

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

Harmoniewahrnehmung mit dem Cochlea-Implantat

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. med.

(doctor medicinae)

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

vorgelegt von Marie Knobloch

aus Lauchhammer

Friedrichshafen 2018

Bibliographische Beschreibung

Knobloch, Marie

Harmoniewahrnehmung mit dem Cochlea-Implantat

2018, 71 Bl., 23 Abb., 5 Tab., 2 Anl.

Kurzreferat

Die vorliegende Arbeit untersucht die Wahrnehmung musikalischer Harmonie bei Nutzern eines Cochlea-Implantats, einer Innenohrprothese für Menschen mit einer an Taubheit grenzenden Schallempfindungsstörung. Im Paarvergleich von Akkorden bewerteten die Probanden sechs verschiedene Akkordtypen in ihrer wahrgenommenen Konsonanz. Normalhörende bevorzugten den Dur- und den Mollakkord vor dem verminderten und übermäßigen Akkord, dem Akkord mit einem Quartvorhalt und dem Akkord mit einer übermäßigen Quinte. Cochlea-Implantat-Nutzer bewerteten den Durakkord als angenehmer als die weiteren fünf Akkordtypen. Der Kadenztest überprüfte die Wahrnehmung der harmonischen Syntax mit Folgen von vier Akkorden, die in der Hälfte der Darbietungen auf einer perfekten Kadenz endeten. In den anderen Akkordsequenzen wurde der Schlussakkord durch einen transponierten Durakkord oder einen dissonanten Akkord ersetzt. Die Aufgabe der Probanden war es zu entscheiden, ob das Ende befriedigend war. Normalhörende präferierten die perfekte Kadenz gegenüber den modifizierten Akkordfolgen, wohingegen die Gruppe der Cochlea-Implantat-Nutzer bis auf einen Probanden die modifizierten Akkordfolgen als ebenso befriedigend wie eine perfekte Kadenz einschätzte. Dabei ließen sich keine Zusammenhänge der Ergebnisse zum Musikerleben, dem Sprachverständnis im Störgeräusch und der Kodierungsstrategie nachweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass Cochlea-Implantat-Nutzer isoliert dargebotene Akkorde ähnlich bewerten wie Normalhörende. In der Wahrnehmung der musikalischen Syntax jedoch scheitert die Mehrheit der Cochlea-Implantat-Nutzer.

Schlüsselwörter: Harmonie, Cochlea-Implantat, Musikwahrnehmung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Der physiologische Vorgang des Hörens	1
1.2 Cochlea-Implantate.....	3
1.2.1 Funktionsweise.....	3
1.2.2 Indikationen für die Implantation.....	4
1.3 Herausforderungen mit dem Cochlea-Implantat.....	4
1.3.1 Technische Herausforderungen.....	4
1.3.2 Biologische Herausforderungen.....	5
1.4 Wahrnehmung musikalischer Parameter mit dem Cochlea-Implantat	6
1.4.1 Perzeption temporaler Parameter: Rhythmus, Tondauer und Tempo	6
1.4.2 Kombinierte spektrale und temporale Parameter: Erkennen von Musikinstrumenten anhand ihres Timbres.....	7
1.4.3 Perzeption spektraler Parameter: Tonhöhenunterscheidung, Melodieerkennung und Erkennen harmonischer Akkorde.....	7
1.5 Bedeutung von Konsonanz	8
1.6 Problemstellung	11
2. Material und Methoden	12
2.1 Studienteilnehmer	12
2.1.1 Einschlusskriterien für Cochlea-Implantat-Probanden	12
2.1.2 Einschlusskriterien für normalhörende Probanden.....	13
2.2 Messplatz und Durchführung	13
2.3 Messverfahren	14
2.3.1 Testverfahren zur Musikperzeption.....	14
2.3.2 Testverfahren zum Sprachverständnis	17
2.3.3 Testverfahren zum Musikerleben.....	17
2.4 Datenanalyse	18
2.4.1 Paarvergleich von Akkorden.....	18
2.4.2 Kadenztest	19

2.4.3 Einflussfaktoren auf die Harmoniewahrnehmung.....	19
3. Ergebnisse.....	20
3.1 Oldenburger Satztest	20
3.2 Münchener Musikfragebogen.....	20
3.3 Paarvergleich von Akkorden	22
3.3.1 Ergebnisse der Probandengruppen im Vergleich.....	22
3.3.2 Einflussfaktoren auf die Konsonanzbewertung von Akkorden.....	25
3.4 Kadenztest.....	28
3.4.1 Ergebnisse der Probandengruppen im Vergleich.....	28
3.4.2 Einflussfaktoren auf das Erkennen eines harmonischen Abschlusses	32
4. Diskussion	34
4.1 Oldenburger Satztest	34
4.2 Münchener Musikfragebogen.....	34
4.3 Paarvergleich von Akkorden	35
4.4 Kadenztest.....	37
4.5 Untersuchung individueller Einflussfaktoren auf die Harmoniewahrnehmung.....	41
4.5.1 Sprachverständnis im Störgeräusch	41
4.5.2 Musikerleben	42
4.5.3 Kodierungsstrategie.....	43
4.6 CI04 – ein Beispiel der Möglichkeiten	44
4.7 Allgemeine Einflussfaktoren auf die Musikwahrnehmung.....	46
4.8 Testdesign	47
5. Zusammenfassung.....	48
6. Literaturverzeichnis	49
7. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	56
8. Danksagungen.....	59
9. Ehrenerklärung.....	60
10. Darstellung des Bildungsweges.....	61
11. Anlagen	62

Abkürzungsverzeichnis

aug	augmented, übermäßiger Akkord
b5	Akkord mit einer übermäßigen Quinte
CAMP	Clinical Assessment of Music Perception der University of Washington
CI	Cochlea-Implantat
dB	Dezibel-Maßeinheit des Schalldruckpegels
dim	diminished, verminderter Akkord
EA	Euklidischer Anstand
EEG	Elektroenzephalopathie
FS4	fine structure auf vier Kanälen, Sprachkodierungsstrategie des Cochlea-Implantat Herstellers MED-EL
FSP	fine structure processing, Sprachkodierungsstrategie des Cochlea-Implantat Herstellers MED-EL
HiRES	high resolution, Sprachkodierungsstrategie der Firma Advanced Bionics
NH	Normalhörende
HTS	Halbtonschritt
Hz	Hertz- Maßeinheit der Frequenz
m	männlich
MP 3000	an das MP3-Komprimierungsverfahren angelehnte Sprachkodierungsstrategie
MUMU	Münchener Musikfragebogen
Mu.S.I.C. Perception Test-	Musical Sounds In Cochlear implants Perception Test
MW	Mittelwert
N.	Nervus
NIDCD	National Institute on Deafness and Other Communication Disorders
OLSA	Oldenburger Satztest
p	Signifikanzniveau
PMMA	Primary Measures of Musical Audiation Test
SD	Standardabweichung
SNR	Signal to noise ratio- Signal-Rauschverhältnis
Sus4	Akkord mit einem Quartvorhalt
SVS	Sprachverstehensschwelle
w	weiblich

1. Einleitung

„Nicht sehen trennt den Menschen von den Dingen. Nicht hören trennt den Menschen vom Menschen.“ (Immanuel Kant)

Neben der Sprache nimmt Musik einen hohen Stellenwert in der Kultur und Gesellschaft ein. Sie wird durch verschiedene Parameter wie den Rhythmus, Melodie, Timbre und oftmals Text geprägt. Ein weiterer die Struktur und den Höreindruck westlicher Musik beeinflussender Faktor ist die Harmonie. Zum einen umfasst sie den Wohlklang mehrerer zeitgleich erklingender Töne (Akkorde), welche als vertikale Konsonanz bezeichnet wird. Dem gegenüber beinhaltet die horizontale Konsonanz eine Abfolge von Akkorden, die im Zusammenspiel mit einer Melodie ein tonales Zentrum formt, innerhalb dessen Abweichungen eine Spannung aufbauen und eine Rückkehr zum Zentrum, dem Ruhepunkt eines Musikstückes Entspannung bewirken können (Dahlhaus, 1980). Der Begriff Harmonie ist somit durch die Tonintervalle an sich als auch die nacheinander erklingenden Akkorde definiert und stellt ein wichtiges Gestaltungselement der Musik dar.

Wie für Normalhörende (NH) spielt Musik für Menschen, die an einer bis an Taubheit grenzenden Schwerhörigkeit leiden und mit einem Cochlea-Implantat (CI), einer Hörprothese, versorgt worden sind, eine wesentliche Rolle im Leben (Lassaletta et al., 2007). In der vorliegenden Arbeit rückt mit dem Vergleich der Harmonieperzeption von Normalhörenden und Anwendern eines solchen Implantats ein bisher wenig untersuchtes Thema in den Mittelpunkt.

1.1 Der physiologische Vorgang des Hörens

Akustische Ereignisse wie ein Ton, Geräusch oder Klang gelangen als Schall über das äußere Ohr und den äußeren Gehörgang zum Mittelohr. Dort trifft dieser auf das Trommelfell und versetzt es in Schwingung. Nach Weiterleitung und Verstärkung auf den Hammer, Amboss und Steigbügel erreicht er das ovale Fenster, den Übergang vom Mittel- zum Innenohr. Die elektrisch leitende, inkompressible Flüssigkeit (Endolymphe) im Innenraum der Hörschnecke (Cochlea) wird in Bewegung versetzt und bewirkt eine Auslenkung der Basilarmembran. Entlang dieser Membran sind die inneren Haarzellen angeordnet, an deren Enden sich Stereozilien befinden, die bei einer ankommenden Schallwelle ausgelenkt werden. Dadurch wird eine Signalkaskade eingeleitet (Einstrom von Kaliumionen, Depolarisation, Calciumeinstrom, Ausschüttung von Glutamat), die zu einer Reizung des Hörnervs führt. Der Hörnerv wiederum generiert elektrische Impulse (Aktionspotenziale), die zu einer Weiterleitung des akustischen Signals zum Hörzentrum führen. Dort erfolgen die Verarbeitung und die bewusste Wahrnehmung der Information.

Die Verarbeitung von Tönen innerhalb der Cochlea erfolgt nach einer räumlichen und zeitlichen Ordnung der Schallfrequenzen, der Tonotopie. Dabei werden hohe Töne basal, in der Nähe des ovalen Fensters und tiefe Töne apikal, an der Spitze der Cochlea abgebildet (örtliche Kodierung, Abb. 1, 2). Zudem erfolgt die Auslösung des Aktionspotenzials in einer bestimmten Phase der Schallwelle. Dies wird als zeitliche Kodierung bezeichnet.

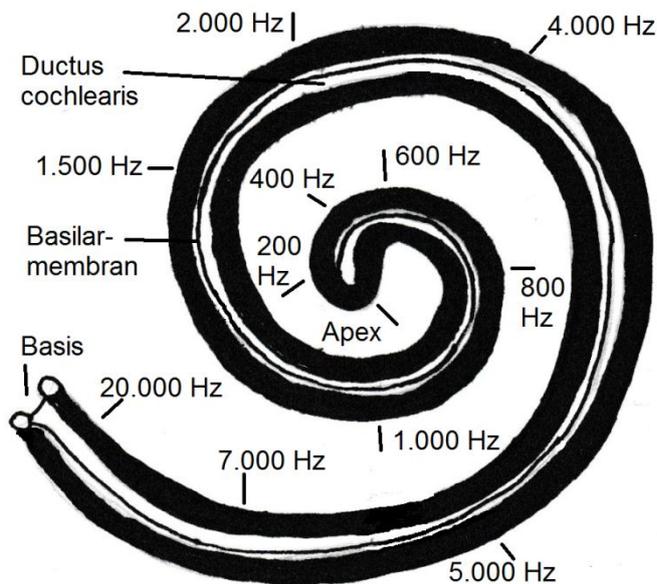


Abb. 1: Schematische Darstellung der Tonotopie der Cochlea

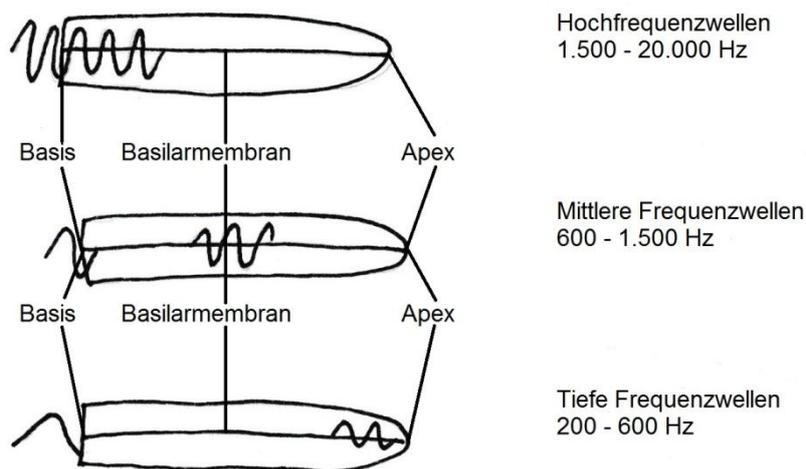


Abb. 2: Abbildung der Frequenzen auf einer abgerollten Cochlea

Der Hörbereich junger, gesunder Menschen liegt zwischen ungefähr 20 Hz und 20 kHz (Probst, Grevers und Iro, 2008), nimmt aber mit zunehmendem Alter im Bereich hoher Frequenzen ab.

1.2 Cochlea-Implantate

1.2.1 Funktionsweise

Cochlea-Implantate sind elektrische Innenohrprothesen. Der externe Teil besteht aus einem oder zwei Mikrofonen, dem Sprachprozessor und der Senderspule. Das Implantat setzt sich aus der Empfängerspule, dem Elektrodenträger und einer Referenzelektrode zusammen (Abb. 3).

