor und für dichotische eine minimale Verringerung. Hier zeigte sich, im Gegensatz zu Teilbild A und C eine größere Schwellenwertdifferenz zwischen ein- und ausgeschaltetem Precursor bei einem Maskierer ohne Lücke als bei einem Maskierer mit Lücke. Teilbild D zeigt die Schwellenwerte in An- oder Abwesenheit eines *NNP8*. Hier zeigten alle Konditionen eine Erhöhung der Schwellenwerte durch den Precursor. Auch hier zeigte sich für diotische Schwellenwerte eine größere Schwellenwertdifferenz zwischen ein- und ausgeschaltetem Precursor bei einem Maskierer ohne Lücke als bei einem Maskierer mit Lücke. Eine Aufstellung dieser Daten findet sich in Tabelle 3.

Simultanverdeckung				
	<i>NNP4</i>		<i>NNP8</i>	
	$S_0$	$S_\pi$	$S_0$	$S_\pi$
$N_{0Hz}$	-3	-4	-1	0
$N_{400Hz}$	-7	-4	-2	0
Nachverdeckung				
$N_{0Hz}$	5	3	5	4
$N_{400Hz}$	0	-1	2	3

Tabelle 3: Tabellarische Darstellung der Differenzen zwischen den Schwellenwerten in An- und Abwesenheit des Precursor in dB. Die Differenzen sind jeweils auf ganze Zahlen gerundet. Die negativen zeigen eine Verringerung des Schwellenwertes und die positiven eine Erhöhung an. *NNP4* und *NNP8* zeigt die Werte für einen Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz und 800 Hz.  $S_0$  steht für diotische Zielsignale,  $S_\pi$  für dichotische.  $N_{0Hz}$  zeigt die Werte für einen Maskierer ohne Lücke und  $N_{400Hz}$  für einen mit einer Lückenbreite von 400 Hz.

Die Anwesenheit eines Precursor zeigte auch einen Einfluss auf die Steigung der Verbindungslinien zwischen den Schwellenwerten, wenn der Maskierer eine Lücke hat oder nicht. Für diotische Zielsignale führte die Anwesenheit eines Precursor zu einer größeren Steigung. Für dichotische Zielsignale zeigten sich, außer bei Nachverdeckung und einem *NNP4*, annähernd parallel verlaufende Verbindungslinien.

Im Vergleich der Simultan- (Teilbild A und C) und Nachverdeckung (Teilbild B und D) zeigte sich in der Nachverdeckung eine Verschiebung aller Schwellenwerte nach unten. Die Differenzen der Schwellenwerte der einzelnen Konditionen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

	<i>NoP</i>		<i>NNP4</i>		<i>NNP8</i>	
	$S_0$	$S_\pi$	$S_0$	$S_\pi$	$S_0$	$S_\pi$
$N_{0Hz}$	21	17	13	10	15	13
$N_{400Hz}$	22	15	16	12	19	11

Tabelle 4: Tabellarische Darstellung der Differenzen zwischen den Schwellenwerten der simultan und nachverdeckten Zielsignale. Die Differenzen sind jeweils auf ganze Zahlen gerundet. *NNP4* zeigt die Werte für einen Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz, *NNP8* mit einer von 800 Hz und *NoP* ohne die Anwesenheit eines Precursor.  $S_0$  steht für diotische Zielsignale  $S_\pi$  für dichotische.  $N_{0Hz}$  zeigt die Werte für einen Maskierer ohne Lücke und  $N_{400Hz}$  für einen mit einer Lückenbreite von 400 Hz.

Im folgenden Abschnitt geht um den Einfluss der Nachverdeckung eines Precursor auf das Zielsignal, ohne die Anwesenheit eines Maskierers.

Die horizontalen gestrichelten Linien in Abbildung 16 zeigen die Baseline-Kondition. Durch die Anwesenheit eines Precursor erhöhten sich die Schwellenwerte. Für diotische Zielsignale erhöhten diese sich um 5 dB in Anwesenheit eines *NNP4* (Teilbild A) und um 2 dB eines *NNP8* (Teilbild C). Für dichotische Zielsignale um jeweils 3 und 2 dB (Teilbild B und D).

Wurde das Zielsignal dichotisch präsentiert, so reduzierten sich die Schwellenwerte nur in Anwesenheit eines *NNP4*. In Abwesenheit eines Precursor zeigte sich nahezu keine Veränderung. In Anwesenheit des *NNP4* reduzierte sich der Schwellenwert um 2 dB. In Anwesenheit des *NNP8* zeigte sich kein Einfluss, wenn das Zielsignal dichotisch präsentiert wurde.

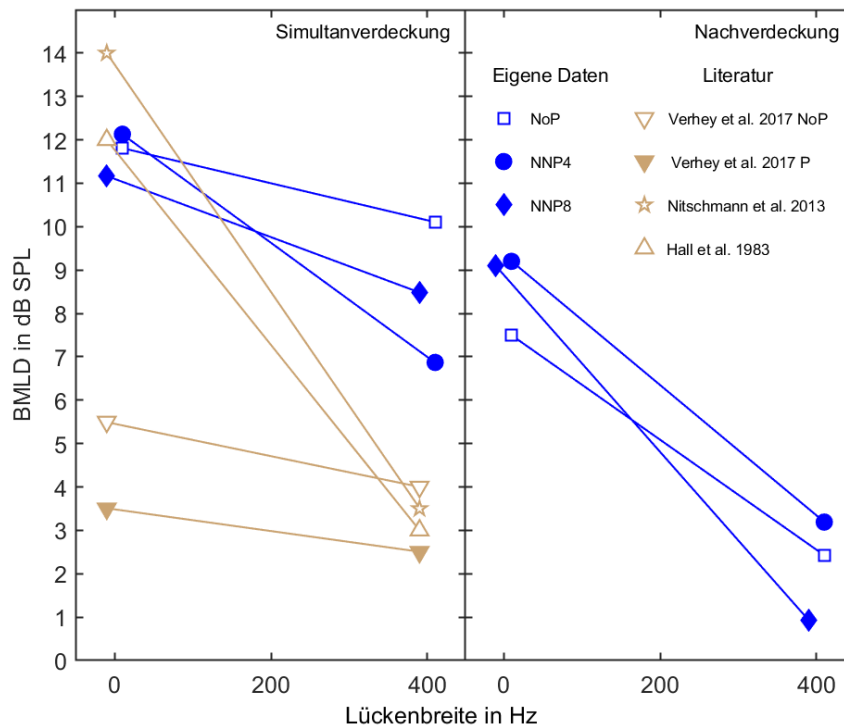


Abbildung 17: Graphische Darstellung der BMLD (in dB SPL) in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers, basierend auf den Mittelwerten aller Versuchspersonen. Die linken Teilabbildungen zeigen die BMLD der Simultanverdeckung, die rechten die der Nachverdeckung. Blaue Symbole repräsentieren die Ergebnisse dieser Arbeit, goldene solche aus der Literatur mit identischer Signalfrequenz. Nicht gefüllte Symbole stehen für Bedingungen ohne Precursor, gefüllte für solche mit Precursor. Quadrate kennzeichnen Messungen ohne Precursor, Kreise mit *NNP4* und Rauten mit *NNP8*. Nach unten gerichtete Dreiecke zeigen Daten aus (Verhey et al. 2017) mit einem 1000-Hz-Zielsignal von 25 ms Dauer, nach oben gerichtete Dreiecke Daten aus (Hall et al. 1983) mit einem 500-Hz-Zielsignal von 300 ms, und Pentagramme die Ergebnisse aus (Nitschmann et al. 2013) mit gleicher Signalfrequenz und Dauer. Zur besseren Lesbarkeit sind die Quadrate auf der X-Achse um 5 Hz nach rechts und die Rauten um 5 Hz nach links verschoben. Die Darstellung wurde modifiziert nach (Dymel et al. 2021).

Wurde das Zielsignal mit einer interauralen Phasendifferenz von  $\pi$  ( $S_\pi$ ) präsentiert, so sanken die Schwellenwerte in allen Konditionen. Die Differenz zwischen den diotischen ( $S_0$ ) und dichotischen ( $S_\pi$ ) Schwellenwerte wird BMLD genannt. In Abbildung 17 ist eine Darstellung der BMLD der Mittelwerte abgebildet. Die Graphen zeigen die BMLD in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers. Auf der linken Seite sind die Daten der BMLD der Simultanverdeckung und auf der rechten Seite die BMLD der Nachverdeckung. Die blauen Symbole zeigen die Daten aus dieser Studie, die goldenen Symbole die Daten aus der Literatur. Die leeren Symbole zeigen die Daten ohne Precursor und die gefüllten Symbole die in Anwesenheit eines Precursor.

Sowohl in der Simultan- als auch in der Nachverdeckung, zeigte sich für alle Konditionen eine Verringerung der BMLD, wenn die Lückenbreite des Maskierers vergrößert wurde. In der Simultanverdeckung verringerte sich die BMLD ohne die Anwesenheit eines Precursor um 2 dB, wenn die Lückenbreite des Maskierers vergrößert wurde. In Anwesenheit eines *NNP4* verringerte sich die BMLD um 5 dB und in Anwesenheit eines *NNP8* um 3 dB. In der Nachverdeckung verringerte sich die BMLD ohne die Anwesenheit eines Precursor um 5 dB. In Anwesenheit eines *NNP4* verringerte sich die BMLD um 6 dB und in Anwesenheit eines *NNP8* um 8 dB. Diese Differenzen zwischen den BMLD's wird nun als  $BMLD_{diff}$  bezeichnet.

Es zeigte sich somit eine Vergrößerung der Steigung der Verbindungslinien zwischen einem Maskierer ohne und mit Lücke.

In der Simultanverdeckung zeigte sich eine Reduktion der BMLD bei eingeschaltetem Precursor. Allerdings zeigte sich eine Erhöhung der BMLD (0,3 dB) bei einem Maskierer ohne Lücke und einem *NNP4*. Bei einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz zeigte sich eine Verringerung der BMLD um 3 dB. In Anwesenheit eines *NNP8* verringerte sich die BMLD um 1 dB bei einem Maskierer ohne Lücke und um 2 dB mit einer Lücke von 400 Hz. In der Nachverdeckung war die BMLD in Anwesenheit eines *NNP4* größer. Bei einem Maskierer ohne Lücke war diese um 2 dB und bei einem mit Lücke um 0,5 dB größer. Bei eingeschaltetem *NNP8* war die BMLD bei einem  $N_0$  um 2 dB größer und bei einem  $N_{400}$  um 1,5 dB geringer.

Es wurden die Daten der Simultan- und Nachverdeckung mit dem Mauchly Test auf Sphärizität überprüft. Dieser Test zeigte keine Signifikanz, wodurch Sphärizität für die ANOVA's angenommen werden konnte. Als Post-Hoc Test wurde für einen paarweisen Vergleich im Anschluss der ANOVA, Bonferroni mit einem  $\alpha$ -Fehler von 5% durchgeführt.

Zur Überprüfung des Einflusses der Lückenbreite des Maskierers (keine Lücke oder 400 Hz-Lücke) alleine oder mit eingeschaltetem Precursor (*NNP4* oder *NNP8*) auf die Schwellenwerte des Zielsignals, wurde eine ANOVA mit Messwiederholungen durchgeführt. Diese wurde sowohl für den Datensatz der Simultanverdeckung als auch für die Nachverdeckung durchgeführt.

Für das Simultanverdeckungs-Experiment waren die Faktoren folgende: die Lückenbreite des Maskierers (zwei Stufen: 0 und 400 Hz), der Precursor (drei Stufen: *NoP*, *NNP4* und *NNP8*) und die Signalphase (zwei Stufen:  $S_0$  und  $S_\pi$ ). Es gab einen signifikanten Effekt des Precursor [ $F_{(2,24)} = 19,15$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,62$ ], der Lückenbreite des Maskierers [ $F_{(1,12)} = 282,81$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,96$ ], und der Signalphase [ $F_{(1,12)} = 44,34$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,79$ ]. Zusätzlich zeigte sich eine signifikante zweifaktorielle Interaktion zwischen der Signalphase und der Lückenbreite des Maskierers [ $F_{(1,12)} = 20,49$ ;  $p < 0,01$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,63$ ] und eine signifikante dreifaktorielle Interaktion zwischen der Signalphase, der Lückenbreite des Maskierers und des Precursor [ $F_{(2,24)} = 5,46$ ;  $p < 0,05$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,31$ ].