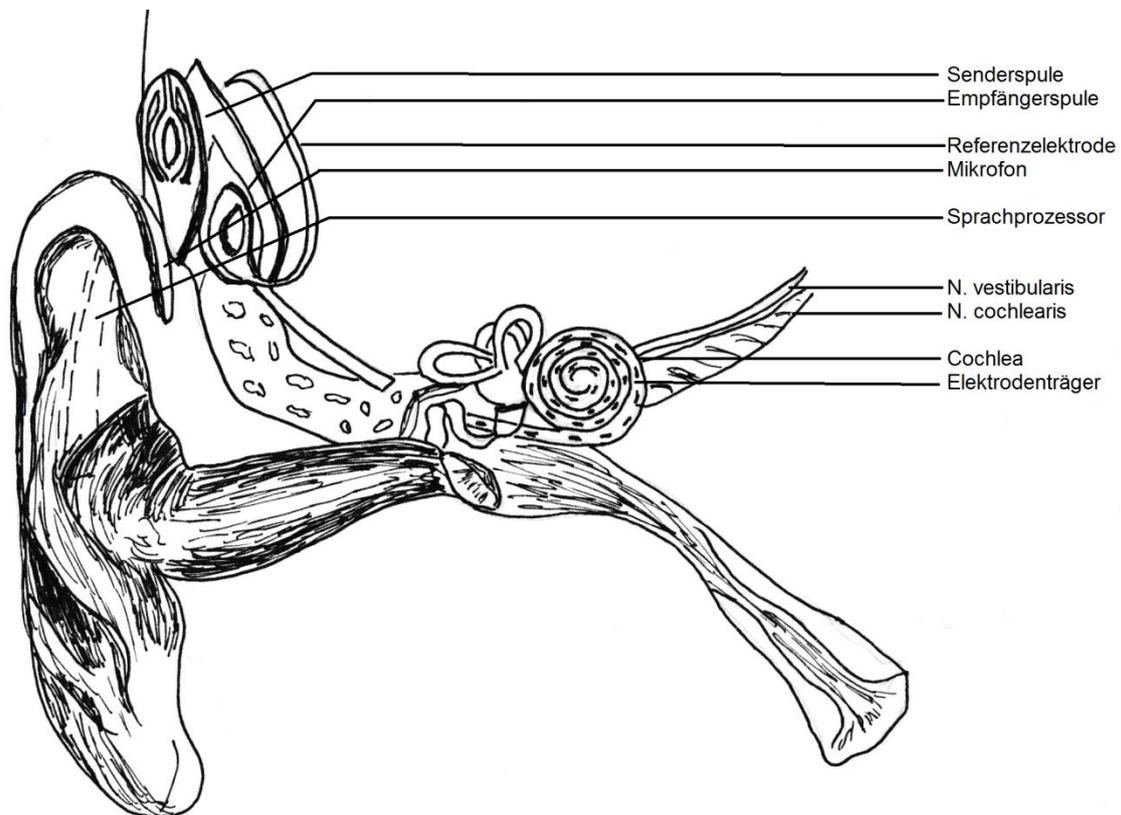


Abb. 3: Schematische Darstellung eines implantierten Cochlea-Implantat-Systems

Der ankommende Schall wird mit Hilfe der Mikrofone empfangen. Nach anschließender Verstärkung und Komprimierung findet im Sprachprozessor mit der Signalkodierung ein komplexer Schritt der Informationsverarbeitung statt. Dabei wird ein Algorithmus angewandt, der die Informationen des akustischen Ereignisses nach Frequenzen und Zeitpunkt des Eintreffens strukturiert (Zeit- und Ortskodierung). Diese Informationen sowie die vom Implantat benötigte Energie werden drahtlos mittels Induktion von der Sender- zur Empfängerspule unter die Kopfhaut (transkutan) übertragen. Die von der Empfängerspule dekodierten Informationen werden zum Elektrodenträger weitergeleitet. Dieser befindet sich entlang der Cochlea und besteht aus einem flexiblen Silikonträger mit einer Länge bis zu 26 mm, der mit insgesamt 12 bis 22 Elektroden versehen ist. Auf Grundlage der tonotopen

Ordnung an den korrespondierenden Stellen von Frequenz und Lokalisation führen die aktivierten Elektroden zu einer Reizung des Hörnervs (McDermott, 2004). Jede Elektrode erhält die Hüllkurve des Zeitverlaufs in ihrem Frequenzbereich. Der Nerv generiert wie beim physiologischen Hörvorgang Aktionspotenziale, die im Hörzentrum als akustisches Ereignis wahrgenommen und verarbeitet werden. Voraussetzung für dieses System ist, dass der Hörnerv weitgehend intakt ist.

1.2.2 Indikationen für die Implantation

Die Implantation eines CIs ist bei einer an Taubheit grenzenden Innenohrschwerhörigkeit indiziert. Resthörige Patienten, denen ein optimal angepasstes Hörgerät kein ausreichendes Sprachverstehen ermöglicht, sowie prä- und postlingual ertaubte Patienten profitieren davon. Voraussetzungen sind eine intakte Leitfähigkeit des Hörnervs und der zentralen Hörbahn (Probst, Grevers und Iro, 2008).

Meine Arbeit konzentriert sich auf die postlinguale Ertaubung, das nach Abschluss des Lauterwerbs beidseitige Auftreten einer cochleären Innenohrschwerhörigkeit. Die häufigste Ursache dieser Innenohrschwerhörigkeiten liegt in der Schädigung der Haarzellen. Aufgrund dessen gerät die Anwendung eines Hörgerätes an dieser Stelle an ihre Grenzen: Hörgeräte verstärken den ankommenden Schall und setzen eine funktionierende Weiterleitung bis einschließlich in das Innenohr voraus.

1.3 Herausforderungen mit dem Cochlea-Implantat

1.3.1 Technische Herausforderungen

Ein Normalhörender kann mit Hilfe von etwa 3500 aktiven inneren Haarzellen bis zu 1400 verschiedene Frequenzen wahrnehmen (Zeng, Tang und Lu, 2014). Die Anzahl von 12 bis 22 Elektroden eines CIs dient einer möglichst differenzierten Stimulation der Hörnervenfasern. Da mittels einer Elektrode eine relativ große Population von Nervenfasern simultan stimuliert werden (Snel-Bongers et al., 2012), ist die zu erreichende Frequenz-Orts-Abbildung im Allgemeinen wesentlich gröber als im normalen Gehör (Hallam, Cross und Thaut, 2008). Für die Sprachwahrnehmung in Ruhe reichen vier spektrale Kanäle aus (Shannon et al., 1995), während für die Tonhöhenwahrnehmung komplexer Töne mindestens 16 (Kong et al., 2004) bis 32 (Mehta und Oxenham, 2017) Kanäle als notwendig erachtet werden. Eine derart detaillierte Stimulation ist derzeit technisch nicht realisierbar, da der Aufbau elektrischer Felder innerhalb der dielektrischen Endolymphe zu Kanal-Interaktionen führt (Wilson und Dorman, 2008). CIs decken je nach Fabrikat eine Frequenzbandbreite von maximal 100Hz bis 8500 Hz ab. Dadurch wird der Bereich der Sprachwahrnehmung, der zwischen ungefähr 125Hz bis 8000Hz liegt (Boenninghaus und Lenarz, 2007), umfassend abgebildet. Musikalische Reize umfassen zuweilen ein breiteres Spektrum unter- und oberhalb des mit dem CIs wahrnehmbaren Frequenzbereiches.

Eine Verbesserung der Wahrnehmung tiefer Frequenzen stellt die Entwicklung der Verarbeitung der zeitlichen Feinstruktur dar (Müller et al., 2012). Im Vergleich zur Einhüllenden, die als Informationsträger die zeitliche Veränderung der Amplitude übermitteln, ermöglicht die Feinstruktur eine Übertragung der Details einzelner Schwingungen und ist der Musikwahrnehmung, dem Sprachverstehen im Störgeräusch und dem Richtungshören zuträglich. Dies ist in den momentan verfügbaren Strategien FSP (Fine structure processing) und dessen Weiterentwicklung FS4 (Fine structure auf vier Kanälen) verwirklicht. Damit eröffnet die Entwicklung der Feinstruktur-Information vielversprechende Möglichkeiten der Musikwahrnehmung mit dem Cochlea-Implantat (Limb und Roy, 2014). Daneben existieren weitere Strategien wie MP3000, die ein reduziertes Datenvolumen ohne hörbaren Klangverlust nach vorhergehender Selektion relevanter Signale übermitteln sowie HiRES. Dieses System basiert auf der Nutzung von bis zu 100 virtuellen Kanälen, wobei mehrere Elektroden gleichzeitig aktiviert werden.

1.3.2 Biologische Herausforderungen

Neben den technischen Einschränkungen führt eine länger währende Hörminderung zu Veränderungen der Morphologie und Physiologie des Hörsystems. Die Schädigung der inneren Haarzellen bewirkt eine verminderte Integrität der Hörnervenfasern (Ernfors et al., 1995). In der Folge kommt es neben der Demyelinisierung der Axone zur Degeneration und zum Verlust von Hörnervenfasern. Letzteres führt dazu, dass die Aktionspotenziale eine höhere Amplitude aufweisen müssen, um den Nerven adäquat zu erregen. Für die Sprachwahrnehmung in Ruhe ist der Hörnervenfaserverlust marginal – hier genügt eine kleine Anzahl intakter auditorischer Neurone von <15% (Nadol et al., 2011). Welche Anzahl von Neuronen für angemessene Musikwahrnehmung notwendig ist, ist momentan noch unerforscht. Die Demyelinisierung dagegen bewirkt verlängerte Latenz- und Refraktärzeiten sowie eine reduzierte zeitliche Auflösung und Blockierung der Informationsweiterleitung (Shepherd und Hardie, 2001). Für die Anwendung eines Cochlea-Implantats bedeutet das eine Verminderung der örtlichen Selektivität der einzelnen Elektroden und damit eine hinsichtlich des Frequenzspektrums weniger differenzierte Stimulation des Hörnervs. Eine möglichst kurze Ertaubungsdauer vor Implantation ist somit relevant für ein gutes Hörergebnis.

Obwohl die fortgeschrittene Schallempfindungsschwerhörigkeit häufig mit einem signifikanten Verlust der Hörnervenfasern einhergeht (Limb, 2012), sind Menschen auch nach Jahren der Schwerhörigkeit in der Lage, mit Hilfe eines Cochlea-Implantats Sprache und Musik wahrzunehmen. Begründet ist dies möglicherweise in der Neuroplastizität. Die adäquate Reizung des Hörnervs führt zu neuen physiologischen Anforderungen des zentralen Nervensystems, die eine optimierte Synapsenfunktion, eine erweiterte Stimulation von Hirnarealen und möglicherweise Axonsprossung zur Folge haben (Kral und Sharma,

2012; Shepherd et al., 2006). Diese Veränderungen sind Grundlage für Lernprozesse und neben der Dauer der Hörminderung abhängig vom Alter. Die Sprachwahrnehmung ist umso besser, je jünger die Patienten sind (Teoh, Pisoni und Miyamoto, 2004). Prälingual ertaubte, im Erwachsenenalter Implantierte profitieren häufig nur in geringem Maße von den Implantaten (Teoh, Pisoni und Miyamoto, 2004), was neben der langen Dauer der Hörminderung auch durch das beschränkte Zeitfenster des Spracherwerbs von 2-3 Lebensjahren (Probst, Grevers und Iro, 2008) begründet ist, welches bei späterer Implantation überschritten ist.

Mittlerweile profitieren weltweit bereits ungefähr 324.200 Menschen von dieser elektrischen Innenohrprothese (NIDCD, 2018). Inwieweit sich die Wahrnehmung musikalischer Parameter bei CI-Nutzern von denen Normalhörender unterscheidet, wird im Folgenden dargestellt.

1.4 Wahrnehmung musikalischer Parameter mit dem Cochlea-Implantat

Die Entwicklung von CIs ermöglicht Hörgeschädigten mittlerweile ein weitestgehend normales Sprachverständnis (Gifford, Shallop und Peterson, 2008; Wilson und Dorman, 2008). Musik unterscheidet sich von Sprache in vielfältigen Aspekten: der zeitlichen, insbesondere jedoch der spektralen (die Frequenz betreffenden) Komplexität. Die tonale Qualität (Timbre), eine spektrotemporale Eigenschaft, und der dynamische Umfang tragen ebenfalls mehr Information als in der Sprache. Aufgrund der höheren Redundanz aller genannten Qualitäten (Limb und Roy, 2014) stellt die Sprache für den Hörer im Vergleich zur Musikwahrnehmung die kleinere Herausforderung dar (Limb, 2006). Darüber hinaus bietet das Lippenlesen Hörgeschädigten eine weitere Möglichkeit die reduzierte Sprachwahrnehmung zum Teil zu kompensieren. Musik ist im Vergleich dazu wesentlich abstrakter, bietet in ihrer Vielfalt jedoch auch weitreichende Möglichkeiten der Kommunikation (Looi, Gfeller und Driscoll, 2012).

1.4.1 Perzeption temporaler Parameter: Rhythmus, Tondauer und Tempo

Zu den temporalen Parametern zählen Änderungen des Tempos, Erkennung verschiedener Metren (Betonungsmuster) und die Unterscheidung einfacher rhythmischer Ausschnitte. Hierbei erreichen CI-Nutzer zu Normalhörenden vergleichbare Leistungen (Drennan und Rubinstein, 2008; McDermott, 2004). Bei der Unterscheidung von rhythmischen Beispielpaaren erreichen CI-Nutzer in der betreffenden Aufgabe des Mu.S.I.C. Perception Tests zu Normalhörenden vergleichbare Ergebnisse (Brockmeier et al., 2011). Mit dem Primary Measures of Musical Audiation Test (PMMA), in dessen Teilaufgabe die Probanden während eines Vergleichs kurzer Rhythmussequenzen der gleichen Tonhöhe unterscheiden sollten, wurden Diskriminationsraten von 93% erreicht (Looi et al., 2008). Untersuchungen zur Tempoperzeption zeigten sehr gute Leistungen, die sich nicht von denen Normalhörender unterschieden (Kong et al., 2004).

1.4.2 Kombinierte spektrale und temporale Parameter: Erkennen von Musikinstrumenten anhand ihres Timbres

Das Timbre ist sowohl durch spektrale Parameter wie den Obertonverlauf und temporale wie den Einschwingvorgang charakterisiert. Das Erkennen von Musikinstrumenten anhand ihres Timbres stellt für CI-Nutzer eine große Herausforderung dar. In vielen Studien des University of Washington Clinical Assessment of Music Perception Test (CAMP) wurde gezeigt, dass Normalhörende diese Aufgabe fast in ihrer Gesamtheit ohne Probleme bewältigen (Kang et al., 2009). Bei der Identifikation gebräuchlicher Instrumente erreichten sie 94,2% korrekte Antworten (Kang et al., 2009). Im Vergleich dazu konnten weniger als die Hälfte der CI-Nutzer den Klang eines Instrumentes korrekt zuordnen (Drennan et al., 2015; Kang et al., 2009; Nimmons et al., 2008). Bei letztgenannten Autoren zeigte sich zudem, dass die Gitarre am häufigsten korrekt (64%) und die Flöte (31%) am seltensten erkannt wurde. Hinsichtlich dieser Aufgaben bedingt neben der reduzierten Qualität der Perzeption eine reduzierte Hörerfahrung die schlechteren Ergebnisse der CI-Nutzer.

1.4.3 Perzeption spektraler Parameter: Tonhöhenunterscheidung, Melodieerkennung und Erkennen harmonischer Akkorde

Was die sequenzielle Tonhöhendiskrimination betrifft, sind Normalhörende unabhängig von ihrer musikalischen Vorbildung in der Lage, Abstände von weit weniger als einem Halbtonschritt (HTS) wahrzunehmen (Zarate, Ritson und Poeppel, 2012). Studien, die die Leistungen von CI-Nutzern untersuchten, zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse, sowohl von Studie zu Studie als auch interindividuell: Sie reichen von einem HTS bis zu zwei Oktaven (Drennan und Rubinstein, 2008). Verschiedene Studien berichteten Mittelwerte von 2,95 HTS (Drennan et al., 2015), 3 HTS (Kang et al., 2009), 7,6 HTS (Gfeller et al., 2002), wobei diese Schwankungen durch unterschiedliche Methoden, aber auch Probandengruppen begründet sind.

Eine weitere den spektralen Parametern zugehörige Leistung ist die Melodieerkennung. Musikstücke anhand ihres Tonhöhenverlaufs zu erkennen, stellt für CI-Nutzer eine große Herausforderung dar. Nur 28% der CI-Nutzer waren in der Lage, eine bekannte Melodie zu identifizieren (Kong et al., 2004). Andere Studien zeigten ähnliche Ergebnisse: Unter Anwendung des PMMA Tests konnten 52% der Probanden nach Darbietung der ersten 15 Sekunden bekannter Melodien trotz Elimination rhythmischer Informationen diese korrekt identifizieren (Looi et al., 2008). Ein ähnlicher Versuchsaufbau wurde im CAMP Test verwendet. Dabei identifizierten CI-Nutzer 25,1% (NHs: 87,5%) (Kang et al., 2009) und 26,2% (Drennan et al., 2015) gewöhnliche Kinderlieder korrekt.

Rhythmische und sprachliche Informationen erleichtern die Melodieerkennung signifikant (Drennan und Rubinstein, 2008; Gfeller et al., 2012; Kong et al., 2004; McDermott, 2004). In einem Test zur Erkennung der melodischen Kontur von Fünf-Ton-Folgen erkannten CI-

Nutzer in Abwesenheit von Rhythmus nur 28% der Darbietungen korrekt. Unter zu Hilfenahme rhythmischer Hinweise hingegen stieg dieser Wert auf 60% (Galvin, Fu und Nogaki, 2007). Die Konkurrenz zusätzlicher Instrumente oder Maskierer beeinträchtigt hingegen die Leistung (Galvin, Fu und Oba, 2009).

Bisher existieren nur wenige Untersuchungen zur Konsonanzperzeption. Diese setzt die Wahrnehmung von Tonhöhenbeziehungen mehrerer gleichzeitig erklingender Töne voraus – ein Faktor, der diesen Parameter zu einem der herausforderndsten für CI-Nutzer macht (Limb und Rubinstein, 2012). Unter Anwendung des Mu.S.I.C. Perception Tests wurden Studien zur Diskrimination von Akkorden sowie eine Konsonanzbewertung von Klavierklängen durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass CI-Nutzer Akkorde unterscheiden können (Brockmeier et al., 2010, 2011). Außerdem bewerten erwachsene (Brockmeier et al., 2010, 2011) und junge prälingual ertaubte (Stabej et al., 2012) CI-Nutzer die Konsonanz von Klavierklängen ähnlich wie Normalhörende. Auf eine Darstellung der verschiedenen Akkordtypen wurde bei diesen Studien verzichtet.

Kunkel (Kunkel, 2014) stellte unter Anwendung der Züricher Musikkategorie MACarena fest, dass CI-Nutzer in Hinblick auf Harmoniepräferenz in einer Auswahl verschiedener Akkorde nur Rateniveau erreichen. In EEG-Studien zeigten sich hingegen während des Hörens irregulärer Harmonien in einer Akkordfolge bei CI-Nutzern im Vergleich zu Normalhörenden signifikant kleinere Antwortamplituden (Koelsch et al., 2004). Das spricht für eine zwar reduzierte, aber zumindest vorhandene neuronale Fähigkeit der CI-Nutzer Störungen in harmonischen Mustern wahrzunehmen.

1.5 Bedeutung von Konsonanz

Konsonanz

Der Begriff der Konsonanz im musikalischen Sinn bezieht sich zum einen auf die Kombination gleichzeitig erklingender Töne (Dahlhaus, 1980). Diese 'vertikalen' Tonkombinationen können Konsonanz, einen angenehmen Klang oder Dissonanz, einen unangenehmen, nach ‚Auflösung‘ bedürftigen Klang erzeugen (Krumhansl, 1990). Zum anderen umfasst der Begriff der Konsonanz die Verbindung 'horizontal' aufeinanderfolgender Tonsequenzen, Tonpaare und Akkorde (Tramo et al., 2001).

Vertikale Konsonanz

Vertikale Konsonanz gleichzeitig erklingender Töne wird durch sensorische Konsonanz und durch erworbene, Musik-spezifische Faktoren bestimmt. Die sensorische Konsonanz basiert auf der wahrgenommenen Rauigkeit eines einzeln dargebotenen Akkords (Helmholtz, 1877; Plomp und Levelt, 1965), die durch die Interaktion der Töne im auditorischen System entsteht. Ein einzeln dargebotener Ton eines Instruments oder der menschlichen Stimme

besteht aus mehreren Teiltönen, reinen Tönen, deren Oszillationen der Amplitude mit den Teiltönen anderer Töne, insofern sie in der Frequenz nah genug bei einander liegen, innerhalb einer kritischen Bandbreite erscheinen. Das bewirkt, dass sie die Basilarmembran in der gleichen Region erregen und für den Hörer eine 'Schwebung', einen dissonanten Klang hervorrufen (Plomp und Levelt, 1965). Töne, die in einem rationalen Frequenzverhältnis zueinander stehen, erzeugen keine Schwebung, was dazu führt, dass sie einen konsonanten Klang bewirken (Helmholtz, 1877). Diese Theorie lässt sich auf Dreiklänge erweitern. Dabei zeigt sich, dass Rauigkeit allein die vertikale Konsonanz nur unzureichend erklärt (Cook und Fujisawa, 2006; Roberts, 1986). Daneben existieren erworbene, Musik-spezifische Faktoren, die neben der durch die Intervalle an sich erzeugten Spannung möglicherweise auch einen kulturellen Faktor, einen durch die Umgebung geprägten Höreindruck beinhalten (Johnson-Laird, Kang und Leong, 2012).

Ein Akkord im engeren Sinne beinhaltet den jeweiligen Grundton, die Terz und die Quinte. Beim Durakkord beträgt der Abstand vom Grundton zum nächsten Ton vier Halbtonschritte, eine große Terz. Der Abstand zur Quinte beträgt sieben Halbtonschritte. Diese können um eine oder mehr Oktaven nach oben verschoben werden wie in Abb. 4 dargestellt. Bei diesen Intervallen handelt es sich isoliert betrachtet um konsonante Intervalle, weil ihre Frequenzen einfache rationale Verhältnisse darstellen (Helmholtz, 1877). Der Charakter des Durakkords wird aufgrund seiner Homogenität und Klangfülle als strahlend und rein empfunden (Amon, 2015). Durch Variation der Tonabstände zum Grundton ergeben sich weitere Akkorde. Der Unterschied zwischen Moll- und Durakkord liegt in der kleinen Terz mit drei Halbtonschritten. Dieser als ebenfalls angenehm wahrgenommene Akkord erzeugt mehr Spannung als Dur (Bigand, Parncutt und Lerdahl, 1996). Die Tonabstände des übermäßigen Akkords (augmented – aug) betragen vier (große Terz) und acht Halbtonschritte (übermäßige Quinte), die des verminderten Akkords (diminished – dim) drei (kleine Terz) und sechs Halbtonschritte (Abb. 4). Dieses als Tritonus bezeichnete Intervall gilt als äußerst dissonant. Der übermäßige und der verminderte Akkord werden auch von Nicht-Musikern als dissonant identifiziert (Bigand und Pineau, 1997) und in Musikstücken zum Spannungsaufbau und der Entwicklung einer Dramatik genutzt.

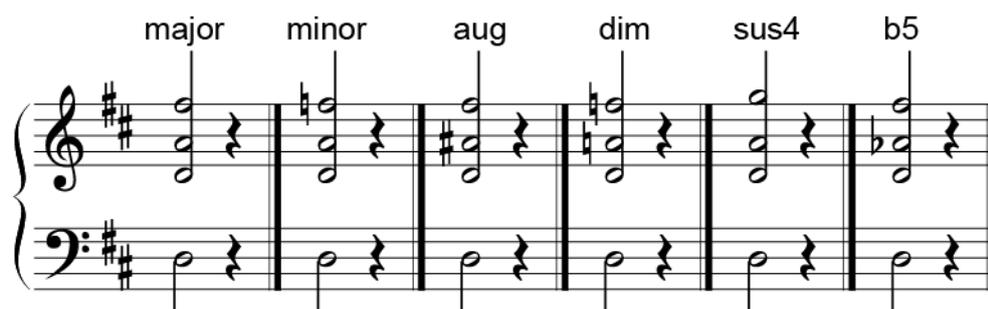


Abb. 4: Notenbeispiele von Akkorden

Horizontale Konsonanz

Musikstücke bestehen harmonisch gesehen aus Abfolgen verschiedener Akkorde, welche die horizontale Dimension einer Harmonie abbilden. Ein besonderes Konzept dabei ist die Kadenz, die definierte Abfolge von Akkorden, in der jeder Akkord eine harmonische Funktion besitzt, die von dessen Beziehung zur Grundtonart bestimmt wird (Regnault, Bigand und Besson, 2001). Eine häufige Anwendung findet die perfekte Kadenz (V–I): Am Ende eines Musikstückes führt die Dominante (V) zur Basis, der Tonika (I) (Rockstro et al., 1980) und bildet für den Hörer einen harmonischen Abschluss. Auch die isolierte Darbietung dieser Akkordfolge (V–I) wird als solcher wahrgenommen (Bharucha und Stoeckig, 1986; Rosner und Narmour, 1992). Wenn ein Musikstück mit einem instabilen Akkord endet, erzeugt es das Gefühl, das eine Fortsetzung der Sequenz folgt, wohingegen ein stabiler Akkord „einen befriedigenden Abschluss“ vermittelt, den Eindruck „nichts zu vermissen“ (Rameau, 1772). Die Tonika, der grundlegende Akkord einer Tonart, gilt als der stabilste Schlussakkord (Rockstro et al., 1980). Ausgehend davon werden die anderen Akkorde jeweils im Verhältnis zu dieser Basis wahrgenommen. Die Subdominante und der dominante Akkord gelten als etwas weniger stabil, haben aber insgesamt die engste Beziehung zur Tonika vor allen folgenden Akkorden (Bharucha, 1987).

Dieses in der westlichen Musik angewandte Konzept ist vergleichbar mit dem in der Sprache angewandten Syntax (Patel, 2003). Es werden somit bei der horizontalen Konsonanz nicht nur die Höreindrücke von Akkord zu Akkord beurteilt, sondern der Akkord im gesamten harmonischen Kontext (Bigand et al., 1999; Bigand und Pineau, 1997; Steinbeis, Koelsch und Sloboda, 2006). Diese Erwartungen entwickeln sich mit der Hörerfahrung, wobei die Entwicklung des musikalischen Systems auch ohne explizites Training, rein durch passive Musikwahrnehmung erfolgt (Bharucha, 1987; Krumhansl, 1990; Tillmann, Bharucha und Bigand, 2000). Die Erfahrungen rufen bestimmte Erwartungen im Hörer hervor – das Wissen zur harmonischen Hierarchie, bereits internalisierte Regeln zur Harmonie werden aktiviert (Regnault, Bigand und Besson, 2001) und die zur Tonalität gehörenden Harmonien werden erwartet.

Die Wahrnehmung der vertikalen Konsonanz, der Konsonanz eines isolierten Akkords, unterscheidet sich von der Wahrnehmung eines Akkords im harmonischen Kontext, der horizontalen Konsonanz, auch hinsichtlich kognitiver Prozesse (Regnault, Bigand und Besson, 2001). In EEG-Studien untersuchten sie evozierte Potentiale während der Darbietung variiertes Kadenzen, wobei als finaler Akkord, ähnlich zu den hier vorliegenden Experimenten, entweder der erwartete konsonante Akkord, ein konsonanter Akkord in einer anderen Tonart oder ein dissonanter Akkord erklang. Die Einordnung des Akkords zur Kadenz - der horizontalen Konsonanz erfolgte in einer frühen Potentialkomponente, während Veränderungen der akustischen Struktur dieses Akkords, eine Veränderung der vertikalen

Konsonanz zu einer späteren positiven Komponente führte. Das späte Erscheinen der Reaktion zur vertikalen Konsonanz spräche dafür, dass dieses ein komplexeres auditorisches Verarbeiten voraussetzt. Diese Ergebnisse unterschieden sich nicht zwischen Musikern und Nichtmusikern.

1.6 Problemstellung

Um eine Weiterentwicklung der Technik hinsichtlich der Stimulation und der Kodierungsstrategien zu ermöglichen, ist es notwendig, Faktoren zu untersuchen, die die Musikwahrnehmung beeinflussen. Die Harmoniewahrnehmung von CI-Nutzern besaß in bisherigen Studien einen kleinen Stellenwert und ist doch wesentlicher Bestandteil der Musik. Das Anliegen meiner Studie lag in einem Vergleich der Harmonieperzeption von CI-Nutzern und Normalhörenden: Zum einen wurde mit dem Paarvergleich von Akkorden die Wahrnehmung der vertikalen Konsonanz untersucht. Dabei identifizierten die Probanden nach der Darbietung zwei aufeinander folgender Akkorde aus einer Auswahl von insgesamt sechs Akkordtypen den harmonischeren. Zur Untersuchung der Wahrnehmung horizontaler Konsonanz waren die Probanden im zweiten Experiment, dem Kadenztest, dazu aufgefordert, in einer sequenziellen Darbietung von Akkorden einen musikalischen Abschluss zu erfassen. Die Hälfte der Darbietungen endete mit einer perfekten Kadenz, die andere mit einem dissonanten Akkord. In Bezug auf die bisherige Studienlage sollte weiterhin bewertet werden, welche Faktoren die Wahrnehmung der Parameter beeinflussen. Dazu wurden Sprachverstehen, musikalische Ausbildung, -Aktivitäten und Hörgewohnheiten der Probanden erfasst.

2. Material und Methoden

2.1 Studienteilnehmer

Teilnehmer der Studie waren 15 postlingual ertaubte Probanden [7 weiblich (w), 8 männlich (m)], die an der Universitätsklinik Magdeburg ein Cochlea-Implantat eingesetzt bekommen haben. Der Median des Alters lag zum Zeitpunkt der Teilnahme bei 61 Jahren (24–75 Jahre). Die Kontrollgruppe bestand aus 19 normalhörenden Probanden (11 weiblich, 8 männlich) mit einem Altersmedian von 60 Jahren (22–68 Jahre).

Alle Implantat-Nutzer und normalhörenden Probanden nahmen freiwillig an dieser Studie teil. Der Untersuchungszeitraum betrug 9 Monate (September 2011–Mai 2012).

2.1.1 Einschlusskriterien für Cochlea-Implantat-Probanden

Die Tragedauer des CIs betrug zum Zeitpunkt der Durchführung zwischen elf Monaten und 13,7 Jahren [Mittelwert (MW) 5,22 Jahre, Standardabweichung (SD) 4,37]. Die Frequenzbandbreite betrug 100–8500 Hz bzw. 100–7000 Hz (Proband CI02). Als Kodierungsstrategie fand FSP bei neun und FS4 bei sechs der Probanden Anwendung. Eine detaillierte Auflistung findet sich in Tab. 1.

Folgende Einschlusskriterien wurden von den CI-Nutzern erfüllt:

- eine rein postlinguale Ertaubung
- ein Mindestalter von 18 Jahren
- Modell: Concerto oder Sonata-Implantat mit einem Opus 2-Prozessor
- eine Anzahl von mind. 10 aktiven Kanälen pro Implantat
- eine Tragezeit für das aktuelle Implantat und den Sprachprozessor von wenigstens drei Monaten
- ein Sprachverstehen von mindestens 30% im Freiburger Einsilber-Test

Binaural implantierte Patienten wurden gebeten ihr weiteres Implantat für den Untersuchungszeitraum zu inaktivieren bzw. das gesunde Ohr mit Oropax zu verschließen. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Messung nur das relevante implantierte Ohr betrifft.

Pro-band	Ge-schlecht	Alter	Seite des Im-plantats	Dauer CI Nutzung (Jahre; Monate)	Implantat	Strategie	Aktive Elektroden	Ätiologie
CI01	m	64	Rechts	12;8	C40+	FSP	11	Knalltrauma
CI02	w	74	Links	9;10	C40+	FSP	10	progrediente Hörstörung
CI03	m	55	Rechts	2;11	SONATAti100	FSP	12	progrediente Hörstörung
CI04	m	72	Links	0;11	CONCERTO	FS4	12	Gehörlosigkeit seit 2000
CI05	w	75	Links	3;5	SONATAti100	FSP	11	progrediente Hörstörung
CI06	m	66	Links	1;11	SONATAti100	FSP	12	progrediente Hörstörung
CI07	m	58	Links	6;0	PULSARci100	FS4	11	Gentamycin-behandlung
CI08	w	71	Rechts	13;7	C40+	FSP	11	progrediente Hörstörung
CI09	w	24	Rechts	5;0	PULSARci100	FS4	12	hereditäre Schwerhörigkeit
CI10	w	68	Links	3;0	SONATAti100	FSP	12	progrediente Hörstörung
CI11	w	61	Links	9;0	C40+	FSP	11	hereditäre Schwerhörigkeit
CI12	m	47	Rechts	1;5	CONCERTO	FS4	12	hereditäre Schwerhörigkeit
CI13	w	57	Links	4;8	PULSARci100	FSP	11	progrediente Hörstörung
CI14	m	69	Links	1;4	CONCERTO	FS4	12	progrediente Hörstörung
CI15	m	70	Rechts	1;6	CONCERTO	FS4	11	progrediente Hörstörung

Tab. 1: Epidemiologische Daten der CI-Probanden

2.1.2 Einschlusskriterien für normalhörende Probanden

Für die Teilnehmer der Vergleichsgruppe wurde vorausgesetzt, dass die maximale Minderung der beidseitigen Hörleistung in einem Bereich von 0,125 kHz bis 3 kHz einen Schalldruckpegel von 30 dB nicht überschritt. Zur Sicherstellung dieser Voraussetzung wurde im Vorfeld ein Audiogramm mit den Standardfrequenzen 125-250-500-750-1000-1500-2000-3000-4000-6000-8000 Hz erstellt (Probst, Grevers und Iro, 2008, s. Anhang 1). Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass diese Probandengruppe im Alter und der Musikalität der CI-Nutzer entsprach sowie eine gleichmäßige Geschlechterverteilung aufwies.