Der paarweise Vergleich, Post-Hoc, der Schwellenwerte des Zielsignals mit den einzelnen Faktoren zeigte, dass unabhängig davon, welche Lückenbreite der Maskierer hat oder ob und welcher Precursor angeschaltet ist, die Schwellenwerte des diotischen ( $S_0$ ) Zielsignals signifikant höher sind als die eines dichotischen ( $S_\pi$ ) ( $p < 0,001$ ). Die Betrachtung der Schwellenwerte in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers zeigte, dass unabhängig von der Signalphase oder des Precursor die Schwellenwerte bei einer Lückenbreite von 0 Hz signifikant höher sind als die mit einer Lückenbreite von 400 Hz ( $p < 0,001$ ). Gleiches wurde auch für die Betrachtung des Einflusses des Precursor auf die Schwellenwerte des Zielsignals durchgeführt. Schwellenwerte ohne Anwesenheit eines Precursor (*NoP*) waren signifikant höher als in Anwesenheit eines *NNP4* ( $p < 0,01$ ) und Schwellenwerte in Anwesenheit eines *NNP4* waren signifikant geringer als die in Anwesenheit eines *NNP8* ( $p < 0,01$ ).

Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, zur Untersuchung der drei-faktoriellen Interaktion zeigte, dass die Anwesenheit des *NNP4* den Schwellenwert eines  $S_0$  in Anwesenheit eines simultanen Maskierers mit einer Lückenbreite von 400 Hz signifikant senkt, im Vergleich zu einer Abwesenheit des Precursor ( $p < 0,05$ ). Zusätzlich zeigte sich, dass die Verringerung des Schwellenwertes eines  $S_0$  bei eingeschaltetem Maskierer (Lücke: 400 Hz) in Anwesenheit eines *NNP4* signifikant höher war, als in Anwesenheit eines *NNP8* ( $p < 0,05$ ). Wurden die Schwellenwerte eines  $S_\pi$  bei eingeschaltetem Maskierer ohne Lücke bestimmt, so war die Verringerung des Schwellenwertes in Anwesenheit eines *NNP4* signifikant höher als in Anwesenheit eines *NNP8* ( $p < 0,05$ ) oder in Abwesenheit des Precursor ( $p < 0,01$ ).

Für das Nachverdeckungsexperiment wurde dieselbe Analyse durchgeführt. Für die ANOVA wurden dieselben Faktoren bestimmt. Es gab einen signifikanten Effekt des Maskierers [ $F_{(1,12)} = 454,18$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,97$ ], des Precursor [ $F_{(2,24)} = 15,78$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,57$ ] und der Signalphase [ $F_{(1,12)} = 30,81$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,72$ ], auf den Schwellenwert des Zielsignals. Es zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen der Phase des Zielsignals und der Lückenbreite des Maskierers [ $F_{(1,12)} = 42,05$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,78$ ] sowie des Precursor und der Lückenbreite des Maskierers [ $F_{(2,24)} = 13,01$ ;  $p < 0,001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,52$ ].

Der paarweise Vergleich, Post-Hoc, der Schwellenwerte des Zielsignals mit den einzelnen Konditionen zeigte auch hier, dass unabhängig davon, welche Lückenbreite der Maskierer hat oder ob und welcher Precursor angeschaltet ist, die Schwellenwerte des diotischen ( $S_0$ ) Zielsignals signifikant höher sind ( $p < 0,001$ ). Auch der Einfluss des Maskierers auf die Schwellenwerte des Zielsignals zeigte, dass unabhängig von der Signalphase oder des Precursor die Schwellenwerte bei einer Lückenbreite von 0 Hz signifikant höher sind als die mit einer Lückenbreite von 400 Hz ( $p < 0,001$ ). Der Vergleich mit dem Precursor zeigte, dass unabhängig von der Signalphase und Maskierer, die Schwellenwerte ohne die Anwesenheit eines Precursor signifikant geringer waren als in Anwesenheit eines mit einer 400 Hz-Lücke ( $p < 0,05$ ) oder 800 Hz-Lücke ( $p < 0,001$ ).

Der paarweise Vergleich, Post-Hoc, zwischen dem Precursor und dem Maskierer zeigte, dass unabhängig von der Signalphase die Schwellenwerte signifikant größer sind, wenn der Maskierer keine Lücke hat, egal ob der Precursor an- oder abgeschaltet ist ( $p < 0,001$ ). Der Vergleich zwischen der Signalphase und dem Maskierer zeigte, unabhängig von der Signalphase signifikant höhere Schwellenwerte für den Maskierer ohne Lücke ( $p < 0,001$ ).

Für den Vergleich der Ergebnisse der BMLD in Abhängigkeit von dem Maskierungsexperiment (Simultan- oder Nachverdeckung), der Maskierer- und der Precursor-Kondition, wurde eine ANOVA mit Messwiederholungen durchgeführt. Die drei Faktoren waren folgende: die Lückenbreite des Maskierers (zwei Stufen: keine Lücke, 400 Hz Lücke), die Art des Precursor (drei Stufen: *NoP*, *NNP4*, *NNP8*) und das Maskierungsexperiment (2 Stufen: Simultan- und Nachverdeckung). Es konnte ein signifikanter Effekt des Maskierers [ $F_{(1,12)} = 80,46$ ;  $p < 0,0001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,87$ ], des Maskierungsexperimentes [ $F_{(1,12)} = 22,35$ ;  $p < 0,0001$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,65$ ] gezeigt werden. Auch zeigte sich eine signifikante Interaktion sowohl zwischen dem Maskierungsexperiment und der Art des Precursor [ $F_{(2,24)} = 6,21$ ;  $p < 0,01$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,34$ ], als auch zwischen der Art des Precursor und der Lückenbreite des Maskierers [ $F_{(2,24)} = 6,14$ ;  $p < 0,01$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,34$ ], im Bezug auf die BMLD. Zusätzlich zeigte sich auch eine dreifaktorielle Interaktion zwischen dem Maskierungsexperiment, der Art des Precursor und der Lückenbreite des Maskierers [ $F_{(2,24)} = 3,47$ ;  $p < 0,05$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,224$ ].

Ein paarweiser Vergleich, Post-Hoc, zeigte unabhängig von der Art des Precursor und der Lückenbreite des Maskierers, eine signifikant größere BMLD in der Simultanverdeckung als in der Nachverdeckung ( $p < 0,001$ ).

Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, des Effektes der Lückenbreite des Maskierers, zeigte eine signifikant größere BMLD für Maskierer ohne Lücke als mit einer Lückenbreite von 400 Hz ( $p < 0,001$ ), unabhängig von dem Maskierungsexperiment oder der Art des Precursor.

Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, zwischen dem Maskierungsexperiment und der Art des Precursor zeigte, unabhängig von der Lückenbreite des Maskierers, für jede Art des Precursor eine signifikant größere BMLD in der Simultanverdeckung als in der Nachverdeckung ( $p < 0,01$ ).



Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, zwischen der Lückenbreite des Maskierers und der Art des Precursor, unabhängig von dem Maskierungsexperiment, zeigte bei allen Arten des Precursor eine größere BMLD für einen Maskierer ohne Lücke als mit einer Lückenbreite von 400 Hz ( $p < 0,001$ ).

Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, einer drei-faktoriellen Untersuchung der Interaktion zwischen dem Maskierungsexperimentes, der Lückenbreite des Maskierers und der Art des Precursor zeigte, bei jedem Precursor (*NoP*, *NNP4*, *NNP8*) und einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz, eine signifikant größere BMLD in der Simultanverdeckung als in der Nachverdeckung ( $p < 0,05$ ). In dem Fall, in dem ein *NNP8* zusammen mit einem Maskierer ohne Lücke präsentiert wurde, zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Simultanverdeckung und der Nachverdeckung.

Die Verringerung der BMLD bei größerer Lückenbreite des Maskierers deutet auf breitere auditorische Filter im binauralen als im monauralen System hin. Durch die Einführung eines Precursors, scheint sich der Effekt, den die Einführung einer Lücke in den Maskierer auslöst, zu verstärken. Dies könnte darauf hinweisen, dass sich die Relation der Filterbandbreiten zwischen monaralem und binauralem System ändert.

Für die statistische Betrachtung der Veränderungen der Relation der Filter zwischen dem monauralen und binauralen System, wurde die  $BMLD_{diff}$  verwendet. Für die ANOVA waren die Faktoren das Maskierungsexperiment (zwei Stufen: Simultan- und Nachverdeckung) und die Art des Precursor (drei Stufen: *NoP*, *NNP4*, *NNP8*). Es zeigte sich ein signifikanter Effekt des Precursor [ $F_{(2,24)} = 6,14$ ;  $p < 0,01$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,34$ ] und eine signifikante Interaktion zwischen dem Precursor und dem Maskierungsexperimentes [ $F_{(2,24)} = 3,47$ ;  $p < 0,05$  mit einer Effektstärke,  $\eta^2 = 0,22$ ].

Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, zeigte das die  $BMLD_{diff}$  nach dem Einschalten eines *NNP4* oder *NNP8* signifikant größer war ( $p < 0,05$ ), unabhängig von dem Maskierungsexperiment. Das bedeutet, dass die Differenz zwischen der Größe der Filterbandbreiten zwischen dem monauralen und binauralen Systems sich in Anwesenheit eines Precursor erhöht. Ein weiterer paarweiser Vergleich, Post Hoc, zwischen dem Maskierungsexperiment der Art des Precursor zeigte, dass die  $BMLD_{diff}$  signifikant größer in der *NoP* und *NNP8* Kondition war, wenn das Experiment in Nachverdeckung durchgeführt wurde ( $p < 0,05$ ). Es zeigte sich eine durchschnittliche Differenz der  $BMLD_{diff}$  zwischen dem Simultan- und Nachverdeckungsexperiment von 3,23 dB (*NoP*) und 5,48 dB (*NNP8*). Daraus kann geschlossen werden, dass die Veränderung der Relation der Filter zwischen dem monauralen und binauralen System größer in dem Nachverdeckungs- als in dem Simultanverdeckungsexperiment ist.

Um den Einfluss der Nachverdeckung des Precursor auf das Zielsignal (ohne die Anwesenheit des Maskierers) zu analysieren wurde eine ANOVA mit Messwiederholungen durchgeführt. In dieser Kondition wurden die Schwellenwerte eines  $S_0$  und  $S_\pi$  in An- oder Abwesenheit des Precursor (*NNP4* oder *NNP8*) bestimmt. Für die ANOVA gab es zwei Faktoren: die Signalphase (zwei Level:  $S_0$  oder  $S_\pi$ ) und die Art des Precursor (drei Level: *NoP*, *NNP4* und *NNP8*). Es zeigte sich ein signifikanter Effekt der Signalphase [ $F_{(1,12)} = 19,23$ ;  $p < 0,01$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,62$ ], der Art des Precursor [ $F_{(2,24)}$

= 30,76;  $p < 0,001$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,72$ ] und eine signifikante Interaktion zwischen der Signalphase und des Art des Precursor [ $F_{(4,28)} = 3,50$ ;  $p < 0,05$  mit einer Effektgröße,  $\eta^2 = 0,23$ ].

Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, zeigte einen Einfluss von Nachverdeckung des Precursor auf das Zielsignal. Schwellenwerte eines Zielsignals ( $S_0$  oder  $S_\pi$ ) waren in Anwesenheit eines jeden Precursor (*NNP4* oder *NNP8*) signifikant höher als in Abwesenheit eines Precursor ( $p < 0,01$ ). Schwellenwerte eines Zielsignals ( $S_0$  oder  $S_\pi$ ) waren in Anwesenheit eines Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz signifikant höher als in Anwesenheit eines Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz. ( $p < 0,01$ ). Ein paarweiser Vergleich, Post Hoc, zur Untersuchung der Interaktion zwischen der Signalphase und den Precursor-Konditionen (*NoP* und *NNP8*) zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den absoluten Schwellenwerten der Zielsignale in An- oder Abwesenheit eines Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz. Wurde das Zielsignal in Anwesenheit eines *NNP4* präsentiert, so waren die Schwellenwerte für ein  $S_0$  signifikant höher als für ein  $S_\pi$  ( $p < 0,01$ ).

## 4. Diskussion

In diesem Abschnitt erfolgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse dieser Arbeit. Zunächst werden die diotischen und dichotischen Datensätze ohne Precursor verglichen und in Bezug auf die Literatur gesetzt. Anschließend wird betrachtet, was für einen Einfluss der Precursor auf diese Daten hat. Als nächstes wird der Einfluss der Nachverdeckung eines Precursor betrachtet, wenn dieser eine spektrale Lücke enthält. Nach dieser allgemeinen Betrachtung, wird beurteilt, inwieweit der MOC-Reflex die Datensätze erklärt. Zum Schluss werden noch andere Prozesse betrachtet, die den Effekt des Precursor erklären könnten.

### 4.1. Vergleich der diotischen und dichotischen Daten ohne Anwesenheit des Precursor

(Patterson 1976) war eine der ersten Studien, die die „Notched-Noise“-Methode zur Ausmessung des auditorischen Filters vorstellte. Bei dieser Art von Experiment wird der Schwellenwert eines Sinuszielsignals in Anwesenheit eines Rauschmaskierers mit einer spektralen Lücke (englisch „Notch“) gemessen. Mit zunehmender Lückenbreite sinkt der Schwellenwert, was dadurch erklärt wird, dass mit zunehmender Lückenbreite des Maskierers immer weniger der Energie des Maskierers den auditorischen Filter erreicht.