2.2 Messplatz und Durchführung

Die Untersuchungen wurden in einem akustisch reflexionsarmen Raum der Experimentellen Audiologie in der Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde durchgeführt. Der Messplatz bestand aus einem Messcomputer, einer Soundkarte (Terra Tec DMX 6 Fire USB), einem

Abschwächer, dem Lautsprecher (Tannoy Reveal 6D) und einem Bearbeitungsbildschirm für den Probanden.

Den Testpersonen wurden über einen 1 m entfernten frontal gestellten Lautsprecher und einer digitalen Soundkarte rechnergesteuert zufällig geordnete Stimuli dargeboten. Eine Wiederholung war nicht möglich.

Die Akkorde wurden als Sinustöne aus einer Sequenzsoftware (MATLAB, The Mathworks Inc., Natick MA, USA) unter Verwendung des Alternative-Forced-Choice-Verfahrens dargeboten. Der einzelne Akkord bestand aus vier harmonischen Tonkomplexen mit jeweils fünf Teiltönen. Die Differenz der Teiltöne betrug in ihrer Ordnung 6 dB.

Das Abschwächerprogramm wurde rechts auf 24dB und links auf mute eingestellt. Die Probanden konnten mit Hilfe einer Computermaus oder durch Berühren des entsprechenden Antwortfeldes auf dem Touchscreen ihre Bewertung zur dargebotenen Harmonie abgeben. Auf der Grundlage eines im Vorfeld definierten Protokolls wurden alle Messreihen unter der Anleitung desselben Versuchsleiters durchgeführt. Eine Messreihe dauerte ungefähr 90 Minuten. Zu Beginn jeder Testreihe erfolgte eine Übungsphase um den Probanden mit der Aufgabe, den akustischen Stimuli und der Bedienung des Bildschirms vertraut zu machen.

2.3 Messverfahren

2.3.1 Testverfahren zur Musikperzeption

Um unterschiedliche Aspekte der Harmoniewahrnehmung zu untersuchen, kamen zwei psychoakustische Messverfahren zur Anwendung: Der Paarvergleich von Akkorden und der Kadenztest.

Paarvergleich von Akkorden

Das Ziel dieses nichtadaptiven Tests bestand darin, zu ermitteln wie verschiedene Akkorde in ihrem harmonischen Klang bewertet werden.

Den Probanden wurden nacheinander zwei unterschiedliche Akkordtypen der gleichen Grundfrequenz mit einer Dauer von jeweils 1600 ms dargeboten. Die Pause zwischen den Stimuli betrug 1600ms.

Die Grundfrequenz variierte zwischen 147 Hz und 185 Hz, was den Tönen D und F# entspricht. Es erfolgte der Vergleich folgender Akkorde: Dur, Moll, verminderter (diminished-Dim), übermäßiger Akkord (augmented-Aug), Akkord mit einem Quartvorhalt (Sus4) oder Akkord mit einer übermäßigen Quinte (B5). Der veränderte harmonische Klang dieser aufgeführten Akkorde war durch eine Veränderung von einem oder zwei Tönen um einen Halbton (s. Abb. 5) ausgehend vom Durakkord bedingt.

Jede mögliche Kombination je Grundfrequenz wurde zweimal präsentiert (insgesamt 60 Akkordpaare). Die Aufgabe des Probanden war es zu entscheiden, welcher Akkord "harmonischer, reiner" klingt.

Zur Familiarisierung wurde mit einer Testphase bestehend aus 4 Itempaaren begonnen. Diese konnten bei Bedarf wiederholt werden. Danach folgten vier Durchgänge à 15 Paarbeispiele.

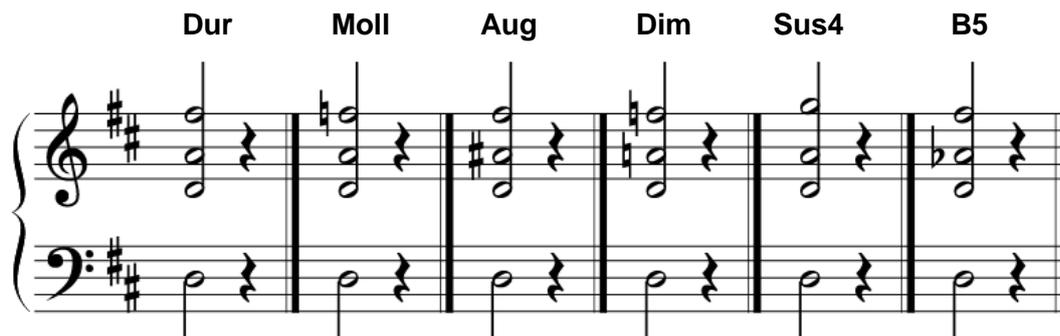


Abb. 5: Notenbeispiele der Akkorde zum Paarvergleich

Kadenztest

Im zweiten psychoakustischen Experiment wurde die Fähigkeit einen musikalischen Abschluss zu erkennen, untersucht.

Bei diesem 2-Alternative-forced-choice-Test wurden den Probanden geläufige Akkordfolgen der westlichen Musik in verschiedenen Lagen mit einer Grundfrequenz von 147 Hz und 185 Hz dargeboten. Grundlage war die perfekte Kadenz bestehend aus Tonika, Subdominante, Dominante und Tonika (Abb. 6).

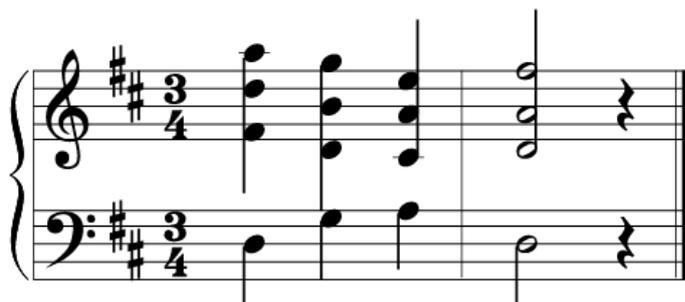


Abb. 6: Eine perfekte Kadenz in D-Dur

Die Dauer der ersten drei Akkorde betrug 1000 ms und die des Schlussakkordes 1600 ms. Die Harmonien waren durch eine Pause von 200 ms abgegrenzt. Die Tonart variierte zwischen D, D#, E, F, F# um eine Habituation des Gehörs zu vermeiden.

In der Hälfte der Darbietungen endete die Kadenz mit der Tonika in Terzlage. Alternativ erklang ein veränderter Schlussakkord: Bei diesem konnte es sich entweder um die um 1–2 Halbtöne nach oben (Sh +1/2) bzw. unten (Sh -1/2) verschobene Tonika (Bedingung 1, Abb. 7) handeln oder es folgte statt der Tonika ein verminderter (Dim) oder übermäßiger (Aug) Akkord (Bedingung 2, Abb. 8). Demzufolge erklang in der ersten Bedingung zwar ein in sich schlüssiger Akkord am Ende der Kadenz, jedoch konnte er die harmonische Folge der vorherigen nicht abschließen, da er nicht zur Tonika, dem harmonischen Zentrum zurückführte. Notenbeispiele sind in der Abb. 7 und 8 gezeigt. Dabei wird auch ersichtlich, dass in der zweiten Bedingung zwar ein insgesamt dissonanter Akkord den Stimulus darstellt, dieser jedoch abhängig von seiner Veränderung Gemeinsamkeiten mit der Tonika enthält: Der verminderte 1 (Dim 1) und übermäßige 1 (Aug 1) Akkord teilten den gleichen Grundton, der verminderte 2 (Dim 2) und übermäßige 2 (Aug 2) Akkord die Quinte des jeweils erwarteten Durakkords. Für jede Kondition (vollendet vs. offen) gab es 16 richtige und 16 abweichende Schlüsse.

Sh +1 Sh +2 Sh -1 Sh -2

The musical score for Abb. 7 is written in 3/4 time with a key signature of two sharps (F# and C#). It consists of two staves: a treble clef staff and a bass clef staff. The first two measures show a progression of chords: a triad of F#4, C#5, and F#5 in the treble, and a bass line of F#2, C#3, and F#3. The final two measures show four different chordal resolutions, each marked with a vertical bar line. These resolutions are labeled Sh +1, Sh +2, Sh -1, and Sh -2. Each resolution consists of a single chord in the treble staff and a single note in the bass staff.

Abb. 7: Eine unvollendete Kadenz mit um 1–2 HT verschobenen Akkorden (Bedingung 1)

Aug 1 Aug 2 Dim 1 Dim 2

The musical score for Abb. 8 is written in 3/4 time with a key signature of two sharps (F# and C#). It consists of two staves: a treble clef staff and a bass clef staff. The first two measures show a progression of chords: a triad of F#4, C#5, and F#5 in the treble, and a bass line of F#2, C#3, and F#3. The final two measures show four different chordal resolutions, each marked with a vertical bar line. These resolutions are labeled Aug 1, Aug 2, Dim 1, and Dim 2. Each resolution consists of a single chord in the treble staff and a single note in the bass staff.

Abb. 8: Eine unvollendete Kadenz mit übermäßigen und verminderten Akkorden (Bedingung 2)

Die Aufgabe der Probanden lag darin zu entscheiden, ob diese Kadenz schlüssig war, indem sie auf der Tonika endete oder ob sie sich als offen darstellte, weil es sich um einen veränderten Schlussakkord handelte.

Es wurde mit einer Übungsphase begonnen, welches aus acht Items mit vier Beispielen, die auf der Tonika endeten und vier abgewandelten Hörbeispielen bestand. Diese konnten bei Bedarf wiederholt werden. Anschließend wurden dem Probanden vier Folgen à 16 Items dargeboten, die sich jeweils mit einer Folge des Paarvergleichs von Akkorden abwechselten. Hierbei wechselten sich jeweils ein Komplex bestehend aus Bedingung 1 und ein weiterer aus Bedingung 2 ab.

Die Ergebnisse wurden fortlaufend auf der Festplatte des Messcomputers gespeichert.

2.3.2 Testverfahren zum Sprachverständnis

Oldenburger Satztest

Der Oldenburger Satztest wurde zur Überprüfung der Korrelation des Sprachverstehens im Störgeräusch mit Ergebnissen der Musikwahrnehmung angewendet. Grundeinstellungen waren die Durchführung als geschlossener adaptiver Test mit festem Sprachpegel.

Freiburger Einsilber-Test

Unter Verwendung des Audiometers (FA.MAICO) bei einem Sprachpegel von 65 dB im Freifeld wurden den Probanden die Liste 1 zur Familiarisierung dargeboten und eine weitere beliebige Liste zur Messung (Probst, Grevers und Iro, 2008).

2.3.3 Testverfahren zum Musikerleben

MUMU- (Münchener Musik) Fragebogen

Aus dem von Dr. S. J. Brockmeier entwickelten MUMU- (Münchener Musik) Fragebogen wurde eine Auswahl von Fragen zum Musikerleben erhoben (Anlage 2). Dabei bekamen CI-Nutzer 11 und Normalhörende 6 Fragen zugeteilt, die sich mit folgenden Bereichen befassten:

- Vergangene und aktuelle Musikaktivitäten (Fragen 2, 11, 17, 19, 22–25): Ziel der Selektion zuvor gelisteter Fragen war, die Erfahrung des einzelnen Probanden mit Musik zu quantifizieren.
- Hörgewohnheiten und Klangbeurteilung (Fragen 4, 5, 11): Mit Hilfe dieser Fragen sollte ein Überblick zum Thema der aktuellen Zufriedenheit mit dem Implantat und dessen Einstellungen gegeben werden.
- Vergnügen an verschiedenen Musikstilen (Frage 15): Von 8 zur Auswahl stehenden Musikrichtungen sollten präferierte Stile markiert werden.

Die unterschiedliche Anzahl für die Probandengruppen ergab sich aufgrund der CI-Spezifität einiger Fragen. Die Beantwortung erfolgte anhand von numerischen Ratingskalen (Fragen 2, 4, 17, 19), Einfachwahl- (Fragen 5, 11, 22–24) und Multiple-Choice-Fragen (Fragen 15, 25) – wobei Mehrfachantworten möglich waren.

Zur Überprüfung möglicher Korrelationen wurden sechs Faktoren fünf verschiedener Fragen (2, 17, 19, 22, 23) beider Probandengruppen herangezogen und ein Score gebildet. Dabei wurden die Werte der numerischen Ratingskalen addiert und für den Faktor Unterricht bei Inanspruchnahme 7 Punkte und zusätzlich 3 Punkte, wenn Unterricht mehr als drei Jahre stattgefunden hatte, vergeben.

2.4 Datenanalyse

Nach der vollständigen Datenerfassung mit dem MATLAB-Programm, erfolgte in anonymisierter Weise die Analyse mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS. Für alle statistischen Tests wurde als Signifikanzniveau $p < 0,05$ festgelegt. Zur Erstellung der Grafiken wurde MATLAB genutzt.

2.4.1 Paarvergleich von Akkorden

Der jeweils bevorzugte Akkord wurde mit +1 und der zurückgewiesene mit -1 bewertet. Diese Bewertungen wurden aussummiert. Somit ergab sich für jeden Akkord ein Score.

Es sollten zwei verschiedene Hypothesen untersucht werden:

1. Werden die Akkordtypen in ihrem harmonischen Klangeindruck unterschiedlich bewertet?
2. Weisen CI-Nutzer ein anderes Präferenzmuster als Normalhörende auf?

Zur Untersuchung der Mittelwerte der Bewertungen in Abhängigkeit vom Akkordtyp und der Gruppe wurde eine Zweifaktorielle Varianzanalyse mit Korrektur nach Greenhouse-Geisser herangezogen. Ein T-Test für unabhängige Stichproben wurde durchgeführt um die Differenzen in Bezug auf Bewertungen für die einzelnen Akkorde zwischen den Gruppen zu untersuchen.

Der Post-Hoc-T-Test mit Korrektur nach Bonferroni diente der Betrachtung signifikanter Unterschiede von Akkordbewertungen innerhalb der jeweiligen Gruppe.

Zur Quantifizierung der Bewertungsabweichung von Implantat-Nutzern gegenüber Normalhörenden wurde der Euklidische Abstand (EA) ermittelt. Für jeden CI-Nutzer wurde die Abweichung der individuellen Bewertung vom Mittelwert der Bewertungen der NH-Probanden für den jeweiligen Akkordtyp quadriert und aufsummiert. Aus diesem Wert wurde die Wurzel gezogen und durch die Anzahl der Akkordtypen (6) dividiert. Somit ergab sich der gesuchte Euklidische Abstand.