In allen Maskierungs-Konditionen der vorliegenden Arbeit, sowohl in der Simultan- als auch in der Nachverdeckung, zeigte sich eine signifikante Verringerung der Schwellenwerte, wenn die Lückenbreite des Maskierers von 0 Hz auf 400 Hz erhöht wurde. Dies ist auch im Einklang mit der Literatur (z.B. Patterson et al. 1980).

Bei den diotischen Zielsignalen sanken die Schwellenwerte in der Simultanverdeckung um 13 dB, wenn in den Maskierer eine 400 Hz Lücke eingefügt wurde. Im Vergleich zu anderen Studien in der Literatur

war dieser Effekt geringer. Bei einer Zielsignalfrequenz von 500 Hz wurden normalerweise Differenzen von über 20 dB gemessen (Hall et al. 1983, Nitschmann und Verhey 2013). Möglicherweise war die geringe Signaldauer ein Grund dafür. In dieser Arbeit wurde eine Zielsignaldauer von 10 ms gewählt, während in den meisten anderen Studien viel längere Signale (teilweise mehrere 100 ms lang) verwendet wurden. Ähnliche Ergebnisse wie in dieser Arbeit wurden von Verhey et al. aus dem Jahr 2017 erzielt, die ebenfalls ein kurzes Signal (25 ms) verwendet hatten. Der Abfall der Schwellenwerte, wenn eine 400 Hz Lückenbreite in den Maskierer eingefügt wurde, war in jener Studie 10 dB, wobei zu beachten ist, dass eine Frequenz von 1000 Hz verwendet wurde (Verhey et al. 2017).

Wird das Zielsignal dichotisch anstatt diotisch präsentiert, so sinkt der Schwellenwert um 12 dB, wenn der Maskierer keine Lücke hat. Im Vergleich zu (Verhey et al. 2017) ist diese BMLD größer (ca. 6 dB). Dies könnte an der geringer gewählten Zielsignalfrequenz von 500 Hz anstatt der in (Verhey et al. 2017) gewählten 1000 Hz liegen, da die BMLD frequenzabhängig ist. Je kleiner die Frequenz des Zielsignals ist, desto größer ist die zu erreichende BMLD (Fastl und Zwicker 2007; Nitschmann et al. 2013).

In Abbildung 17 sind die BMLD's in Abhängigkeit von der Lückenbreite des Maskierers dargestellt. Jede Kondition in dieser Arbeit zeigt eine kleinere BMLD bei einem Maskierer mit Lücke als bei einem ohne. Dabei zeigt sich, dass die Steigung der diotischen Schwellenwertkurven größer ist als ihre korrespondierende dichotische. Auch andere Studien, welche Simultanverdeckung mit einem Notched-Noise Maskierer zeigten dieses Verhalten (Hall et al. 1983; Nitschmann et al. 2009, 2010; Nitschmann und Verhey 2013). Die Verringerung der BMLD bei einem  $N_{400}$  im Vergleich zu einem  $N_0$  deutet darauf hin, dass die Filter des binauralen Systems breiter sind als des monauralen. Die Ursache hierfür ist immer noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen.

Bereits zahlreiche andere Autoren haben mit Fletchers Bandbreiten-Experiment Schwellenwerte eines Zielsignals, mit einer interauralen Phasendifferenz von  $\pi$ , welches von einem diotischen Maskierer ( $NS_\pi$ ) verdeckt wurde, gemessen (Bourbon und Jeffress 1965; Wightman 1971; Sever und Small 1979; Hall et al. 1983; Zurek und Durlach 1987). Die Daten zeigen, dass die Schwellenwerte von ( $NS_\pi$ ) mit größer werdender Bandbreite des Maskierers noch weiter ansteigen, nachdem die Kritische Bandbreite bereits erreicht wurde, die durch Schwellenwerte eines Zielsignal ohne interauraler Phasendifferenz ( $NS_0$ ) bestimmt wurden. Somit verringert sich die Differenz der Schwellenwerte zwischen diotischen und dichotischen Zielsignalen (BMLD), wenn die Bandbreite des Maskierers erhöht wird. Dahinter wurden breitere Filter und somit eine geringere Frequenzselektivität vermutet (Sondhi und Guttman 1966; Yama und Robinson 1982; Nitschmann et al. 2009). Hall et al. und van de Par und Kohlrausch vermuteten, dass die Frequenzselektivität des monauralen und binauralen Systems gleich sind (Hall et al. 1983; van de Par und Kohlrausch 1999). Es begann damit, dass Hall et al. die BMLD und damit die Frequenzselektivität des monauralen und binauralen Systems sowohl mit dem Bandbreiten-Experiment als auch mit der Notched-Noise Methode bestimmten. Das Bandbreiten-Experiment zeigte, wie auch bei den anderen oben genannten Autoren, breitere binaurale Filter. Die Notched-Noise Methode

deuteten jedoch, nach Hall et al., auf ähnliche monaurale und binaurale Filter hin. Sie vermuteten, dass für breitere binaurale Filter im Bandbreiten-Experiment ein "detrimental across-channel" Prozess verantwortlich ist. Das binaurale System verwendet die Informationen sowohl aus der Frequenzgruppe des dichotischen Zielsignals als auch aus anderen Frequenzbereichen, in denen die Energie des Maskierers zusätzlich fällt, welche jedoch keine binaurale Information enthält. Hat der Maskierer eine größere Bandbreite als die Kritische Bandbreite, so führt dies zu einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis, was die Identifizierung des dichotischen Zielsignals erschwert. Wird als Maskierer ein Schmalbandrauschen genutzt, so wird nur die Information genutzt, die in die Frequenzgruppe mit dem dichotischen Zielsignal fällt. Die nachteilige Information der benachbarten Filter wird somit auf ein Minimum reduziert (Verhey und van de Par 2018).

van de Par und Kohlrausch stellten 1999 die Theorie eines "beneficial across-channel" Prozesses auf, zur Erklärung der breiteren binauralen Filter im Bandbreiten-Experiment. Auch hier spielten benachbarte Filter des zentralen Filters eine entscheidende Rolle. Wird ein Zielsignal von einem Schmalbandrauschen maskiert, so ist das Signal-Rausch-Verhältnis in den benachbarten Filtern ähnlich zu dem des zentralen Filters. Sie liefern dem zentralen Filter somit zusätzliche Information zur Detektion des Signals. Im dichotischen Fall kann dieser Informationsgewinn durch die benachbarten Filter nicht optimal genutzt werden, da Fluktuation im Maskierer die Detektion des Signals behindern (Bos und Boer 1966). Diese Fluktuationen befinden sich in diesem Fall sowohl im zentralen als auch in dem benachbarten Filter. Diese Fluktuationen treten im dichotischen Fall nicht auf, da sie sich gegenseitig auslöschen. Wird der Maskierer nun breiter, dann wird das Signal-Rausch-Verhältnis in den benachbarten Filtern schlechter, womit der "beneficial across-channel" Prozess im dichotischen und dichotischen System nicht benutzt werden kann. Dies erklärt die kleiner werdende BMLD mit breiter werdendem Maskierer, was einem breiteren binauralen Filtern entspricht (van de Par und Kohlrausch 1999; Nitschmann et al. 2009).

Breebaart et al. entwickelten anhand dieser Theorie ein Model und zeigten tatsächlich breitere binaurale Filter im Bandbreiten-Experiment (Breebaart et al. 2001).

In einer Studie von Nitschmann et al. wurde überprüft, ob sich die Ergebnisse der Notched-Noise Methode besser mit der Hypothese des "detrimental" oder "beneficial across-channel" Prozess erklären lassen. Sie zeigten, dass weder die Theorie von (Hall et al. 1983) noch die Theorie von (van de Par und Kohlrausch 1999) vollständig die Ergebnisse der Notched-Noise Methode erklären. Es zeigte sich eine Verringerung der BMLD bei Vergrößerung der Lückenbreite des Maskierers, was auf effektiv breitere binaurale Filter hindeutet (Nitschmann et al. 2009). Auch andere Studien zeigten breiter binaurale Filter mit der Notched-Noise Methode (Nitschmann et al. 2010; Nitschmann und Verhey 2013; Verhey et al. 2017).

Die Daten von (Hall et al. 1983) und (Nitschmann et al. 2013) zeigen für 500 Hz ähnlich große BMLD's wie diese Arbeit. Beide verwendeten ein Zielsignal mit einer Dauer von 300 ms (in dieser Arbeit 10 ms). Hall et al. ermittelten in derselben Kondition eine BMLD von 12 dB und Nitschmann et al. eine BMLD von 14 dB. Dies ist im Einklang mit der Erklärung, dass eine geringere Zielsignalfrequenz zu einer höheren BMLD führt. Diese Daten sind mit den Daten dieser Arbeit vergleichbar. Allerdings wäre bei einer längeren Signaldauer eine größere BMLD zu erwarten gewesen. Verhey und Yasin zeigten eine größere BMLD bei längeren Signaldauern. Bei einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz lag die BMLD von Hall et al. und Nitschmann et al. bei nur noch ca. 3 dB, wohingegen in dieser Arbeit die BMLD bei 10 dB lag (Verhey und Yasin 2017). Dies könnte durch eine spektrale Verbreiterung durch eine kurze Signaldauer erklärt werden.

Diese Arbeit erweitert die bisherigen binauralen Daten von Notched-Noise-Experimenten um die Komponente der Nachverdeckung. Auch in der Nachverdeckung sind die Schwellenwerte dichotischer Zielsignale kleiner als die von diotischen. Dies konnten auch andere Studien zeigen, in denen ein „broadband uniform-exciting noise masker“ benutzt wurde (Kohlrausch und Fassel 1997; Zwicker und Zwicker 1997). Dies bedeutet, dass der binaurale Informationsgewinn nicht nur auf einer simultanen Interaktion zwischen Maskierer und Zielsignal beruht, sondern auch bei nachverdeckten Interaktionen vorkommt.

Weiterhin zeigte sich in dieser Arbeit, dass die BMLD in der Simultanverdeckung signifikant größer ist, als die BMLD der Nachverdeckung. Yost und Walton zeigten für ein 20 ms Zielsignal einen viel größeren Unterschied. In dieser Arbeit war die BMLD für den Breitbandmaskierer in der Simultan und Nachverdeckung, 12 dB und 8 dB. Bei Yost und Walton zeigten sich 17 dB und 9 dB. Gründe für den Unterschied könnten auf einer Seite die kürzere Signaldauer von 10 ms in dieser Arbeit sein und auf der anderen Seite die interindividuellen Unterschiede (Yost und Walton 1977). Yama machte individuelle Messungen der BMLD. Es zeigten sich BMLD's von 3-6 dB für ein 15 ms langes 500 Hz Zielsignal. Die individuellen Daten zeigen eine große Streuung der BMLD's besonders bei kurzen Signaldauern, obwohl vorher eine Trainingsphase von 20h durchlaufen wurde, sodass auch mangelndes Training nicht zur Erklärung der individuellen Unterschiede herangezogen werden kann (Yama 1985). Eine weitere Erklärung für den Unterschied der BMLD zwischen Simultan- und Nachverdeckung könnte der Effekt der Intensität des Maskierers auf die BMLD sein. Bei Breitbandmaskierer mit einem festen Spektrum konnte eine Verringerung der BMLD gezeigt werden, wenn die Intensität des Maskierers reduziert wird (Nitschmann et al. 2009). Für die gemessenen BMLD's mit einem Maskierer mit einer spektralen Lücke trifft dieser Effekt nicht zu. Dies konnte ebenfalls durch Nitschmann et al. gezeigt werden (Nitschmann et al. 2009). Das Power-Spektrum Model (de Boer und Bos 1962) besagt, dass der Anteil des Maskierers, der in den auditorischen Filter fällt, den Schwellenwert für diotische Zielsignale bestimmt. Nitschmann et al. zeigten beim Vergleich ihrer beiden Experimente, dass die BMLD für einem Bandstoppmaskierer kleiner war als erwartet, im Vergleich zu der BMLD, wo die Intensität des Maskierers variiert wurde (Nitschmann et al. 2009).

Die Steigung der diotischen Schwellenwertkurve ist in der Nachverdeckung größer als die in der Simultanverdeckung. Dies deutet auf eine größere Frequenzselektivität bei nachverdeckten als bei simultanverdeckten Zielsignalen hin. Ähnliche Ergebnisse konnten auch in anderen Studien gezeigt werden (Moore und Glasberg 1981; Unoki et al. 2007). Auch in Arbeiten in denen psychoakustische Tuning-Kurven bestimmt wurden, konnte eine größere Frequenzselektivität bei nachverdeckten Zielsignalen gezeigt werden. Es wurde vermutet, dass dies auf Zwei-Ton-Suppression zurückgeführt werden könnte. Die Zwei-Ton-Suppression könnte das Zielsignal in der Simultanverdeckung verringern. In der Nachverdeckung hat sie jedoch keinen Einfluss auf das Zielsignal (Moore 1978; Oxenham und Shera 2003).

## **4.2. Vergleich der Ergebnisse in Anwesenheit des Precursors**

Ein Ziel dieser Arbeit war die Erweiterung der Ergebnisse von (Verhey et al. 2017). Allerdings widersprechen die Ergebnisse dieser Arbeit teilweise denen von (Verhey et al. 2017). Verhey et al. zeigten, eine Verringerung der Steigung der Schwellenwertkurven in Anwesenheit des Precursors. In dieser Arbeit ist die Steigung in Anwesenheit des Precursors jedoch größer. Der hauptsächliche Unterschied dieser beiden Studien war das Spektrum des Precursors. Verhey et al. verwendeten einen Precursor ohne spektrale Lücke, während in dieser Arbeit ein Precursor mit einer spektralen Lücke von 400 Hz und 800 Hz verwendet wurde. Andere Studien, die einen Precursor mit einer spektralen Lücke verwendeten, zeigten ähnliche Ergebnisse wie in dieser Arbeit.

Carlyon veröffentlichte 1988 ein Experiment, welches ähnlich zu dem diotischen simultanverdeckten Zielsignal dieser Arbeit war. Er ermittelte Schwellenwerte eines Zielsignals mit einer Frequenz von 1000 Hz, welches simultan von einem Maskierer verdeckt wurde. Der Maskierer wurde ohne Lücke oder mit einer spektralen Lücke unterschiedlichen Breiten präsentiert. Vor dem Signal-Maskierer-Komplex wurde ein Precursor (Carlyon verwendete den Begriff „Primer“) ein- oder ausgeschaltet. In einer Kondition hatte der Precursor immer dasselbe Spektrum wie der Maskierer. In der Kondition mit einem Maskierer ohne spektraler Lücke, waren die Schwellenwerte in An- oder Abwesenheit des Precursors nahezu gleich. Wurde die Lückenbreite erhöht, so zeigte sich eine größere Verringerung des Schwellenwertes in Anwesenheit des Precursors (Carlyon 1988). Ähnliches zeigten auch Hicks und Bacon für Zielsignale einer Frequenz von 1000 Hz und 4000 Hz (Hicks und Bacon 1992). Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Studien und dieser Arbeit war, dass bei denen mit jeder Veränderung der Lückenbreite des Maskierers auch der Precursor angepasst wurde. In dieser Arbeit hatte der Precursor ein festes Spektrum, welches sich bei Änderung der spektralen Lücke des Maskierers nicht änderte. Trotzdem zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit bei einem diotisch simultanverdeckten Zielsignal ähnliche Ergebnisse wie die beiden anderen Studien. Insbesondere, wenn der Maskierer eine Lückenbreite von 400 Hz hatte, bei dem die Spektren des Maskierers und des Precursor gleich waren. Hatte der Maskierer eine Lückenbreite von 0 Hz, dann waren die Spektren für beide verwendeten

Precursor unterschiedlich. Carlyon und Hicks und Bacon erklärten, dass ein Unterschied der Spektren zwischen Precursor und Maskierer, den schwellenwertreduzierenden Effekt des Precursor verringert. In deren Studie zeigte die Anwesenheit des an den Maskierer angepassten Precursors bei einem Maskierer ohne Lücke nahezu keinen Effekt. Nun könnte angenommen werden, dass in dieser Arbeit, in der das Spektrum des Precursor bei einem Maskierer ohne Lücke ein anderes ist, der Precursor keinen Effekt zeigt. Dies ist allerdings nicht der Fall. In dieser Arbeit zeigt sich eine signifikante Verringerung der Schwellenwerte bei einem simultan verdecktes  $S_0$  für beide Lückenbreiten des Maskierers, durch die Anwesenheit des Precursors. Dennoch können die Erklärungen von Carlyon und Hicks und Bacon auf die Ergebnisse übertragen werden. Der NNP8 zeigte im Vergleich zum NNP4 einen deutlich geringeren schwellenwertreduzierenden Effekt. Beim NNP8 waren sowohl für einen Maskierer mit als auch ohne Lücke das Spektrum im Vergleich zum Spektrum der Maskierer unterschiedlich. Bei einem NNP4 war das Spektrum nur im Vergleich zu einem Maskierer ohne Lücke unterschiedlich. Der geringere schwellenwertreduzierende Effekt des NNP8, im Vergleich zum NNP4, bei einem diotisch simultanverdeckten Zielsignal könnte auf diesen größeren spektralen Unterschied zwischen Maskierer und Precursor zurückgeführt werden.

Zhou et al. untersuchten 2010 den Einfluss eines Precursors mit einer Dauer von 1s auf die Amplitudenmodulation und machte zusätzliche Messungen der cochleären Kompression mittels DPOAE's (distortion product otoacoustic emissions) mit unterschiedlichen Inputintensitäten. Sie führten Messungen durch, wo die Differenz zwischen Schwellenwerten eines Precursors mit und ohne spektraler Lücke bestimmt wurden. Dies nannten sie Sensibilisierung. Die Studie zeigt eine signifikante Korrelation zwischen Sensibilisierung und Messungen der DPOAE's bei der kleinsten Inputintensität. Zusätzlich zeigten auch sie, dass es durch das Zuschalten eines Precursors mit einer spektralen Lücke, im Vergleich ohne Precursor, zu einem reduzierten Schwellenwerten kommt. Sie vermuteten, dass die Sensibilisierung auf den Verstärkungsmechanismus durch die OHZ zurückzuführen ist. Sie zeigten, dass die Sensibilisierung 250 ms nach dem Precursor aufgetreten ist und diese Zeit viel länger war als die Dauer von cochleäre Kompression, die Refraktärzeit von Neuronen des auditorischen Nerven oder Nachverdeckung, dauern. Sie vermuteten daher einen Einfluss des MOC-Reflexes auf ihre Messergebnisse (Zhou et al. 2010).

Jennings und Strickland untersuchten 2012 den Einfluss des Precursors auf ein nachverdecktes Zielsignal, welches von einem Maskierer mit spektraler Lücke verdeckt wurde. Um den Schwellenwert zu bestimmen, wurde nicht die Intensität des Zielsignals, sondern die des Maskierers verändert. In Anwesenheit des Precursor wurde ein Maskierer einer geringeren Intensität benötigt, um das Zielsignal zu verdecken, als in Abwesenheit des Precursors. Vermutlich lag dies an der Art des Precursors. Jennings und Strickland verwendeten einen Sinuston als Precursor mit derselben Frequenz wie der des Zielsignals (Jennings und Strickland 2012). Da Carlyon in seiner Studie aus dem Jahre 1988 zeigte, dass Precursor mit ähnlichen Spektren wie das Zielsignal einen reduzierenden Effekt auf die Hörbarkeit des Zielsignals haben, könnte dies die Ursache für die geringeren Maskiererintensitäten sein. Jennings und

Strickland bestimmten auch Schwellenwertkurven mit einer geringeren Steigung in Anwesenheit des Precursor. Dies deutet auf eine geringere Frequenzselektivität in Anwesenheit des Precursors hin. Ähnliche Ergebnisse erzielten auch Verhey et al. in deren Studie aus dem Jahr 2017 mit einem Precursor ohne Lücke. Im Gegensatz dazu zeigten alle Daten mit einem Precursor mit spektraler Lücke, auch die Daten dieser Arbeit, eine größerer Frequenzselektivität in Anwesenheit des Precursor. Mögliche Erklärungen werden in Abschnitt 4.4 und 4.5 weiter diskutiert.

Diotische Schwellenwerte scheinen durch den Precursor mehr beeinflusst zu werden als dichotische. Dies sorgt für eine signifikante Erhöhung der Steigung der Verbindungslinien der BMLD's (siehe Abb. 17.). Dies zeigten 2017 auch Verhey et al., obwohl der Effekt des Precursors dort nicht deutlich ausgeprägt war. Es scheint, als würde sich der MOC-Reflex einem spezifischen binauralen Input bedienen. Diese Arbeit hat mit Verhey et al. gemein, dass die binaurale Frequenzselektivität durch den MOC-Reflex anders beeinflusst wird, als die monaurale (Verhey et al. 2017). Eine Überlegung ist, dass der MOC-Reflex binaurale Reize so verändert, um die Lokalisation von Zielsignalen im Raum zu verbessern (Darrow et al. 2006).

### **4.3. Der Einfluss der Nachverdeckung eines Notched-Noise Precursors**

(Verhey et al. 2017) beobachteten eine Schwellenwerterhöhung des Zielsignals durch den Precursor um 9 dB, wenn der Maskierer nicht präsentiert wurde. Dieser Schwellenwert war trotzdem noch mindestens 15 dB unter dem Schwellenwert, wenn der Maskierer eingeschaltet war. Trotzdem ist nicht auszuschließen, dass in (Verhey et al. 2017) eine Nachverdeckung durch den Precursor die Schwellen in Anwesenheit des Maskierers mit spektraler Lücke beeinflusst hat. (Verhey et al. 2017) verwendeten einen bandbreitenlimitierten Precursor mit einer Bandbreite von 60 Hz bis 2000 Hz. Die Intensität des Precursor betrug 63 dB SPL. Der Precursor hatte eine Dauer von 300 ms und wurde 50 ms vor dem Beginn des Zielsignals ausgeschaltet. In dieser Arbeit ist in vielen Aspekten der Precursor vergleichbar. Die Pause zwischen Precursor und Signal ist in dieser Arbeit 55 ms lang und der Precursor hatte eine Dauer von 325 ms und eine Intensität von 61 bzw. 62 dB SPL, abhängig von der Lückenbreite des Precursor. Durch diese Veränderung zeigt sich eine deutliche Verringerung der Maskierung des Zielsignals durch den Precursor. Die Maskierung des Zielsignals durch den Precursor (ohne Maskierer) bei einer Lückenbreite des Precursor von 400 Hz war lediglich 3 bis 4 dB, bei einer Lückenbreite von 800 Hz sogar nur 1 bis 2 dB. Somit sollte ein Nachverdeckungseffekt des Precursor auf das Zielsignal auf die Daten in Anwesenheit des Maskierers vernachlässigbar sein. Wodurch weitestgehend auszuschließen ist, dass die Daten mit Maskierer und Precursor durch Nachverdeckung durch den Precursor beeinflusst wurden.



#### 4.4. Einfluss des MOC-Reflexes auf die Ergebnisse

(Verhey et al. 2017) zeigten eine Verringerung der Steigung der Schwellenwertkurve in Anwesenheit des Precursor mit einer daraus resultierenden breiteren Frequenzselektivität durch den MOC-Reflex. Auch andere Studien zeigten größerer Filterbandbreiten in Anwesenheit des Precursor (Jennings et al. 2009; Jennings und Strickland 2012b). Diese Beobachtung passt zu der Tatsache, dass die Aktivierung des MOC-Reflexes zu einer Linearisierung der cochleären Verstärkung führt. Diese Arbeit scheint den gegenteiligen Effekt zu zeigen. Durch die Anwesenheit des Precursor wird der Effekt der Maskierlückenbreite auf die Schwellen größer als in Abwesenheit des Precursor, was auf eine Aufsteilung der Filter hinzudeuten scheint. Auch kann in dieser Arbeit beobachtet werden, dass in der Nachverdeckung der Schwellenwert bei einem Maskierer ohne Lücke durch den Precursor steigt, bei einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz nahezu keinen Einfluss zeigt und sich in der Simultanverdeckung jeweils verringert. Die Beobachtungen dieser Arbeit können mit den Veränderungen der cochleären Prozesse durch den MOC-Reflex erklärt werden, wenn eine Frequenzspezifität des MOC-Reflexes vorausgesetzt wird. Eine solche Frequenzspezifität wurde beispielsweise durch SFOAE's (Lilaonitkul und Guinan 2012) und durch psychophysische Methoden (Darrow et al. 2006) gezeigt. (Drga et al. 2016) zeigten mittels psychophysischer Methoden, dass sich der MOC-Reflex frequenzspezifisch verhält. In Abbildung 18 sind deren Ergebnisse nachgezeichnet. (Drga et al. 2016) zeigten, dass die Reduzierung der cochleären Verstärkung durch den MOC-Reflex am größten ist, je näher die Frequenz des Precursor an der des Zielsignals ist.