2.4.2 Kadenztest

Zur Auswertung wurden folgende Parameter für jeden Probanden und jede Bedingung ermittelt:

1. Rate der Treffer: bezeichnet die Anzahl der richtigen Kadenzen, die als schlüssig bezeichnet wurden im Verhältnis zur Gesamtzahl korrekter Kadenzen.
2. Rate der falschen Alarme (FA-Rate): bezeichnet die Anzahl der unerwarteten Kadenzen, die fälschlicherweise als schlüssig bezeichnet wurden im Verhältnis zur Gesamtzahl abweichender Kadenzen.

Zur statistischen Auswertung wurde gemäß der Signalentdeckungstheorie (nach Stanislaw und Todorov, 1999) für jeden Probanden und jede Bedingung der Sensitivitätsindex d' gebildet: $d' = \frac{\text{Rate der Treffer} - \text{Rate der falschen Alarme}}{\sqrt{\text{Rate der Treffer} \cdot \text{Rate der falschen Alarme}}}$. Um die mögliche Folge unendlicher Sensitivitätsindizes zu umgehen, wurden perfekte Raten von 1 und 0 korrigiert. Falsch-Alarmraten von 0 wurden durch $1/(2n)$ ersetzt, Trefferraten von 1 durch $1-1/(2m)$. Dabei stellte n die Gesamtzahl der abweichenden, m die Gesamtzahl der korrekten Kadenzen dar (Stanislaw und Todorov, 1999). Folgend entsprach eine fehlerlose Bearbeitung des Kadenztests dem Wert $d' = 3,725$.

Um mögliche Unterschiede zwischen den Probandengruppen und Testbedingungen zu untersuchen, wurde eine Zweifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt.

Der Post-Hoc-T-Test wurde zur Entdeckung signifikanter Differenzen innerhalb der Gruppen angewandt.

Es wurde eine separate Auswertung der Falsch-Alarmraten verschiedener Akkordtypen erstellt um herauszufinden, ob bestimmte Schlussakkorde besser oder schlechter als Abschluss einer unschlüssigen Kadenzfolge erkannt werden.

Die Datenanalyse und die Gewichtung der Faktoren des MuMu-Scores erfolgten mit der Unterstützung des Instituts für Biometrie und Medizinische Statistik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

2.4.3 Einflussfaktoren auf die Harmoniewahrnehmung

Zur Untersuchung einer eventuell vorhandenen Korrelation verschiedener Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der Harmoniewahrnehmung wurden mit Kendall-Tau-b und Spearman-Rho nichtparametrische Tests durchgeführt.

Um die im Verlauf fehlende Korrelation aufgrund einer großen Streuung der individuellen Resultate aufzudecken, erfolgte eine Unterteilung der Probandengruppen: Der Median der Sprachverstehensschwelle diente der Zuordnung von CI-Nutzern zu einer Gruppe mit einem besseren oder schlechteren Sprachverstehen. Mit Hilfe des Medians des MuMu-Scores erfolgte innerhalb beider Probandengruppen eine Aufteilung in eine musikalische und eine weniger musikalische Gruppe.

3. Ergebnisse

3.1 Oldenburger Satztest

Der Oldenburger Satztest im Störgeräusch wurde durchgeführt um Zusammenhänge der Harmonieperzeption mit dem komplexen Sprachverstehen zu untersuchen. Die individuellen Sprachverständlichkeitsschwellen der CI-Nutzer lagen zwischen -3,6 dB und +9,3 dB (Abb. 9). Der Mittelwert betrug 2,5 dB (SD 4,02 dB).

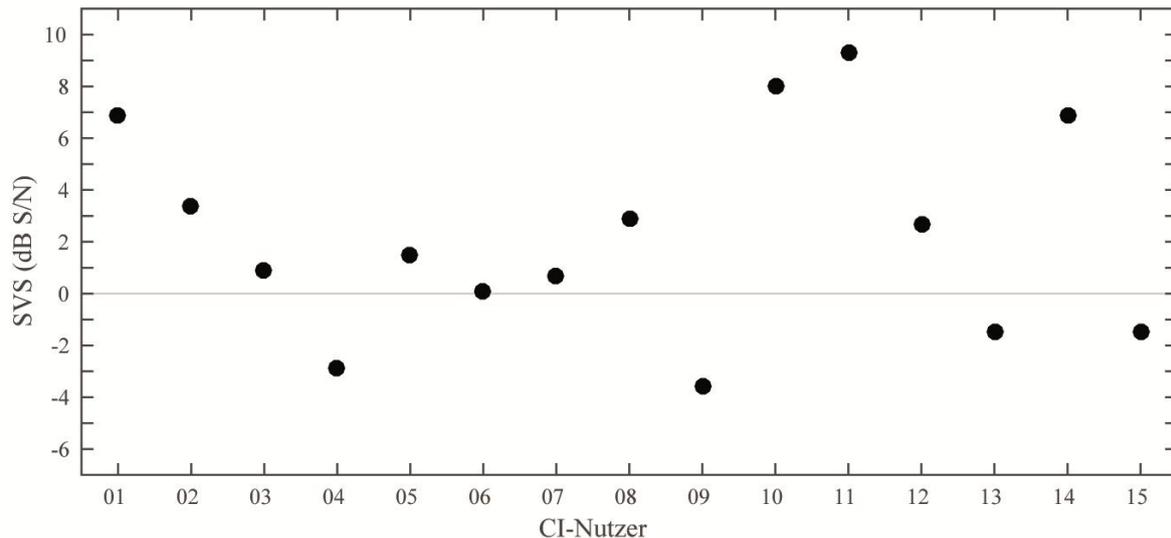


Abb. 9: Individuelle Sprachverständnisschwellen der CI-Nutzer im Oldenburger Satztest mit Störgeräusch

3.2 Münchener Musikfragebogen

Cochlea-Implantat-Nutzer

Die Anwendung des Fragebogens diente der Untersuchung von Zusammenhängen zwischen der Harmonieperzeption und des Musikerlebens. Wie in der Abbildung 10 dargestellt, erreichten CI-Nutzer im Münchener Musikfragebogen Scores zwischen 8 und 23 Punkten. Der Mittelwert betrug 13,9 Punkte (SD 4,6 Punkte).

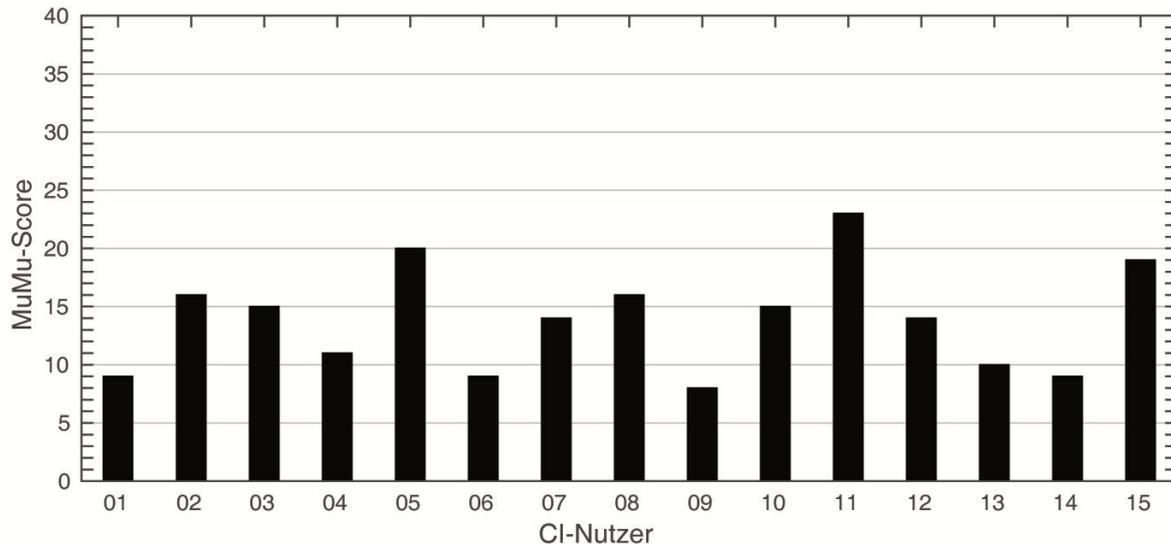


Abb. 10: Ergebnisse des Münchener Musikfragebogens der CI-Nutzer

Normalhörende Probanden

In der Gruppe der Normalhörenden zeigte die Intensität des Musikerlebens eine heterogenere Verteilung. Die Werte der Vergleichsgruppe lagen wie in der Abbildung 11 ersichtlich zwischen 7 und 39 Punkten, mit einem Mittelwert von 20 Punkten (SD 11 Punkte). Der im Vergleich zu den CI-Nutzern höhere Wert erklärt sich zum Teil dadurch, dass keiner von ihnen Musikunterricht erhalten hatte, in der Vergleichsgruppe hingegen acht Probanden eine musikalische Ausbildung besaßen, sechs von ihnen sogar länger als drei Jahre.

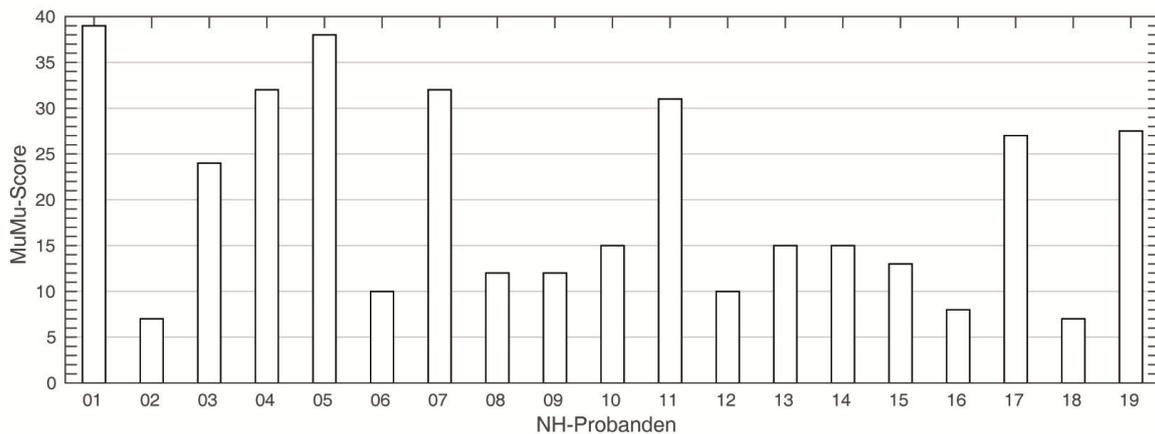


Abb. 11: Ergebnisse des Münchener Musikfragebogens der Normalhörenden

3.3 Paarvergleich von Akkorden

Das eigentliche Messparadigma enthielt zwei psychoakustische Aufgaben. Im ersten Test war bei einer Darbietung zwei verschiedener Akkorde aus einer Auswahl von sechs Typen der harmonischer klingende zu benennen.

3.3.1 Ergebnisse der Probandengruppen im Vergleich

In der Abbildung 12 sind die Bewertungen für jeden Akkordtyp nach Probandengruppe sortiert dargestellt. Aus einer Varianzanalyse mit diesen beiden Faktoren wurde ersichtlich, dass die beiden Gruppen die verschiedenen Harmonien in Bezug auf ihre Dissonanz jeweils unterschiedlich beurteilten. Das zeigte sich im Effekt des Faktors Akkordtyp: $F(4,2) = 14,3$ $p < 0,001$.

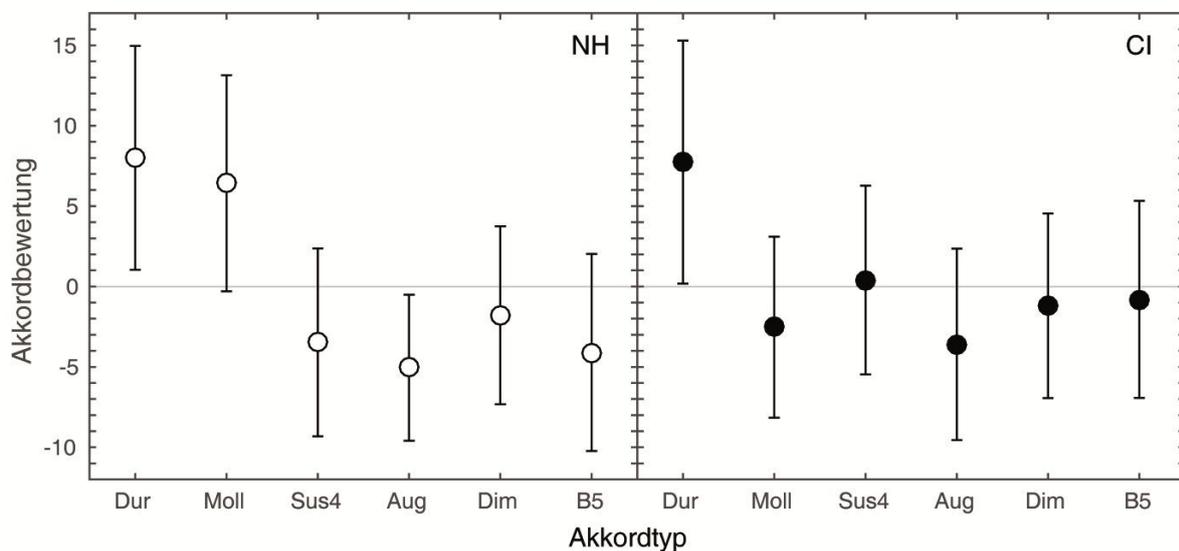


Abb. 12: Bewertungen der verschiedenen Akkordtypen für die Normalhörenden (links) und die CI-Nutzer (rechts)

Durch das Design des Experimentes bedingt, kann der Einfluss der Gruppe nicht direkt als Zwischensubjekteffekt untersucht werden, da die Summe der einzelnen Akkordbewertungen für jeden Teilnehmer per definitionem null ergibt. Allerdings zeigte die signifikante Interaktion zwischen Probandengruppe und Akkordtyp, dass die CI-Nutzer eine andere Bewertungsverteilung auf die Akkorde als die Normalhörenden aufwiesen ($F(5) = 4,2$, $p < 0,01$).

Normalhörende Probanden beurteilten die Konsonanz der Akkorde in absteigender Reihenfolge wie folgt: Dur, Moll, Dim, Sus4, B5, Aug. Die Bewertung der CI-Nutzer wich davon ab: Dur, Sus4, B5, Dim, Moll, Aug, wobei die Differenzen zwischen den einzelnen Akkorden geringer war als bei der Gruppe der Normalhörenden.

Der zum Vergleich von Bewertungen gleicher Akkordtypen zwischen Probandengruppen angewandte Post-hoc-T-Test bei unabhängigen Stichproben zeigte, dass sich die Bewertung zwischen den beiden Probandengruppen für den Mollakkord signifikant unterschied: $T(32) = -4,1$ $p < 0,001$. Für den Akkord mit dem Quartvorhalt war ein nicht signifikanter Trend erkennbar: $T(32) = 1,9$ $0,05 < p < 0,07$. Dagegen war die Beurteilung der übrigen Akkorde (Dur, übermäßiger Dreiklang, verminderter Dreiklang und verminderte Quinte) zwischen den Probandengruppen nicht signifikant verschieden.

Akkord	Mittelwert NH	SD	Mittelwert CI	SD
Dur	8	6,96	7,73	7,55
Moll	6,42	6,72	-2,53	5,63
Sus4	-3,47	5,84	0,4	5,87
Aug	-5,05	4,54	-3,6	5,96
Dim	-1,79	5,53	-1,2	5,75
B5	-4,11	6,13	-0,8	6,13

Tab. 2: Mittelwerte der Bewertungen der verschiedenen Akkordtypen für die Normalhörenden (links) und die CI-Nutzer (rechts) mit Standardabweichungen

Um die Akkordbewertungen innerhalb der jeweiligen Probandengruppe zu untersuchen, wurden erneut Post-hoc-T-Tests mit Korrektur nach Bonferroni herangezogen. Der Durakkord wurde von der normalhörenden Vergleichsgruppe signifikant unterschiedlich zu den Akkorden Sus4, Aug, Dim, und B5 beurteilt.

Ein vergleichbares Bild ergab sich für den Mollakkord. Diese Harmonie wurde nachweislich anders bewertet als die Akkorde Sus4, Aug, Dim und B5. Es zeigte sich keine signifikante Differenz im Vergleich von Dur und Moll.

	Moll	Sus4	Aug	Dim	B5
Dur	T(18) = 0,722 p > 0,05	T(18) = 5,488 p < 0,05	T(18) = 5,802 p < 0,05	T(18) = 4,657 p < 0,05	T(18) = 4,264 p < 0,05
Moll		T(18) = 4,096 p < 0,05	T(18) = 5,242 p < 0,05	T(18) = 3,564 p < 0,05	T(18) = 4,74 p < 0,05
Sus4			T(18) = 0,956 p > 0,05	T(18) = -0,792 p > 0,05	T(18) = 0,291 p > 0,05
Aug				T(18) = -1,795 p > 0,05	T(18) = -0,667 p > 0,05
Dim					T(18) = 1,235 p > 0,05

Tab. 3: Akkordbewertungen der Normalhörenden, dabei werden der Dur- und Mollakkord signifikant harmonischer als die Akkorde Sus4, Aug, Dim, und B5 beurteilt

Die CI-Nutzer bewerteten den Dur- als signifikant unterschiedlich zum Mollakkord, zum übermäßigen und verminderten Akkord. Die Bewertungen der weiteren Akkorde unterschieden sich hingegen nicht signifikant.

	Moll	Sus4	Aug	Dim	B5
Dur	T(14) = 3,989 p < 0,01	T(14) = 2,672 p < 0,05	T(14) = 3,799 p < 0,01	T(14) = 3,481 p < 0,01	T(14) = 2,931 p < 0,05
Moll		T(14) = -1,17 p > 0,05	T(14) = 0,55 p > 0,05	T(14) = -0,58 p > 0,05	T(14) = -0,707 p > 0,05
Sus4			T(14) = 1,576 p > 0,05	T(14) = 0,757 p > 0,05	T(14) = 0,576 p > 0,05
Aug				T(14) = -1,02 p > 0,05	T(14) = -1,269 p > 0,05
Dim					T(14) = -0,155 p > 0,05

Tab. 4: Akkordbewertungen der CI-Nutzer, dabei wird der Durakkord als signifikant harmonischer als zu Moll, Aug und Dim bewertet

Innerhalb dieser Probandengruppe zeigte sich ein inhomogenes Verteilungsmuster der Akkordbewertungen. Um zu quantifizieren, wie stark der einzelne CI-Nutzer in der Bewertung vom Durchschnitt der Normalhörenden abweicht, wurde der Euklidische Abstand (EA) zum

Mittelwert der Bewertung der Normalhörenden bestimmt (s. Methodenteil). Hohe Werte bedeuten ein stark von den Normalhörenden abweichendes Bewertungsverhalten. Die Einzelergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt. CI02 wich in der Bewertung nur geringfügig (1,29 Punkte) von der Vergleichsgruppe ab, CI10 hingegen am stärksten (4,04 Punkte). Der Mittelwert betrug 2,98 Punkte (SD 0,84 Punkte).

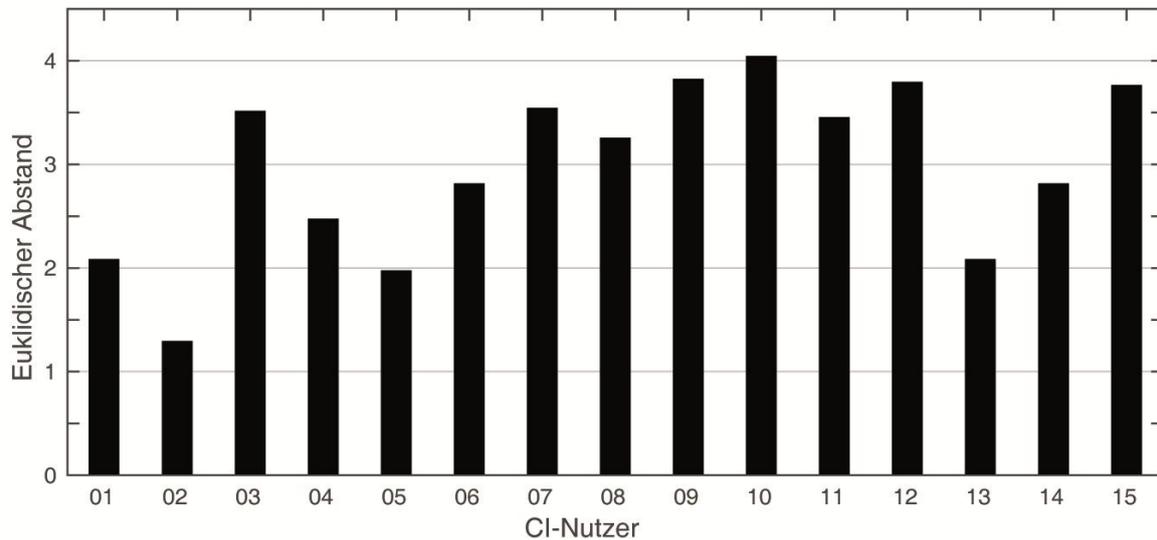


Abb. 13: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer gegenüber den Normalhörenden, quantifiziert durch den Euklidischen Abstand (EA)

3.3.2 Einflussfaktoren auf die Konsonanzbewertung von Akkorden

Sprachverstehen im Störgeräusch

Um herauszufinden, ob CI-Nutzer mit einem besseren Sprachverstehen im Störgeräusch zu Normalhörenden ähnliche Ergebnisse im Paarvergleich von Akkorden erlangen, sind in der Abbildung 14 die Abweichungen der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit der Sprachverständlichkeitsschwellen aufgetragen. Wie bereits mit Hilfe der Trendlinie erkennbar wird, gehen niedrigere OLSA-Werte, die ein besseres Sprachverstehen im Störgeräusch belegen, nicht mit geringeren EA-Werten und damit vergleichbaren Bewertungen mit Normalhörenden einher.

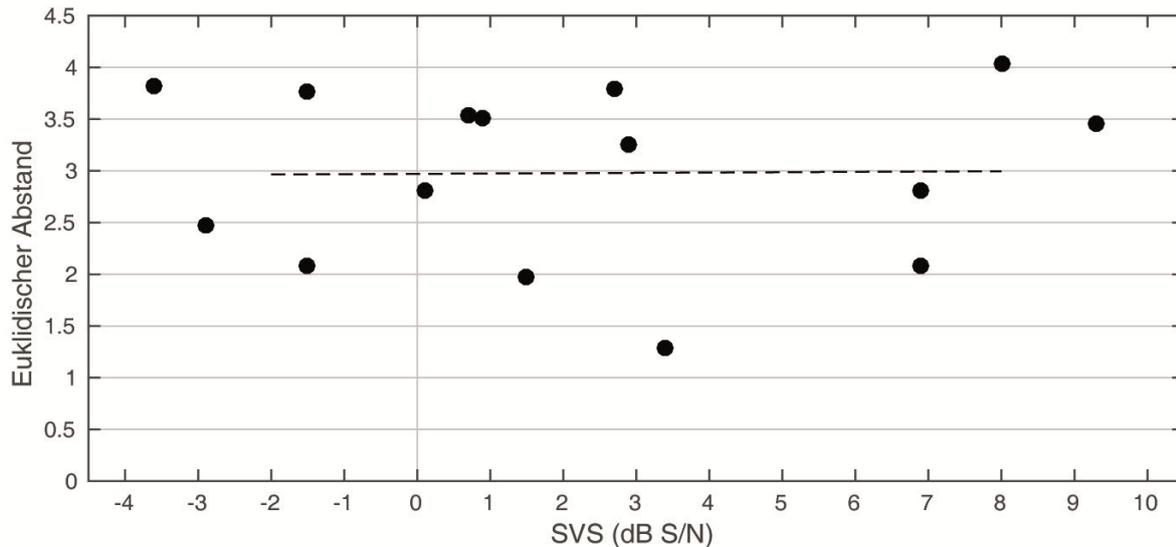


Abb. 14: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit des Sprachverstehens im Störgeräusch

Die Ergebnisse wurden mit der nichtparametrischen Korrelation nach Spearman auf Signifikanz getestet. Dabei konnte kein signifikanter Zusammenhang des Euklidischen Abstands mit der Sprachverstehensschwelle im OLSA nachgewiesen werden ($r_s(15) = -0,093$ $p > 0,05$). Offenbar lagen Probanden mit einem besseren Sprachverstehen im Störgeräusch in ihrer Beurteilung des harmonischen Klanges der Akkorde nicht näher am Median als CI-Nutzer mit schlechterem Sprachverstehen. Die Differenzen lassen sich somit nicht mit den Fähigkeiten des Sprachverstehens erklären.

Um zu untersuchen, ob die fehlende Korrelation eventuell auf eine große Streuung der Einzelergebnisse zurückzuführen ist, wurden die CI-Nutzer alternativ am Median der Sprachverstehensschwelle in eine bessere und eine schlechtere Gruppe eingeteilt. Es zeigte sich, dass die Probanden der besseren Gruppe im Mittel weiter von den Ergebnissen der Normalhörenden abwichen. Im Mann-Whitney-Test war diese Differenz jedoch nicht signifikant ($U = 22,0$ p (zweiseitig) = $0,487$). Es gibt somit keine Abhängigkeit der Bewertung vom Sprachverstehen.

Musikerleben

Ebenso stellte sich die Frage, ob CI-Nutzer mit einem höheren Score im Musik-Fragebogen zu Normalhörenden ähnlichere Ergebnisse erreichen.

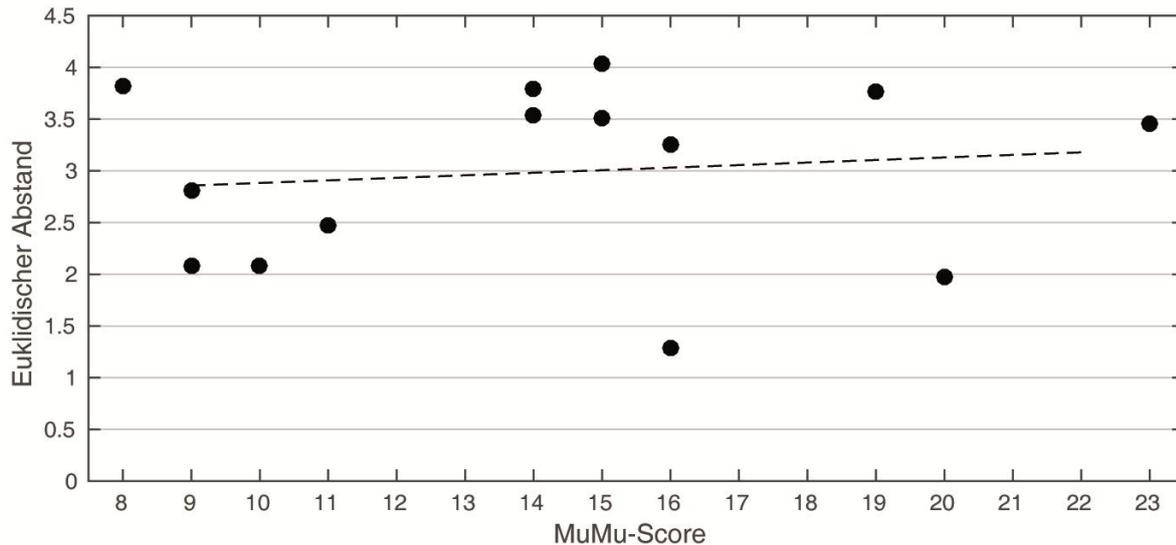


Abb. 15: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit der MuMu-Scores

Dazu wurde der Zusammenhang des obigen Euklidischen Abstands mit dem MuMu-Score untersucht (Abb. 15). In einer nichtparametrischen Korrelation fand sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem MuMu-Score und dem Euklidischen Abstand. CI-Nutzer mit einem niedrigen MuMu-Score bewerteten die Akkorde nicht nachweisbar anders zu Normalhörenden als solche mit einem höheren Score $r_s(15) = -0,064$ $p > 0,05$. Wiederum wurden die CI-Nutzer am Median des MuMu-Scores in eine Gruppe mit niedrigem und eine mit hohem Score eingeteilt. Im Mann-Whitney-Test lag der EA in der Gruppe der CI-Nutzer mit hohen Werten im MuMu-Score nicht signifikant niedriger als die Probanden der weniger interessierten und erfahreneren Gruppe ($U = 19,0$ p (zweiseitig) = $0,297$). Auch das Musikerleben beeinflusst die Bewertung der Akkorde somit nicht.

Kodierungsstrategie

Als letzter Faktor könnte bei CI-Nutzer die Kodierungsstrategie (FSP oder FS4) zu einer unterschiedlichen Wahrnehmung führen. Die Euklidischen Abstände sind nach Kodierungsstrategie geordnet in der Abbildung 16 dargestellt und zeigen, dass die Resultate der FSP-Anwender zwischen 1,29 Punkten (CI02) und 4,04 Punkten (CI10) lagen und einen Mittelwert von 2,72 (SD 0,9) aufwiesen. Dabei wurden die vier besten Ergebnisse von FSP-Anwendern erreicht. Im Gegensatz dazu erreichten die FS4-Anwender EAs zwischen 2,47 Punkten (CI04) und 3,82 Punkten (CI09), Mittelwert 3,4 Punkte (SD 0,58 Punkte).

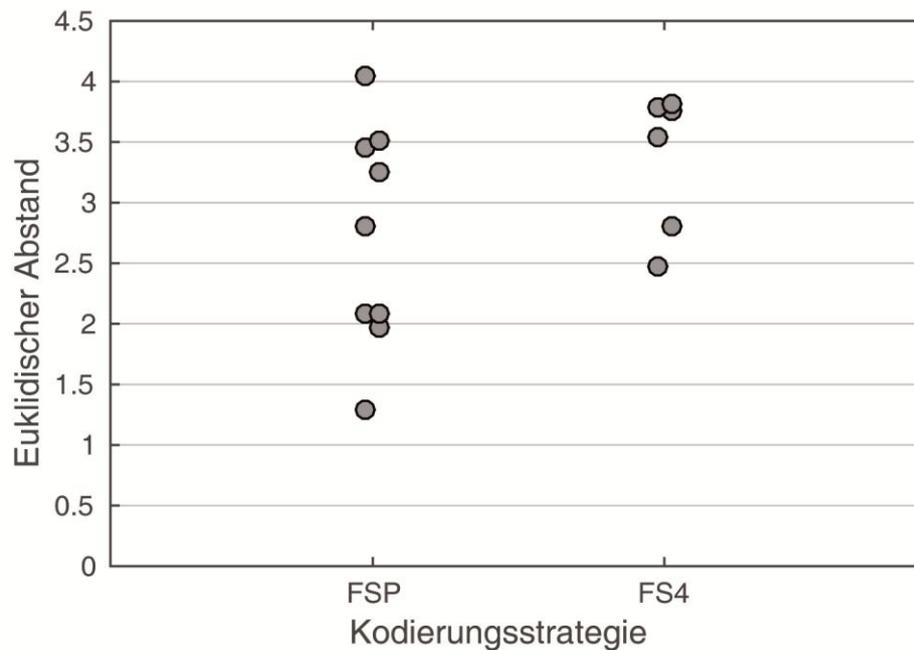


Abb. 16: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit der Kodierungsstrategie

Im Mann-Whitney-Test ergab sich keine signifikante Differenz zwischen der Kodierungsstrategie und den Ergebnissen im Paarvergleich von Akkorden. Somit konnte kein Einfluss der Kodierung auf die Beurteilung der Akkorde in ihrem harmonischen Klang nachgewiesen werden ($U = 13,5$ p (zweiseitig) = 0,111).