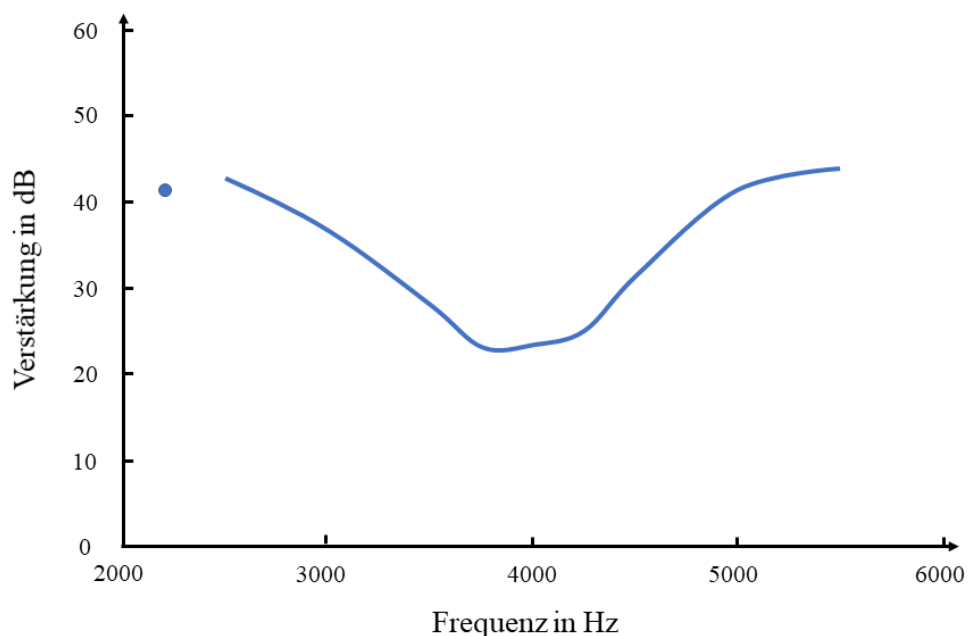


Abbildung 18: Darstellung der cochleären Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz des Precursor (durchgezogene Kurve). Der blaue Punkt zeigt die cochleäre Verstärkung ohne die Anwesenheit des Precursor (modifiziert nach (Drga et al. 2006)).

Abbildung 19 zeigt eine schematische Darstellung, wie sich die Frequenzspezifität des MOC-Reflexes auf den Effekt des Precursors bei diotisch simultanverdeckten Zielsignalen auswirkt. Die obere Zeile zeigt die Spektren des Maskierers und des Zielsignals. Die linke Seite zeigt den Maskierer ohne spektrale Lücke und die rechte Seite den Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz. Der rote vertikale Pfeil zeigt das simultanverdeckte Zielsignal und der grüne vertikale Pfeil das nachverdeckte Zielsignal.

Die mittlere Zeile zeigt die cochleäre Antwort auf die Stimuli, die in der oberen Reihe der Abbildung gezeigt sind. Durch die cochleäre Antwort werden der Maskierer und das Zielsignal verstärkt (dicker orangener Pfeil). Zusätzlich wird die cochleäre Verstärkung des mittleren Teils des Maskierers ohne Lücke (linke Seite) und das Zielsignal durch Zwei-Ton-Suppression reduziert. Die Suppression wird durch die dicken blauen Pfeile dargestellt. Das Signal-Rausch-Verhältnis zwischen dem Zielsignal und dem Maskierer wird dabei nicht verändert, da sowohl die maskierungsrelevanten Anteile des Maskierers als auch das Zielsignal durch die Zwei-Ton-Suppression gleichermaßen unterdrückt werden. Bei dem simultanverdeckenden Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz (rechts) wird nur das Zielsignal unterdrückt, wodurch ein höherer Schwellenwert, als ohne Suppression, erzielt wird. Nachverdeckte Zielsignale werden durch die Zwei-Ton-Suppression nicht beeinflusst, wodurch es zu einer steileren Schwellenwertkurve kommt als bei einem diotisch simultanverdeckten Zielsignal.

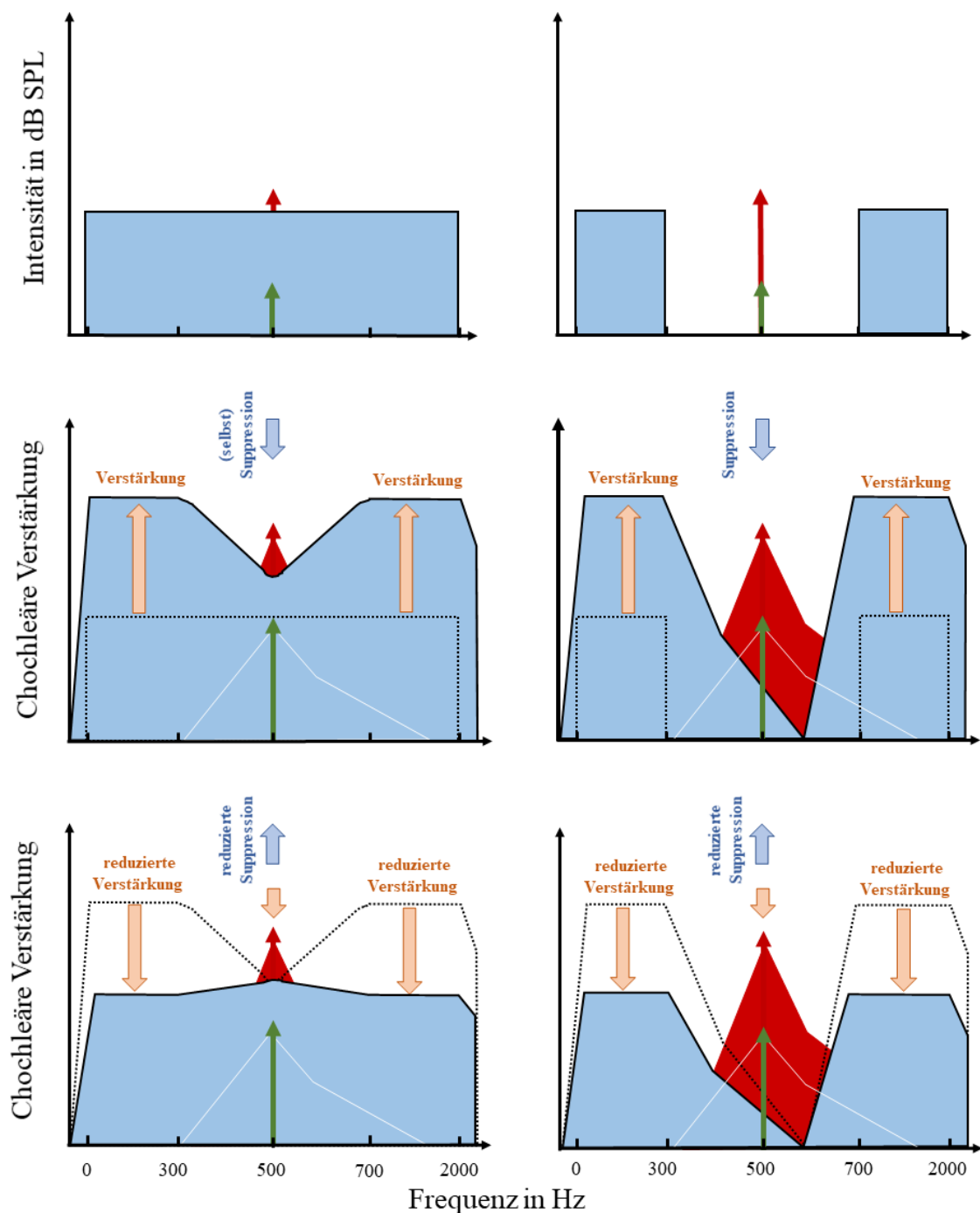


Abbildung 19: Die schematische Darstellung zeigt den Einfluss der cochleären Verstärkung, Zwei-Ton-Suppression und des MOC-Reflexes auf ein Zielsignal unter Maskierungsbedingungen. Auf der X-Achse ist die Frequenz (Hz), auf der Y-Achse oben die Intensität (dB SPL) und darunter die cochleäre Verstärkung dargestellt. Links ist die Bedingung ohne Lücke, rechts mit einer 400-Hz-Lücke im Maskierer (hellblaue Rechtecke). Die obere Zeile zeigt das Spektrum des Maskierers und der Zielsignale (roter Pfeil: simultanverdeckt; grüner Pfeil: nachverdeckt). In der mittleren Zeile ist die cochleäre Antwort ohne Precursor dargestellt: orangene Pfeile markieren die Aktivierung durch den Maskierer, die rote Hüllkurve bzw. weiße Linie das Zielsignal. Zwei-Ton-Suppression ist durch blaue Pfeile gekennzeichnet. Die untere Zeile zeigt die veränderte cochleäre Antwort mit Precursor. (Modifiziert nach (Dymel et al., 2021)).

In dem unteren Teil der Abbildung wird die Veränderung der cochleären Verstärkung durch die Anwesenheit des Precursors gezeigt. Durch den Precursor kommt es zu der Aktivierung des MOC-Reflexes, welcher die cochleäre Verstärkung reduziert. Der MOC-Reflex hat nur an den Enden des Frequenzbandes des Maskierers einen Effekt, da die cochleäre Verstärkung durch den MOC-Reflex frequenzspezifisch reduziert wird. Dadurch wird auch die Zwei-Ton-Suppression des Maskierers ohne spektrale Lücke reduziert, was zu einer größeren Maskierung des simultanverdeckten Zielsignals führt. Bei dem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz ist der Schwellenwert des simultanverdeckten Zielsignals geringer, da auch hier die Zwei-Ton-Suppression und die cochleäre Verstärkung reduziert werden. Strickland (2004) zeigte auch in ihrem Experiment eine Verringerung der cochleären Verstärkung im Bereich der Zielsignalfrequenz. Sie benutzte ein diotisches Zielsignal, mit kurzer und langer Tondauer und einen simultanen Maskierer mit einer spektralen Lücke. Das kurze Zielsignal (10ms) wurde einmal am Beginn des 200ms Maskierers präsentiert und einmal 202ms verzögert einem 400ms Maskierers präsentiert. Das lange Zielsignal (300 und 350ms) wurde temporal in der Mitte eines Maskierers (400ms und 655ms) präsentiert. Sie konnte eine Verringerung der Verstärkung des Zielsignals ermitteln und vermutete eine Reduzierung der Zwei-Ton-Suppression des Zielsignals.

Der geringere Effekt eines Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz, im Vergleich zu einem mit 400 Hz, kann durch die frequenzspezifische Reduzierung der cochleären Verstärkung erklärt werden. Durch eine doppelte Lückenbreite sind die spektralen Enden des Precursors weiter vom Zielsignal entfernt, als die eines Precursors mit einer Lückenbreite von 400 Hz. Dadurch verringert sich die Reduzierung der cochleären Verstärkung. Somit muss die steilere Schwellenwertkurve in dieser Arbeit nicht unbedingt auf eine größere Frequenzselektivität hindeuten, sondern auf eine Kombination von der Frequenzspezifität des MOC-Reflexes und Zwei-Ton-Suppression.

Diese Erklärung kann nicht direkt auf dichotische Zielsignale übertragen werden. Die Ergebnisse der Maskierung von dichotischen Zielsignalen zeigen, dass der Precursor auch hier einen Einfluss hat. Allerdings zeigen sie, dass diotische Schwellenwerte deutlicher durch den Precursor beeinflusst werden als dichotische. Dies zeigen auch die Daten von (Verhey et al. 2017). Hier war der Unterschied allerdings geringer und nicht signifikant. Die ermittelten Filterbandbreiten diotischer und dichotischer Signale waren ähnlicher, als in dieser Arbeit. Eine Erklärung für den größeren Einfluss des Precursor auf diotische Schwellenwerte könnte sein, dass der MOC-Reflex sich einem spezifischen binauralen Input bedient. Eine Vermutung ist, dass das efferente System binaurale Reize aufrechterhält, um die Hörbarkeit von akustischen Signalen und die Lokalisation von Stimuli zu verbessern (Darrow et al. 2006). Die Daten dieser Arbeit sind in dem Sinne im Einklang mit denen von (Verhey et al. 2017), dass auch hier die binaurale Frequenzselektivität durch den MOC-Reflex anders beeinflusst wird, als die monaurale.

#### **4.5. Mögliche andere Prozesse und Methoden, die den Effekt des Precursor erklären**

Viele andere Autoren haben sich in der Vergangenheit mit dem Einfluss eines Precursor beschäftigt. Dabei wurden unterschiedliche Methoden zur Untersuchung benutzt. Diese Methoden reichten von psychoakustischen Paradigmen bis hin zu otoakustischen Emissionen. Auch der Aufbau des Precursor und Maskierers war sehr unterschiedlich. Sie reichten von einzelnen Tönen über eine Zusammenstellung mehrerer unterschiedlicher Töne.

Almishaal et al. bestimmten die Amplituden-Modulation (AM) in einem wenig-fluktuierenden Schmalbandrauschen mit einer Bandbreite von 100 Hz, zentriert bei einer Frequenz von 5 kHz. Sie bestimmten unter anderem die Veränderung der AM, wenn ein Precursor vor dem Schmalbandrauschen präsentiert wurde. Es zeigte sich, dass sich die AM in Anwesenheit des Precursor besser detektieren ließ und vermuteten, dass dies durch eine Reduktion der cochleären Verstärkung aufgrund der Aktivierung des MOC-Reflexes geschieht. Allerdings räumten sie auch ein, dass manche ihrer Ergebnisse sich durch einen Enhancement-Effekt oder durch eine Aktivierung höherer Ebenen des ZNS erklären lassen (Almishaal et al. 2016).