3.4 Kadenztest

Im zweiten psychoakustischen Experiment wurde die Wahrnehmung der harmonischen Syntax überprüft. Dabei urteilten die Probanden nach Darbietung einer sequentiellen Akkordfolge über deren harmonischen Abschluss. In der Hälfte der Darbietungen handelte es sich um eine perfekte Kadenz, bei der anderen wurde der Schlussakkord durch einen transponierten Durakkord (Bedingung 1) oder einen dissonanten Akkord (Bedingung 2) ersetzt und führte damit zu einem nicht-schlüssigen Höreindruck.

3.4.1 Ergebnisse der Probandengruppen im Vergleich

Normalhörende Probanden

In der Abbildung 17 und 18 sind die Treffer- und Falsch-Alarmraten der einzelnen NH- Probanden zu sehen. Die insgesamt hohen Trefferraten der Normalhörenden in beiden Bedingungen zeigen, dass sie sicher in der Lage waren in einer Harmoniefolge einen richtigen Schlussakkord zu erkennen. Die Falsch-Alarmraten, also die Darbietungen, in

denen ein inkorrektter Schlussakkord am Ende der Kadenzfolge fälschlicherweise als schlüssig bezeichnet wurde, waren dementsprechend sehr gering. Probanden ohne Hörbeeinträchtigung bewältigten diese Aufgabe insgesamt sehr gut.

Die Resultate eines Teilnehmers (NH10) zeigten, dass er die Aufgabe anscheinend nicht verstanden hatte, weswegen seine Ergebnisse bei der weiteren Analyse der Daten ausgeschlossen wurden.

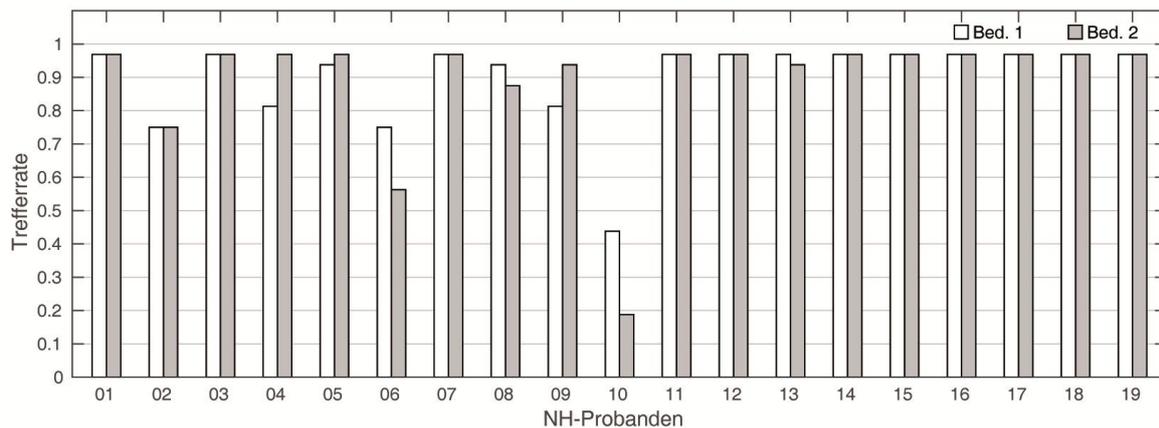


Abb. 17: Trefferaten der Normalhörenden in Bedingung 1 und 2

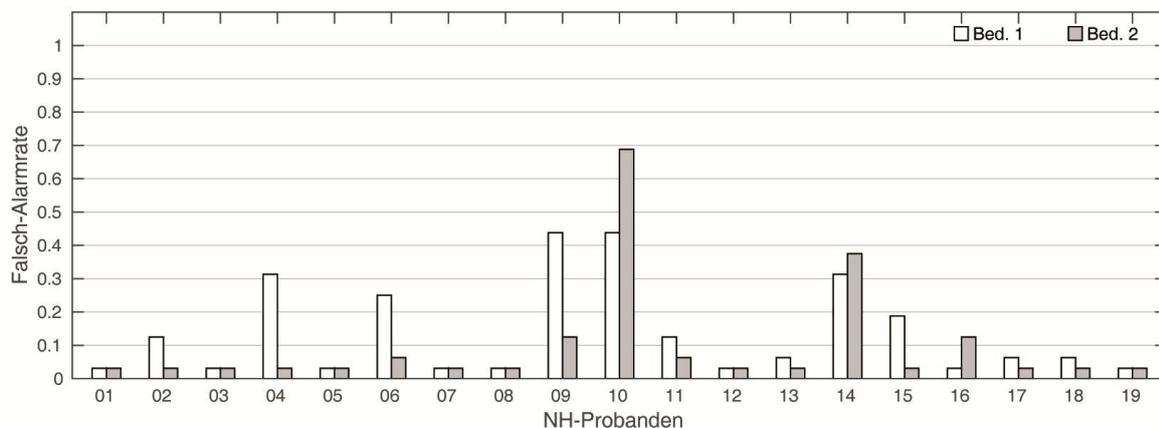


Abb. 18: Falsch-Alarmraten der Normalhörenden in Bedingung 1 und 2

Um die Unterscheidungsleistung einzelner Probanden einzuschätzen, wurde aus den Treffer- und Falsch-Alarmraten der Sensitivitätsindex (siehe Kap. 2) bestimmt. Bei einem Sensitivitätsindex $d' > 1,5$ wurde von einer Fähigkeit zur Einordnung des Abschlusses ausgegangen. In der Abbildung 19 sind die Sensitivitätsindizes der Normalhörenden dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die meisten Probanden einen Sensitivitätsindex $d' > 1,5$ erreichen.

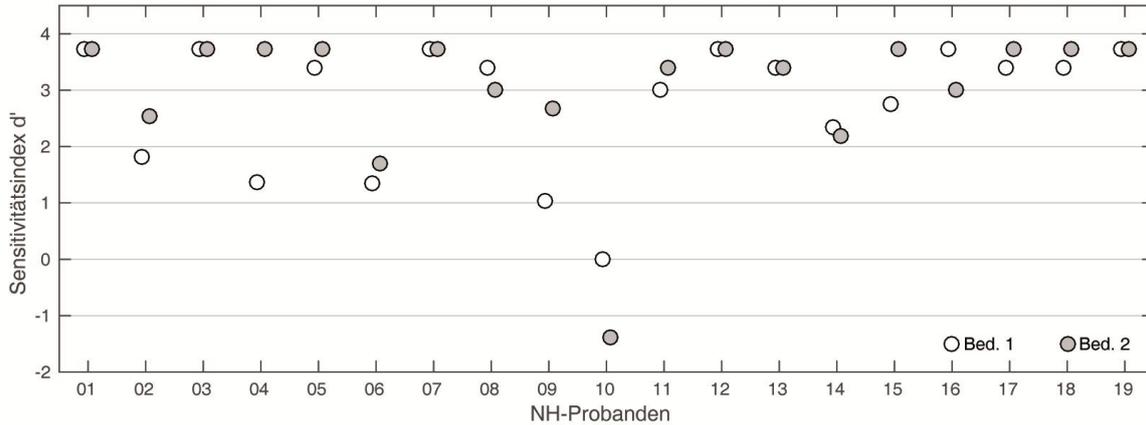


Abb. 19: Sensitivitätsindizes der Normalhörenden

Cochlea-Implantat-Nutzer

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen die Treffer- und Falsch-Alarmraten der CI-Nutzer. Im Gegensatz zu den Normalhörenden war die Fähigkeit in einer Harmoniefolge einen falschen Schlussakkord herauszuhören und einen richtigen zu erkennen bei den CI-Nutzern deutlich reduziert. Die Ergebnisse lagen nahe dem Rateniveau von 0,5. Die Versuchsteilnehmer erreichten kaum höhere Treffer- als Falsch-Alarmraten. Eine Ausnahme bildete CI04. Dieser Proband erreichte in Bedingung 1 nahezu optimale Treffer- und Falsch-Alarmraten. Bedingung 2 wurde nur geringfügig schlechter absolviert.

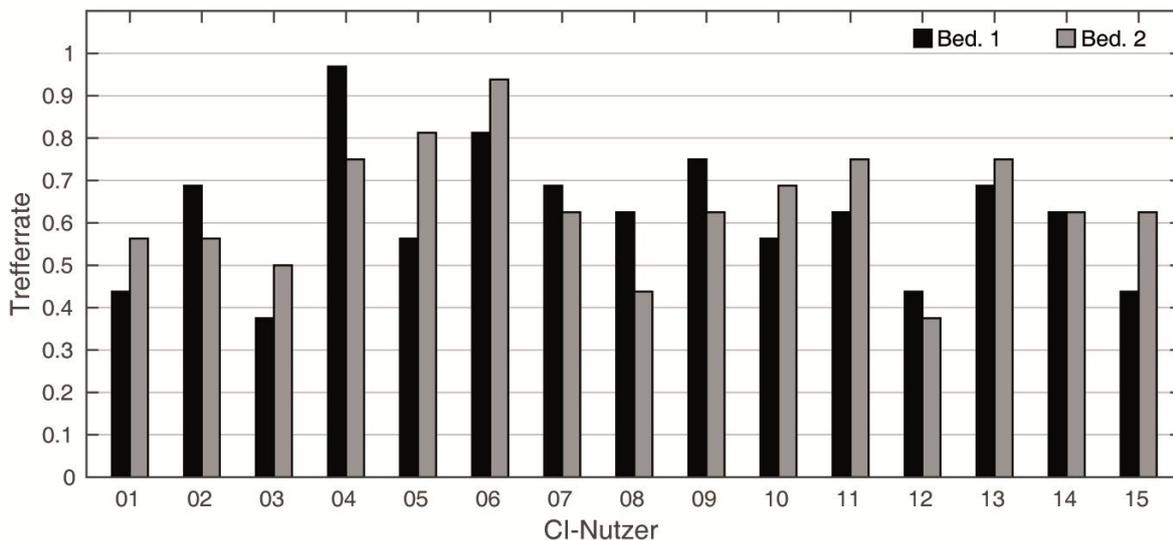


Abb. 20: Trefferraten der CI-Nutzer

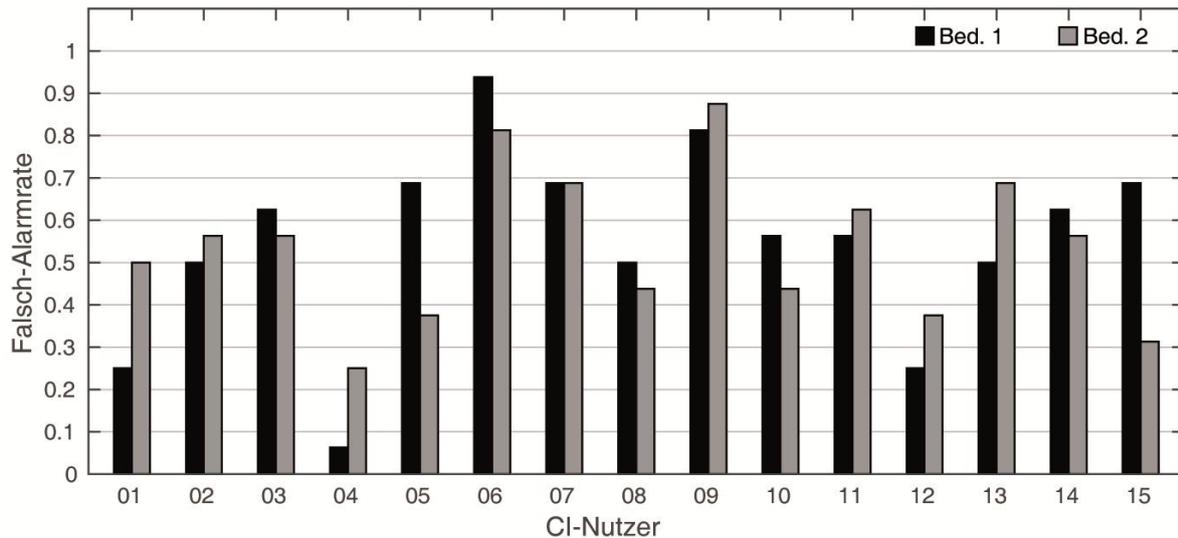


Abb. 21: Falsch-Alarmraten der CI-Nutzer

Die Abbildung 22 zeigt die Sensitivitätsindizes der CI-Nutzer. Nur ein Proband erreichte in beiden Bedingungen einen Sensitivitätsindex $d' > 1$ (CI04), ein weiterer in Bedingung 2. Die anderen CI-Nutzer bewältigten diese Aufgabe nicht.

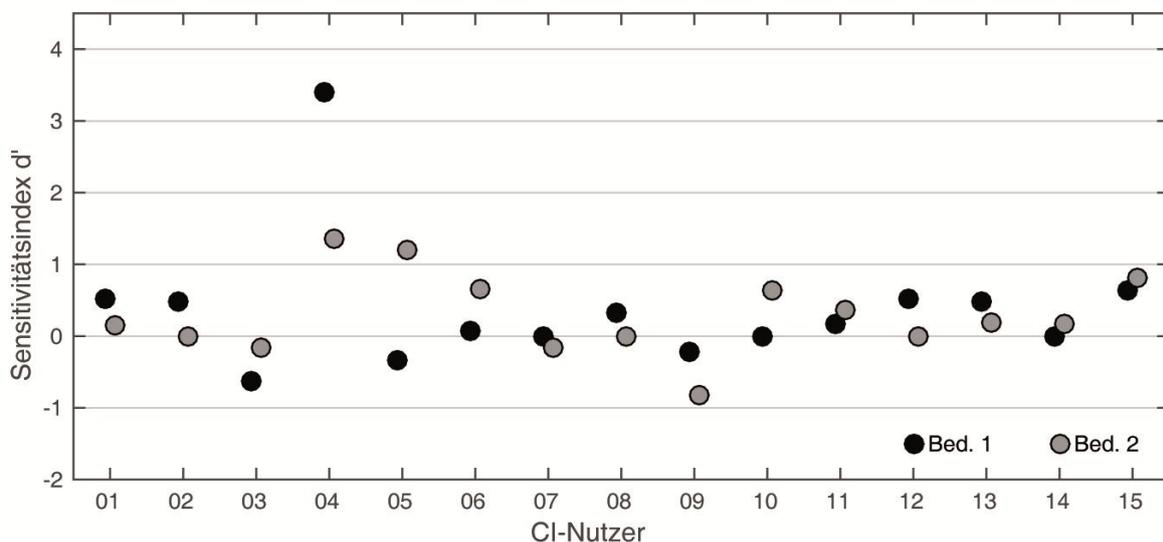


Abb. 22: Sensitivitätsindizes CI-Nutzer

In einer Varianzanalyse mit den zwei Faktoren Gruppe und Bedingung zeigten beide Gruppen keinen signifikant verschiedenen Sensitivitätsindex: $F(1) = 1,952$ $p > 0,05$. Die Probandengruppe hatte einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse: $F(1) = 143,2$ $p < 0,001$ (Tests der Zwischensubjekteffekte) und Normalhörende lösten diese Aufgabe sicherer als CI-Nutzer. Das belegen auch die Mittelwerte der Probandengruppen.