Marrufo-Pérez et al. behaupten das Gegenteil. Sie benutzten keinen Ton, sondern Wörter in Maskierung als Stimulus. Sie zeigten, dass die Probanden mehr Wörter verstehen konnten, wenn sie einige Zeit hatten, um sich an die Maskierung zu gewöhnen. Zusätzlich zeigten sie an Trägern eines Cochlea Implantats (CI), dass sie sich ebenfalls an monauraler ipsilateraler Maskierung adaptieren können. Diese sind unabhängig von dem MOC-Reflex, da bei CI Patienten die Rückkopplung auf die nichtlinearen Eigenschaften der Cochlea keine Rolle spielen sollten. Sie argumentierten, dass dies somit ein Effekt auf höheren Ebenen des ZNS (Neurale Adaptation) und nicht auf der Aktivierung des MOC-Reflexes beruht (Marrufo-Pérez et al. 2018).

Auch Wojtcak et al. stellten eine ähnliche Hypothese auf. Sie untersuchten den Einfluss des MOC-Reflexes auf die Darstellbarkeit von AM für Zielsignale von 1 und 6 kHz mit drei unterschiedlichen Intensitäten mit einem 2-Oktaven breiten Maskierer. Als Precursor fungierten ein 2 Oktaven großes Bandpassgeräusch, ein inharmonischer Komplexton und ein Sinuston. Es zeigte sich eine deutliche Verbesserung der Darstellbarkeit von AM bei allen drei Intensitäten. Diese Daten wurden mit denen von SFOAE's mit denselben Stimuli verglichen. Sie vermuteten, dass die Verbesserung der Darstellbarkeit der AM nicht ausschließlich durch die Reduktion der Verstärkung durch den MOC-Reflex zu erklären ist, sondern eher durch Effekte auf höheren Ebenen des ZNS (Wojtcak et al. 2019).

Carlyon führte ein ähnliches Experiment wie in dieser Arbeit durch und erklärte seine Ergebnisse durch Gruppierungsprozessen auf höheren Ebenen des zentralen Nervensystems (Carlyon 1988). Er verdeckte ein Zielsignal, simultan, mit einem Maskierer mit einer spektralen Lücke, welche um die Frequenz des Zielsignals zentriert wurde. Vor dem Signal-Maskierer-Komplex präsentierte er unterschiedliche Precursor mit einem geräuschlosen Intervall dazwischen. In einer Kondition war der Precursor

aufgebaut wie der Maskierer. Er beobachtete, dass in Anwesenheit des Precursor, der Schwellenwert des Zielsignals reduziert wurde. Er stellte die Hypothese auf, dass sich Gruppen in Frequenzregionen mit einer ähnlichen Amplitudeneinhüllenden bilden und dadurch das neu eintreffende Zielsignal einer neuen Frequenz, in einer noch nichtstimulierten Frequenzregion, verstärkt wahrgenommen werden kann. Das bedeutet, wenn der Precursor und der Maskierer ein ähnliches Spektrum haben (in dieser Arbeit: Maskierer und Precursor mit einer Lückenbreite von 400 Hz), kann das Zielsignal besser wahrgenommen werden, als hätten der Precursor und der Maskierer unterschiedlichen Spektren (in dieser Arbeit: Maskierer ohne Lücke, Precursor mit Lücke). Diese Hypothese kann in dieser Arbeit die Ergebnisse erklären, in denen der Maskierer und der Precursor eine spektrale Lücke von 400 Hz haben. Die Schwellenwertreduzierung ist bei einem Maskierer ohne Lücke geringer als bei einem Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz. Dies könnte auch den geringen Effekt des Precursor mit einer Lückenbreite von 800 Hz erklären, da sich die Spektren zwischen Precursor und Maskierer ein wenig unterscheiden. Dies reduziert den Vorteil von Gruppierungsprozessen zwischen Precursor und Maskierer. Nach der Hypothese von (Carlyon 1988) könnte vermutet werden, dass der Gruppierungsprozess vom Precursor und Maskierer in der Kondition, in der das Zielsignal nachverdeckt wurde, stärker ist. Denn der zeitliche Abstand zwischen Precursor und Maskierer ist in der Nachverdeckung geringer als in der Simultanverdeckung. Zusätzlich sollte das Zielsignal in der Nachverdeckung noch besser zu hören sein, da es zeitlich vom Maskierer separiert ist, im Gegensatz zur Simultanverdeckung, in der das Zielsignal in der „Precursor-Maskierer-Gruppe“ präsentiert wird. Diese Arbeit zeigt jedoch den gegenteiligen Effekt.

Die Hypothese der Gruppierungsprozesse scheint auch nicht zu erklären, warum der Precursor einen größeren Einfluss auf diotische simultanverdeckte Zielsignale hat als auf dichotische. Die Daten könnten jedoch mit der Hypothese in Einklang gebracht werden, in dem angenommen wird, dass die binauralen Reize so stark sind, dass das Zielsignal und der Maskierer bereits wahrnehmungsmäßig getrennt sind, wodurch Gruppierungsprozesse keinen zusätzlichen Nutzen für die Zielsignalidentifizierung haben. Auf ähnliche Weise könnte der nahezu fehlende Einfluss des Precursor auf die Schwellenwerte eines durch einen Maskierer mit einer Lückenbreite von 400 Hz nachverdeckten Zielsignals auf Basis von Gruppierungsprozessen erklärt werden. Dadurch, dass das Zielsignal nach dem Maskierer präsentiert wird, sind Maskierer und Zielsignal temporär voneinander getrennt, wodurch eine Gruppierung von Zielsignal und Maskierer verhindert wird. Dann müsste aber auch in der Simultanverdeckung, in der das Zielsignal und der Maskierer asynchron ein- und ausgeschaltet werden, Gruppierungsprozesse verringert werden. Auch die Erhöhung der Schwellenwerte bei einem Maskierer ohne Lücke durch die Anwesenheit eines Precursor kann nicht durch Gruppierungsprozesse erklärt werden. Damit scheinen die Daten der vorliegenden Arbeit nicht im Einklang mit der Hypothese zu sein, dass sie durch Gruppierungsprozesse auf höherer Ebene zurückzuführen seien.

Carcagno et al. unterstützen unsere Hypothese, dass Effekte des Precursors auf niedrigeren Ebenen des ZNS beruhen. Sie untersuchten den Einfluss von Gruppierungsprozessen auf die Schwellenwerte von

Zielsignalen, maskiert von Multi-Ton-Maskieren, welchen ein Precursor mit einem ähnlichen und unterschiedlichen Spektrum vorgeschaltet wurde. Sie kamen zu dem Entschluss, dass Prozesse auf höheren Ebenen des ZNS nicht ausreichend sind, die bessere Detektierbarkeit des Zielsignals zu erklären (Carcagno et al. 2013).

## **5. Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Efferenzen durch den MOC-Reflex auf die monaurale und binaurale Frequenzselektivität des Gehörs untersucht. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurde ein Notched-Noise Experiment mit einem vorgeschalteten Precursor durchgeführt. Notched-Noise Experimente werden häufig für die Untersuchung von auditorischen Filtern verwendet. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Zielsignal mit einer Frequenz von 500 Hz und einer Dauer von 10 ms durch einen Maskierer mit einer Lückenbreite von 0 Hz oder 400 Hz und einer Dauer von 30 ms in einem Simultan- und Nachverdeckung-Paradigma maskiert. Wenn eine spektrale Lücke in den Maskierer eingeführt wurde reduzieren sich die Schwellenwerte mehr, wenn das Signal diotisch dargeboten wurde als dichotisch. Dies deutet auf breitere binaurale Filter hin. In dieser Arbeit konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass dies nicht nur in der Simultanverdeckung der Fall ist, sondern auch bei nachverdeckten Zielsignalen. Zur Aktivierung des MOC-Reflexes wurde dem Signal-Maskierer-Komplex ein Precursor mit einer spektralen Lücke von 400 oder 800 Hz vorgeschaltet. Durch den Precursor nimmt der schwellenwertreduzierende Effekt des Maskierer zu, wenn die Lückenbreite vergrößert wird. Hierbei ist der Effekt des Precursors mit einer Lückenbreite von 800 Hz signifikant geringer als der des Precursors mit einer Lückenbreite von 400 Hz. Dieses Resultat kann durch eine Kombination eines frequenzspezifischen MOC-Reflexes und Zwei-Ton-Suppression verstanden werden. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass noch weitere Prozesse einen Einfluss haben könnten. In dieser Arbeit konnten diotische Schwellenwerte durch den Precursor signifikant deutlicher beeinflusst werden, als dichotische. Dies führte zu einer signifikant größeren Verringerung der BMLD, wenn die Lückenbreite des Maskierers vergrößert wurde, wenn der Precursor aktiviert wurde. Im binauralen System scheint es einen spezifischen Aspekt zu geben, wie das System auf den Precursor-Effekt reagiert. Dies zeigt sich in dieser Arbeit unter anderem dadurch, dass binaurale Prozesse weniger durch den Precursor beeinflusst wurden als monaurale. Diese Aspekte könnten für weitere Studien interessant sein. Weitere Studien müssen zeigen ob bei Schwerhörnden mit einer Innenohrschwerhörigkeit, d.h. einer geringeren cochleären Nichtlinearität, ähnliche Ergebnisse gefunden werden und ob beim Design von Hörhilfen evtl. auch dieser Aspekt der Hörwahrnehmung berücksichtigt werden muss.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Almishaal, A.; Bidelman, G. M.; Jennings, S. G.: Notched-noise precursors improve detection of low-frequency amplitude modulation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 141 (1), S. 324 (2017).
2. Arnesen, A. R.: Fibre population of the vestibulocochlear anastomosis in humans. *Acta otolaryngologica* 98 (5-6), S. 501–518 (1984).
3. Arthur, R. M.; Pfeiffer, R. R.; Suga, N.: Properties of 'two-tone inhibition' in primary auditory neurones. *The Journal of physiology* 212 (3), S. 593–609 (1971).
4. Ashmore, J. F.: A fast motile response in guinea-pig outer hair cells: the cellular basis of the cochlear amplifier. *The Journal of physiology* 388, S. 323–347 (1987).
5. Backus, B. C.; Guinan, J. J.: Time-course of the human medial olivocochlear reflex. *The Journal of the Acoustical Society of America* 119 (5), S. 2889–2904 (2006).
6. Bacon, S. P.; Takahashi, G. A.: Overshoot in normal-hearing and hearing-impaired subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America* 91 (5), S. 2865–2871 (1992).
7. Bechterew, W. von: Über die Verbindungen der oberen Olive und ihre wahrscheinliche physiologische Bedeutung. *Neurol. Centralbl.* 4, S. 489–490 (1885).
8. Békésy, G. von.: The Variation of Phase Along the Basilar Membrane with Sinusoidal Vibrations. *The Journal of the Acoustical Society of America* 19 (3), S. 452–460 (1947).
9. Benser, M. E.; Marquis, Robert E.; Hudspeth, A. J.: Rapid, Active Hair Bundle Movements in Hair Cells from the Bullfrog's Sacculus. *The Journal of Neuroscience* 16 (18), S. 5629–5643 (1996).
10. Berlin, C. I.; Hood, L. J.; Hurley, A.; Wen, H.: The First Jerger Lecture. Contralateral suppression of otoacoustic emissions: an index of the function of the medial olivocochlear system. *Otolaryngology--head and neck surgery: official journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery* 110 (1), S. 3–21 (1994).
11. Blodgett, H. C.; Jeffress, L. A.; Taylor, R. W.: Relation of Masked Threshold to Signal-Duration for Various Interaural Phase-Combinations. *The American Journal of Psychology* 71 (1), S. 283 (1958).
12. Bos, C. E.; Boer, E. de.: Masking and Discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America* 39 (4), S. 708–715 (1966).
13. Bourbon, W. T.; Jeffress, L. A.: Effect of Bandwidth of Masking Noise on Detection of Homophasic and Antiphase Tonal Signals. *The Journal of the Acoustical Society of America* 37 (6), pp. 1180–1181 (1965).
14. Breebaart, J.; van de Par, S.; Kohlrausch, A.: Binaural processing model based on contralateral inhibition. II. Dependence on spectral parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110 (2), S. 1089–1104 (2001).
15. Bronkhorst A. W. und Plomp R.: Effect of multiple speechlike maskers on binaural speech recognition in normal and ompaired hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America* 92(6), S. 3132-3139 (1992)
16. Brown, G. J.; Ferry, R. T.; Meddis, R.: A computer model of auditory efferent suppression: implications for the recognition of speech in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 127 (2), S. 943–954 (2010).
17. Brown, M. C.: Morphology of labeled efferent fibers in the guinea pig cochlea. *The Journal of comparative neurology* 260 (4), S. 605–618 (1987).
18. Brownell, W. E.; Bader, C. R.; Bertrand, D.; Ribaupierre, Y. de: Evoked mechanical responses of isolated cochlear outer hair cells. *Science* 227 (4683), S. 194–196 (1985).



19. Campbell J. P.; Henson, M. M.: Olivocochlear neurons in the brainstem of the mouse. *Hearing research* 35 (2-3), S. 271–274 (1988).
20. Carcagno, S.; Demal, C.; Demany, L.: No need for templates in the auditory enhancement effect. *PLoS One* 8, 6 (2013).
21. Carlyon, R. P.: Changes in the masked thresholds of brief tones produced by preceding bursts of bandpass and notched noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 83 (S1), S. 34-S34 (1988).
22. Chumak, T.; Bohuslavova, R.; Macova, I.; Dodd, N.; Buckiova, D.; Fritzsche, B.: Deterioration of the Medial Olivocochlear Efferent System Accelerates Age-Related Hearing Loss in Pax2-Isl1 Transgenic Mice. *Molecular neurobiology* 53 (4), S. 2368–2383 (2016).
23. Clark, N. R.; Brown, G. J.; Jürgens, T.; Meddis, R.: A frequency-selective feedback model of auditory efferent suppression and its implications for the recognition of speech in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132 (3), S. 1535–1541 (2012).
24. Dallos, P.: The active cochlea. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 12 (12), S. 4575–4585 (1992).
25. Dallos, P.; He, D. Z.; Lin, X.; Sziklai, I.; Mehta, S.; Evans, B. N.: Acetylcholine, outer hair cell electromotility, and the cochlear amplifier. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 17 (6), S. 2212–2226 (1997).
26. Darrow, K. N.; Maison, S. F.; Liberman, M. C.: Cochlear efferent feedback balances interaural sensitivity. *Nature neuroscience* 9 (12), S. 1474–1476 (2006).
27. Davis, H.: An active process in cochlear mechanics. *Hearing research* 9 (1), S. 79–90 (1983).
28. Drga, V.; Plack, Ch. J.; Yasin, I.: Frequency Tuning of the Efferent Effect on Cochlear Gain in Humans. *Advances in experimental medicine and biology* 894, S. 477–484 (2016).
29. Durlach, N. I.; Colburn, H. S.: Binaural phenomena. In Edward Carterette (Ed.): *Hearing*. Oxford: Elsevier Science (Handbook of perception, v. 4) (1978).
30. Dymel, F.; Kordus, M. Yasin, I., Verhey J. L., A notched-noise precursor affects both diotic and dichotic notched-noise masking. *Acta Acust.*, 3, 43 (2021)
31. Ewert, S.D: AFC-A modular framework for running psychoacoustic experiments and computational perception models, conference proceedings, AIADAGA 2013, Merano, Italy (Deutsche Gesellschaft für Akustik, Berlin), pp. 1326e1329 (2013).
32. Eybalin, M.: Neurotransmitters and neuromodulators of the mammalian cochlea. *Physiological reviews* 73 (2), S. 309–373 (1993).
33. Fastl, H. und Zwicker, E.: *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 3. S. 295-302 (2007).
34. Frolenkov, G. I.: Regulation of electromotility in the cochlear outer hair cell. *The Journal of physiology* 576 (Pt 1), S. 43–48 (2006).
35. Fuente, A.: The olivocochlear system and protection from acoustic trauma: a mini literature review. *Frontiers in systems neuroscience* 9, S. 94 (2015).
36. Gilkey, R. H.; Simpson, B. D.; Weisenberger, J. M.: Noise fringe and binaural detection. *Journal of the Acoustical Society of America* 88, S. 1323-1332 (1990).
37. Giraud, A. L.; Garnier, S.; Micheyl, C.; Lina, G.; Chays, A.; Chéry-Croze, S.: Auditory efferents involved in speech-in-noise intelligibility. *Neuroreport* 8 (7), S. 1779–1783 (1997).
38. Glasberg, B. R.; Moore, B. C.: Auditory filter shapes in subjects with unilateral and bilateral cochlear impairments. *The Journal of the Acoustical Society of America* 79(4), S. 1020-33 (1986)
39. Glasberg, B. R.; Moore, B. C.: Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. *Hearing research* 47 (1-2), s. 103–138 (1990).

40. Green, D. M.: Interaural Phase Effects in the Masking of Signals of Different Durations. *The Journal of the Acoustical Society of America* 39 (4), S. 720–724 (1966).
41. Guinan, J. J.; Warr, W. B.; Norris, B. E.: Differential olivocochlear projections from lateral versus medial zones of the superior olivary complex. *The Journal of comparative neurology* 221 (3), S. 358–370 (1983).
42. Guinan, J. J. und Gifford, M. L.: Effects of electrical stimulation of efferent olivocochlear neurons on cat auditory-nerve fibers. III. Tuning curved and thresholds at CF. *Hearing Research* 37, 1, S. 29–45 (1988).
43. Guinan, J. J.: Olivocochlear efferents: Their action, effects, measurement and uses, and the impact of the new conception of cochlear mechanical responses. *Hearing research* 362, S. 38–47 (2018).
44. Hall, J. W.; Tyler, R. S.; Fernandes, M. A.: Monaural and binaural auditory frequency resolution measured using bandlimited noise and notched-noise masking. *The Journal of the Acoustical Society of America* 73 (3), S. 894–898 (1983).
45. Harrison, W. A.; Burns, E. M.: Effects of contralateral acoustic stimulation on spontaneous otoacoustic emissions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 94 (5), S. 2649–2658 (1993).
46. Hartmann, W. M.: *Signals, sound, and sensation*. Corr. 5. print. Springer. New York. (2005).
47. Helmholtz, H. von: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Minerva-Verl. Frankfurt/Main. (1981).
48. Hicks, M. L.; Bacon, S. P.: Factors influencing temporal effects with notched-noise maskers. *Hearing research* 64 (1), S. 123–132 (1992).
49. Hienz, R. D.; Stiles, P.; May, B. J.: Effects of bilateral olivocochlear lesions on vowel formant discrimination in cats. *Hearing research* 116 (1-2), S. 10–20 (1998).
50. Hildesheimer, M.; Makai, E.; Muchnik, C.; Rubinstein, M.: The influence of the efferent system on acoustic overstimulation. *Hearing research* 43 (2-3), S. 263–267 (1990).
51. Hüls Rainer: *Die Geschichte der Hörakustik*. Heidelberg: Median-Verlag (1999)
52. Jennings, S. G.; Ahlstrom, J. B.; Dubno, J. R.: Effects of age and hearing loss on overshoot. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140 (4), S. 2481 (2016).
53. Jennings, S. G.; Strickland, E. A.: Auditory filter tuning inferred with short sinusoidal and notched-noise maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132 (4), S. 2497–2513 (2012a).
54. Jennings, S. G.; Strickland, E. A.: Evaluating the effects of olivocochlear feedback on psychophysical measures of frequency selectivity. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132 (4), S. 2483–2496 (2012b).
55. Jennings, S. G.; Strickland, E. A.; Heinz, M. G.: Precursor effects on behavioral estimates of frequency selectivity and gain in forward masking. *The Journal of the Acoustical Society of America* 125 (4), S. 2172–2181 (2009).
56. Johnstone, B. M.; Patuzzi, R.; Yates, G. K.: Basilar membrane measurements and the travelling wave. *Hearing research* 22, S. 147–153 (1986).
57. Kawase, T.; Delgutte, B.; Liberman, M. C.: Antimasking effects of the olivocochlear reflex. II. Enhancement of auditory-nerve response to masked tones. *Journal of neurophysiology* 70 (6), S. 2533–2549 (1993).
58. Kießling J, Kollmeier B, Baumann U.: *Versorgung mit Hörgeräten und Hörimplantaten*. Hrsg. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Thieme; (2017)
59. Killion M. C.: Hearing aids: past, present and future: moving toward normal conversations in noise. *Br. J. Audiol.*, 31, S. 141–148 (1997).

60. Kim, D. O.; Dorn, P. A.; Neely, S. T.; Gorga, M. P.: Adaption of distortion product otoacoustic emission in humans. *JARO: Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 2,1, S. 31-40 (2001).
61. Kirk, Ch. E.; Smith, D. W.: Protection from acoustic trauma is not a primary function of the medial olivocochlear efferent system. *JARO: Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 4 (4), S. 445–465 (2003).
62. Kohlrausch A.; Fassel R.: Binaural masking level differences in nonsimultaneous masking. In Robert H. Gilkey, Timothy R. Anderson (Eds.): *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Conference held at Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, from September 9-12, 1993. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, S. 169–190 (1997).
63. Kreft, H. A.; Wojtczak, M.; Oxenham, Andrew J.: Auditory enhancement under simultaneous masking in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America* 143 (2), S. 901 (2018).
64. Krull, V.; Strickland, E. A.: The effect of a precursor on growth of forward masking. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123 (6), S. 4352–4357 (2008).
65. Kujawa, S. G.; Liberman, M. C.: Conditioning-related protection from acoustic injury: effects of chronic deafferentation and sham surgery. *Journal of neurophysiology* 78 (6), S. 3095–3106 (1997).
66. Kumar, U. A.; Vanaja, C. S.: Functioning of olivocochlear bundle and speech perception in noise. *Ear and hearing* 25 (2), S. 142–146 (2004).
67. Levitt, H.: Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America* 49, S 467-477 (1971)
68. Liberman, M. C.: The olivocochlear efferent bundle and susceptibility of the inner ear to acoustic injury. *Journal of neurophysiology* 65 (1), S.123–132 (1991).
69. Liberman, M. Ch.; Liberman, L. D.; Maison, Stéphane F.: Efferent feedback slows cochlear aging. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 34 (13), S. 4599–4607 (2014).
70. Lichtenhan, J. T.; Wilson, U. S.; Hancock, K. E.; Guinan, J. J.: Medial olivocochlear efferent reflex inhibition of human cochlear nerve responses. *Hearing research* 333, S. 216–224 (2016).
71. Lilaonitkul W.; Guinan J. J.: Frequency tuning of medialolivocochlear-efferent acoustic reflexes in humans as functionsof probe frequency. *Journal of Neurophysiology* 107 6, S. 1598–1611 (2012).
72. Maison, S. F.; Micheyl, C.; Collet, L.: The medial olivocochlear efferent system in humans: structure and function. *Scandinavian audiology. Supplementum* 51, S. 77–84 (1999).
73. Maison, S. F.; Liberman, M. C.: Predicting vulnerability to acoustic injury with a noninvasive assay of olivocochlear reflex strength. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 20 (12), S.4701–4707 (2000).
74. Maison, S. F.; Usubuchi, H.; Liberman, M. Ch.: Efferent feedback minimizes cochlear neuropathy from moderate noise exposure. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 33 (13), S. 5542–5552 (2013).
75. Marrufo-Pérez, M. I.; Eustaquio-Martín, A.; Lopez-Poveda E. A.: Adaptation to noise in human speech recognition unrelated to the medial olivocochlear reflex. *Journal of Neuroscience* 38, S. 4138-4145 (2018)
76. May, B. J.; McQuene, S. J.: Effects of Bilateral Olivocochlear Lesions on Pure-Tone Intensity Discrimination in Cats. *Auditory neuroscience* 1 (4), S. 385–400 (1995).
77. McFadden, D. M.: Masking-level difference with continuous and with burst masking noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 40, S. 1414–1419 (1966).

78. Mertes, I. B.; Johnson, K. M.; Dinger, Z. A.: Olivocochlear efferent contributions to speech-in-noise recognition across signal-to-noise ratios. *The Journal of the Acoustical Society of America* 145 (3), S. 1529 (2019).
79. Møller, A. R.: *Hearing. Its physiology and pathophysiology*. Acad. Press. San Diego, Calif. (2000).
80. Moore, B. C. J.: Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking. *The Journal of the Acoustical Society of America* 63 (2), S. 524–532 (1978)
81. Moore, B. C. J.: *An introduction to the psychology of hearing*. 6th ed. Bingley: Emerald. (2012).
82. Moore, B. C. J.; Glasberg, Brian R.: Auditory filter shapes derived in simultaneous and forward masking. *The Journal of the Acoustical Society of America* 70 (4), S. 1003–1014 (1981).
83. Moore, B. C. J.: *Cochlear hearing loss: Physiological, Psychological and Technical Issues*. Chichester: Wiley. (2007).
84. Morand-Villeneuve, N.; Garnier, S.; Grimault, N.; Veuillet, E.; Collet, L.; Micheyl, C.: Medial olivocochlear bundle activation and perceived auditory intensity in humans. *Physiology & Behavior* 77 (2-3), S. 311–320 (2002).
85. Mott, J. B.; Norton, S. J.; Neely, S. T.; Warr, W.: Changes in spontaneous otoacoustic emissions produced by acoustic stimulation of the contralateral ear. *Hearing research* 38 (3), S. 229–242 (1989).
86. Murugasu, E.; Russel, I. J.: The effect of efferent stimulation on basilar membrane displacement in the basal turn of the guinea pig cochlea. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 16 (1), S.325–332 (1996).
87. Najem, F.; Ferraro, J.; Chertoff, M: The Effect of Contralateral Pure Tones on the Compound Action Potential in Humans: Efferent Tuning Curves. *Journal of the American Academy of Audiology* 27 (2), S. 103–116 (2016).
88. Nitschmann, M.; Verhey, J. L.: Binaural notched-noise masking and auditory-filter shape. *The Journal of the Acoustical Society of America* 133 (4), S. 2262–2271 (2013).
89. Nitschmann, M.; Verhey, J. L.; Kollmeier, B.: The role of across-frequency processes in dichotic listening conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 126 (6), S. 3188–3198 (2009).
90. Nitschmann, M.; Verhey, J. L.; Kollmeier, B.: Monaural and binaural frequency selectivity in hearing-impaired subjects. *International journal of audiology* 49 (5), S. 357–367 (2010).
91. Oliver, D.; Klöcker, N.; Schuck, J.; Beukrowitz, T.; Ruppertsberg, J.; Fakler, B.: Gating of Ca<sup>2+</sup>-activated K<sup>+</sup> channels controls fast inhibitory synaptic transmission at auditory outer hair cells. *Neuron* 26 (3), S. 595–601 (2000).
92. Oxenham, A. J.; Shera, Ch. A.: Estimates of human cochlear tuning at low levels using forward and simultaneous masking. *JARO: Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 4 (4), S. 541–554 (2003).
93. Patterson, R. D.; Moore, B. C. J.: Auditory filters and excitation patterns as representation of frequency resolution. In Brian C. J. Moore (Ed.): *Frequency selectivity in hearing*. London: Academic Press, S. 123–177 (1986).
94. Patterson, R. D.: Auditory filter shapes derived with noise stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America* 59 (3), S. 640–654 (1976).
95. Patterson, R. D.; Nimmo-Smith, I.: Off-frequency listening and auditory-filter asymmetry. *The Journal of the Acoustical Society of America* 67 (1), S. 229–245 (1980).
96. Peissig, J. und Kollmeier B.: Directivity of binaural noise reduction in spatial multiple noise-source arrangements for normal and impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 101(3), S. 1660-1670 (1997).

97. Rosengard, P. S.; Oxenham, A. J.; Braida, L. D.: Comparing different estimates of cochlear compression in listeners with normal and impaired hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America* 117(5), S. 3028–3041 (2005).
98. Pickles, J. O.; Osborne, M. P.; Comis, S. D.: Vulnerability of tip links between stereocilia to acoustic trauma in the guinea pig. *Hearing research* 25 (2-3), S. 173–183 (1987).
99. Pickles, J. O. (2013): *An introduction to the physiology of hearing*. 4. ed. Brill. Leiden. (2013).
100. Rajan, R.: Effect of electrical stimulation of the crossed olivocochlear bundle on temporary threshold shifts in auditory sensitivity. I. Dependence on electrical stimulation parameters. *Journal of neurophysiology* 60 (2), S. 549–568 (1988).
101. Reiter, E. R.; Liberman, M. C.: Efferent-mediated protection from acoustic overexposure: relation to slow effects of olivocochlear stimulation. *Journal of neurophysiology* 73 (2), S.506–514 (1995).
102. Rhode, W. S.; Cooper, N. P.: Two-tone suppression and distortion production on the basilar membrane in the hook region of cat and guinea pig cochleae. *Hearing research* 66 (1), S. 31–45 (1993).
103. Robinson, D. E.; Trahiotis, C.: Effects of signal duration and masker duration on detectability under diotic and dichotic listening conditions. *Perception & Psychophysics* 12 (4), S. 333–334 (1972).
104. Robles, L.; Ruggero, M. A.: Mechanics of the mammalian cochlea. *Physiological reviews* 81 (3), S.1305–1352 (2001).
105. Sachs, M. B.; Kiang, Nelson Y. S.: Two-Tone Inhibition in Auditory-Nerve Fibers. *The Journal of the Acoustical Society of America* 43 (5), S.1120–1128 (1968).
106. Scharf, B.; Magnan, M.; Chays, A.: On the role of the olivocochlear bundle in hearing: 16 case studies. *Hearing Research*, Vol. 103, I 1-2, S. 101-122 (1997)
107. Schooneveldt, G. P.; Moore, B. C. J.: Comodulation masking release (CMR) as a function of masker bandwidth, modulator bandwidth, and signal duration. *The Journal of the Acoustical Society of America* 85 (1), S. 273–281 (1989).
108. Seligman, P. und McDermott, H.: Architecture of the Spectra 22 speech processor. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, 166(Suppl.), S. 139-141 (1995).
109. Sever, J. C.; Small, A. M.: Binaural critical masking bands. *The Journal of the Acoustical Society of America* 66 (5), S.1343–1350 (1979).
110. Smith, S. B.; Lichtenhan, J. T.; Cone, B. K.: Contralateral Inhibition of Click- and Chirp-Evoked Human Compound Action Potentials. *Frontiers in neuroscience* 11, S. 189 (2017).
111. Sondhi, M. M.; Guttman, N.: Width of the Spectrum Effective in the Binaural Release of Masking. *The Journal of the Acoustical Society of America* 40 (3), S. 600–606 (1966).
112. Speckmann, E.-J.; Hescheler, J.; Köhling, R.; Alzheimer, Ch.: *Physiologie*. 6. Aufl. Elsevier Urban & Fischer. München. (2013).
113. Strickland, A.: The temporal effect with notched-noise maskers: analysis in term of input-output functions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 115, S. 2234–2245 (2004).
114. Strickland, E. A.; Krishnan, L. A.: The temporal effect in listeners with mild to moderate cochlear hearing impairment. *The Journal of the Acoustical Society of America* 118 (5), S. 3211–3217 (2005).
115. Strickland, E. A.: The relationship between precursor level and the temporal effect. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123, S. 946–954 (2008).
116. Tyler, R. S., Tye-Murray, N.: Frequency Resolution Measured by Adaptively Varying the Notchwidth: Results from Normal and Hearing Impaired. *Auditory Frequency Selectivity*. S. 323-330 (1986)

117. Unoki, M.; Miyauchi, R.; Tan, C.-T.: Estimates of Tuning of Auditory Filter Using Simultaneous and Forward Notched-noise Masking. In Kollmeier, B.; Hohmann, V.; Klump, G. M.; Langemann, U.; Mauermann, M.; Uppenkamp, S.; Verhey, J. L. (Eds.): *Hearing - From Sensory Processing to Perception*, vol. 119. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 19–26 (2007).
118. van de Par, S.; Kohlrausch, A.: Dependence of binaural masking level differences on center frequency, masker bandwidth, and interaural parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America* 106 (4), S. 1940–1947 (1999).
119. van Zyl, A.; Swanepoel, D.; Hall, J. W.: Effect of prolonged contralateral acoustic stimulation on transient evoked otoacoustic emissions. *Hearing research* 254 (1-2), S. 77–81 (2009).
120. Vandali, A. E.; Whitford, L. A.; Plant, K. L.; Clark, G. M.: Speech perception as a function of electrical stimulation rate: using the Nucleus 24 cochlear implant system. *Ear Hear.*, 21, S. 608-624 (2000).
121. Verhey, J. L.; Kordus, M.; Drga, V.; Yasin, I.: Effect of efferent activation on binaural frequency selectivity. *Hearing research* 350, S. 152–159 (2017).
122. Verhey, J. L.; van de Par, S.: Binaural frequency selectivity in humans. *The European journal of neuroscience* 51, S. 1179-1190 (2018).
123. Verhey, J. L.; Yasin, I.: Effect of duration and gating of the signal on the binaural masking level difference for narrowband and broadband maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America* 142 (3), (2017).
124. Verschooten, E.; Strickland, E. A.; Verhaert, Nicolas; Joris, Philip X.: Assessment of Ipsilateral Efferent Effects in Human via ECochG. *Frontiers in neuroscience* 11, S. 331 (2017).
125. Veuillet, E.; Collet, L.; Duclaux, R.: Effect of contralateral acoustic stimulation on active cochlear micromechanical properties in human subjects: dependence on stimulus variables. *Journal of neurophysiology* 65 (3), S. 724–735 (1991).
126. Wagner, W.; Frey, K.; Heppelmann, G.; Plontke, S. K.; Zenner, H.-P.: Speech-in-noise intelligibility does not correlate with efferent olivocochlear reflex in humans with normal hearing. *Acta oto-laryngologica* 128 (1), S. 53–60 (2008).
127. Warr, W. B.: Organization of Olivocochlear Efferent System in Mammals. In Douglas B. Webster (Ed.): *The mammalian auditory pathway: neuroanatomy*. New York: Springer (Springer handbook of auditory research, 1), S. 410–448 (1992).
128. Warr, W. B.; Boche, J. B.; Nelly, S. T.: Efferent innervation of the inner hair cell region: origins and terminations of two lateral olivocochlear systems. *Hearing research* 108 (1-2), S. 89–111 (1997).
129. Warr, W. B.: Olivocochlear and vestibular efferent neurons of the feline brain stem: their location, morphology and number determined by retrograde axonal transport and acetylcholinesterase histochemistry. *The Journal of comparative neurology* 161 (2), S. 159–181 (1975).
130. Warren, R. M.: *Auditory perception. A new analysis and synthesis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. (1999).
131. Wersinger, E.; Fuchs, P. A.: Modulation of hair cell efferents. *Hearing research* 279 (1-2), S.1–12 (2010).
132. Wightman, F. L.: Detection of Binaural Tones as a Function of Masker Bandwidth. *The Journal of the Acoustical Society of America* 50 (2B), S. 623–636 (1971).
133. Wilson, B. S.; Finley, C. C.; Lawson, D. T.; Wolford, R. D.; Eddington, D. K.; Rabinowitz, W. M.: Better speech recognition with cochlea implants. *Nature* 352, S. 236-238 (1991).
134. Wittekindt, A.; Gaese, B. H.; Kössl, M.: Influence of contralateral acoustic stimulation on the quadratic distortion product f2-f1 in humans. *Hearing research* 247 (1), S. 27–33 (2009).

135. Wojtczak, M.; Kiang, A. M.; Torunsky, N. T.: Exploring the role of medial olivochlear efferents in the detection of amplitude modulation for tones presented in noise. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 20, S. 395–413 (2019).
136. Wright, A.; Davis, A.; Bredberg, G.; Ulehlova, L.; Spencer, H.: Hair cell distributions in the normal human cochlea. *Acta oto-laryngologica. Supplementum* 444, S. 1–48 (1987).
137. Yama, M. F.; Robinson, D. E.: Comparison of frequency selectivity for the monaural and binaural hearing systems: Evidence from a probe-frequency procedure. *The Journal of the Acoustical Society of America* 71 (3), S. 694–700 (1982).
138. Yama, M.F.: Binaural analysis in forward masking: Effects of signal frequency. *Journal of the Acoustical Society of America* 78, S. 2142–2145 (1985).
139. Yasin, I.; Drga, V.; Plack, Ch. J.: Effect of human auditory efferent feedback on cochlear gain and compression. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 34 (46), S. 15319–15326 (2014).
140. Yost, W. A. und Walton, J.: Hierarchy of masking-level differences obtained for temporal masking. *Journal of the Acoustical Society of America* 61, S. 1376–1379 (1977).
141. Yost, W. A.: Prior stimulation and the masking-level difference. *Journal of the Acoustical Society of America* 78, S. 901–907 (1985).
142. Zurek, D., N. I.: Masker-bandwidth dependence in homophasic and antiphase tone detection. *The Journal of the Acoustical Society of America* 81 (2), S. 459–464 (1987).
143. Zwicker, E.: Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen). *The Journal of the Acoustical Society of America* 33 (2), S. 248 (1961).
144. Zwicker, E.; Fastl, H.: *Psychoacoustics. Facts and Models. Second Updated Edition.* Springer. Berlin, Heidelberg. (1999).
145. Zwicker, U. T.; Zwicker, E.: Binaural masking-level difference as a function of masker and test-signal duration. *Hearing research* 13 (3), S. 215–219 (1984).

Die Danksagung ist aus Datenschutzgründen in dieser Version nicht enthalten.



# **Ehrenerklärung**

Ich erkläre, dass ich die in der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

Einfluss der Aktivierung des efferenten Systems auf die monaurale und binaurale Frequenzselektivität des Gehörs

in der Abteilung Experimentelle Audiologie

mit Unterstützung durch

Prof. Dr. rer. nat. Jesko Verhey

und

Dr. rer. nat. Monika Kordus

ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Frauenfeld, den 26.10.2025

Unterschrift

## **Erklärung zur strafrechtlichen Verurteilung**

Ich erkläre hiermit, nicht wegen einer Straftat verurteilt worden zu sein, die Wissenschaftsbezug hat.

Frauenfeld, den 26.10.2025

Unterschrift

Der Lebenslauf ist in dieser Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.