Wie in der Tab. 5 dargestellt, erreichten Normalhörende in beiden Untersuchungsbedingungen bessere Ergebnisse als CI-Nutzer. Dabei wurde Bedingung 2 tendenziell noch sicherer gelöst.

	NH-Probanden	CI-Nutzer
Mittelwert Bedingung 1	$d'_1 = 2,95$ (SD 0,94)	$d'_1 = 0,2$ (SD 1,0)
Mittelwert Bedingung 2	$d'_2 = 3,29$ (SD 0,63)	$d'_2 = 0,3$ (SD 0,6)

Tab. 5: Mittelwerte der Sensitivitätsindizes für Bedingung 1 und 2 beider Probandengruppen

Die Probanden der Vergleichsgruppe empfanden die Bedingung 2 subjektiv als leichter zu bewältigen. Ein signifikanter Unterschied der beiden Bedingungen lag nicht vor wie die Ergebnisse des T-Tests für gepaarte Stichproben mit dem Faktor Bedingung zeigen: $t(17) = -2,0$ $p > 0,05$. Die Ergebnisse der Normalhörenden waren in keiner Bedingung nachweisbar besser oder schlechter.

Bei der Gruppe der CI-Nutzer stellte sich ebenso wie bei den Normalhörenden im T-Test für gepaarte Stichproben kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen zwischen den Bedingungen dar ($t(14) = -0,3$ $p > 0,05$). CI-Nutzer lösten diese Aufgabe unabhängig davon, ob es sich bei dem Schlussakkord um einen um 1–2 Halbtöne nach oben oder unten verschobenen Durakkord, einen verminderten oder übermäßigen Akkord handelte, nur mit großen Schwierigkeiten.

3.4.2 Einflussfaktoren auf das Erkennen eines harmonischen Abschlusses

Die Ergebnisse des Kadenztests zeigten, dass nur ein CI-Nutzer (CI04) in beiden und ein weiterer (CI05) zumindest in Bedingung 2 die Fähigkeit besaßen, den Abschluss einer musikalischen Phrase richtig einzuordnen. Welche Faktoren zu diesen guten Leistungen geführt haben könnten, wurde nachgehend untersucht.

Sprachverstehen im Störgeräusch

Der beste CI-Nutzer (CI04) wies mit -2,9 dB die zweitbeste Sprachverstehensschwelle im OLSA auf. Der Proband CI05 lag mit 1,5 dB im Mittelfeld.

Musikerleben

Es ist davon auszugehen, dass Probanden mit einem ausgeprägterem Musikerleben einen harmonischen Abschluss einer Kadenz sicherer identifizieren. Dazu wurden die Ergebnisse des Kadenztest und des MuMu-Fragebogens herangezogen.

Die in Abbildung 23 dargestellten Sensitivitätsindizes der Normalhörenden in Abhängigkeit des MuMu-Scores lassen auf den ersten Blick vermuten, dass Teilnehmer mit einem

ausgeprägteren Musikerleben bessere Ergebnisse erreichen, da die Teilnehmer mit sehr hohen MuMu-Scores (> 20 Punkte) fast ausschließlich Sensitivitätsindizes über 3 erreichen.

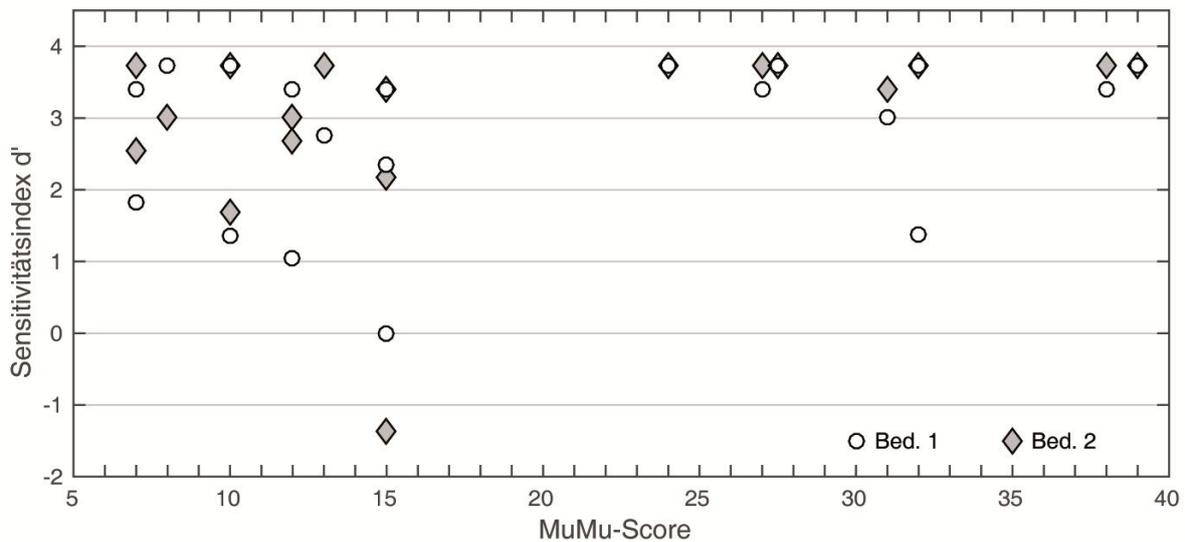


Abb. 23: Sensitivitätsindizes der Normalhörenden in Abhängigkeit der MuMu-Scores

Die Untersuchung auf Signifikanz mit der nichtparametrischen Korrelation nach Spearman konnte diesen Eindruck für Bedingung 1 nicht belegen ($r_s(19) = 0,223$ $p > 0,05$). Die Auswertung der Ergebnisse von Bedingung 2 zeigte einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Musikerleben und den Leistungen der Normalhörenden ($r_s(19) = 0,366$ $p < 0,05$). In der Abbildung 15 (3.2.2) sind die MuMu-Scores der CI-Nutzer aufgetragen. Die beiden guten Probanden erreichten einen mit 11 Punkten durchschnittlichen (CI04) und mit 20 Punkten (CI05) einen sehr guten Score.

Kodierungsstrategie der Implantate

FS4-Anwender erreichten in Bedingung 1 mit einem Mittelwert von 0,7245 (SD 1,35) bessere Ergebnisse als FSP-Anwender (MW 0,12 SD 0,4). In Bedingung 2 war der Unterscheid noch geringer: Die FSP-Anwender wiesen einen Mittelwert von 0,34 (SD 0,43), FS4-Anwender einen Mittelwert von 0,22 (SD 0,77) auf. Eine statistische Untersuchung des Effekts war auch hier nicht sinnvoll, jedoch verwendeten die Probanden CI04 und CI05 beide die modernere Strategie FS4.

4. Diskussion

4.1 Oldenburger Satztest

In mehreren Studien konnte nachgewiesen werden, dass CI-Nutzer bei der Musikperzeption von einem guten Sprachverstehen im Störgeräusch profitieren (Gfeller et al., 2008; Won et al., 2010). Es zeigte sich ein positiver Zusammenhang des Sprachverstehens mit der Timbreperzeption (Gfeller et al., 2008; Won et al., 2010) sowie der Tonhöhendiskrimination und Melodieerkennung (Won et al., 2010).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde mit den teilnehmenden CI-Nutzern der Oldenburger Satztest (Wagener, Brand und Kollmeier, 1999) durchgeführt. Dabei wurde die Sprachverstehensschwelle mit Hilfe des kritischen Signal-Rauschverhältnisses, bei dem der Proband ein Sprachverständnis von 50% aufweist, bestimmt. Für Normalhörende liegt diese Grenze bei -7,1 dB SNR (SD 1,1 dB) (HörTech gGmbH, 2011). Untersuchungen mit CI-Nutzern zeigten einen Median unter 0 dB (Müller-Deile, 2009), den die Autoren selbst jedoch als auffallend niedrig bewerteten und mit einem hohen Trainingseffekt dieses Tests begründeten. Mit einem Mittelwert von 2,5 dB (SD 4,02 dB) wiesen die CI-Nutzer der vorliegenden Studie ein insgesamt durchschnittlich gutes Sprachverstehen auf, was sich auch im klinischen Alltag widerspiegelt. Der CI-Nutzer mit dem besten Sprachverstehen von -3,6 dB (CI09) lag oberhalb der Durchschnittswerte Normalhörender.

4.2 Münchener Musikfragebogen

Ein in der Literatur häufig untersuchter Einfluss bei CI-Nutzern ist der „musician effect“, die Ausprägung des Musikerlebens auf die Musikperzeption. So profitierten normalhörende Musiker in Klangsimulationen der Signalverarbeitung eines CIs von ihrer ausgebildeteren Fähigkeit zur Tonhöhenwahrnehmung und erlangten in Aufgaben zur Melodieerkennung bessere Ergebnisse (Fuller et al., 2014). Ein positiver Einfluss des Musikerlebens auf andere auf der Tonhöhenwahrnehmung basierende Parameter ist somit durchaus denkbar. Zudem konnte in MRT-Studien gezeigt werden, dass Musiker komplexe akustische Informationen aufgrund ihrer ausgebildeteren kognitiven Verarbeitungsprozesse im Arbeitsgedächtnis und der auditorischen Aufmerksamkeit anders verarbeiteten (Besson, Chobert und Marie, 2011). Um den Einfluss des „musician effects“ auf die Harmoniewahrnehmung zu untersuchen, wurde in der vorliegenden Studie eine möglichst vielseitige Selektion von Aspekten aus dem Münchener Musikfragebogen, die das Musikerleben beider Probandengruppen bestimmte, vorgenommen. Die normalhörenden Teilnehmer der vorliegenden Studie erreichten hierbei im Mittel ein geringfügig höheres Ergebnis als die CI-Nutzer (MuMu-Score CI 13,87; NH 19,71). Die hier nicht dargestellte Auswertung präferierter Musikstile lag bei beiden Probandengruppen zugunsten von Pop, Rock und Klassik. Zu den weniger bevorzugten Musikstilen zählten Jazz/Blues, Volksmusik und religiöse Musik. Während die Gruppe der CI-

Nutzer insgesamt wenig musikalisch war, wurde die heterogene Verteilung der Musikalität von Normalhörenden durch das Vorhandensein musikalischen Unterrichts geprägt. In der Vergleichsgruppe erhielten acht Probanden musikalischen Unterricht. Zudem ging eine lange, über drei Jahre andauernde Teilnahme am Unterricht auch mit einem insgesamt größeren Stellenwert der Musik im Leben dieser Probanden einher.

CI-Nutzer im Kindesalter nehmen im gleichen Ausmaß an der Musik teil wie Normalhörende (Olszewski et al., 2005). Erst, wenn es um Aktivitäten höheren Anspruches geht, wie eine exakte Wahrnehmung von Tonhöhenunterschieden um Sänger eines Chores zu sein oder ein Instrument zu erlernen, weisen sie eine reduzierte Teilnahme an derartigen Aktivitäten auf. Die Teilnehmer der vorliegenden Studie hatten aufgrund ihres im Kindesalter weitgehend normalen Gehörs einen uneingeschränkten Zugang zu solchen Aktivitäten und damit die Möglichkeit, bestimmte Regeln der Musik und insbesondere der Harmonielehre kennen zu lernen. Zumindest auf die Fähigkeit der Melodieerkennung birgt diese Hörerfahrung postlingual ertaubter CI-Nutzer einen Vorteil gegenüber prälingual ertaubten CI-Nutzern (Olszewski et al., 2005). Im vorliegenden MuMu-Score spiegelten sich dennoch reduzierte Aktivitäten mit Gesang und Instrumenten nach der Implantation wider und führten zu einer Differenz zwischen den beiden Gruppen. Ein solches Verhalten steht im Einklang mit Untersuchungen, in denen gezeigt werden konnte, dass Erwachsene nach der CI-Implantation ein reduziertes Interesse an Musik aufwiesen (Gfeller, Christ et al., 2000). Somit könnte die größere Bedeutung von Musik einen Teil der unterschiedlichen Ergebnisse von CI-Nutzern und Normalhörenden in Hinblick auf die Harmonieperzeption erklären.

4.3 Paarvergleich von Akkorden

Gemäß der Harmonielehre (Amon, 2015) sind der Dur- und der Moll-Akkord konsonante Akkorde, die anderen in der vorliegenden Studie verwendeten vier dissonante Akkorde. In Studien zur Präferenz zeigte sich ein entsprechendes Muster: Dur > Moll > Verminderter Akkord > Übermäßiger Akkord (Johnson-Laird, Kang und Leong, 2012; Roberts, 1986). Die Konsonanz des Akkords mit einem Quartvorhalt wurde ähnlich beurteilt wie die des Mollakkords (Johnson-Laird, Kang und Leong, 2012). Für die vorliegende Studie wurde daher erwartet, dass die normalhörenden Teilnehmer konsonante Akkorde gegenüber den dissonanten bevorzugen und CI-Nutzer davon abweichende Präferenzen aufweisen würden. Die Ergebnisse zeigen, dass Normalhörende erwartungsgemäß Dur und Moll als die Akkorde mit dem konsonantesten Klangcharakter betrachteten, während sie weniger konsonante Harmonien wie den verminderten und übermäßigen Akkord als weniger angenehm wahrnahmen.

An der Bewertungsverteilung der CI-Nutzer wird deutlich, dass sie ähnlich wie Normalhörende den Durakkord als konsonanter als die anderen Akkordtypen bewerteten.

Eine signifikante Abweichung zeigte die Bewertung des Mollakkords. Während die Normalhörenden der vorliegenden Studie den Klangcharakter dieses Akkords wie in anderen Studien (Johnson-Laird, Kang und Leong, 2012; Roberts, 1986) als konsonant betrachteten, beurteilten die CI-Nutzer ihn als wenig harmonisch. Der zum Vergleich der CI-Nutzer mit dem Median der Normalhörenden herangezogene Euklidische Abstand zeigte interindividuelle Unterschiede, lag im Mittel der CI-Nutzer (2,98 SD 0,84) aber nicht weit von dem normalhörender Probanden entfernt.

In der Literatur finden sich bisher nur wenige Untersuchungen zur Harmoniewahrnehmung mit dem Cochlea-Implantat (Brockmeier et al., 2011; Bruns, Mürbe und Hahne, 2016; Kunkel, 2014; Pflug, 2010). In der Studie von Kunkel (Kunkel, 2014) wählten die Probanden von einem Dur- oder Mollakkord und einem Akkord, von dem zwei Töne um einen Halbton verschoben wurden den harmonischeren. Die Probandengruppe der CI-Nutzer agierte im Mittelwert nur 6% über dem Zufallsniveau. Dennoch zeigte die Spanne von 36,7–83,3% richtiger Antworten, dass es einzelne Probanden gab, die die Konsonanz von Akkorden beurteilen konnten. Bewertungen der Dissonanz von Akkorden im Rahmen des Mu.S.I.C Perception Tests zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen CI-Nutzern und Normalhörenden (Brockmeier et al., 2011). Diese Ergebnisse wurden bei prälingual ertaubten Kindern bestätigt (Stabej et al., 2012). Mit Ausnahme der niedrigen Bewertung des Moll-Akkords sind die vorliegenden Ergebnisse damit vereinbar: Beide Probandengruppen bevorzugen den gleichen Akkord (Dur) und nehmen dissonante Akkorde als weniger harmonisch wahr. CI-Nutzer beurteilen den Klangcharakter von Akkorden ähnlich wie Normalhörende.

Eine grundlegende Voraussetzung zur Bewältigung des Paarvergleichs ist die Akkorddiskrimination: Nur wenn der Hörer die Harmonien unterschiedlich wahrnimmt, kann er diese in Bezug auf ihre Konsonanz beurteilen. Ein Großteil (>2/3) der CI-Nutzer war in der Diskriminationsaufgabe des Mu.S.I.C. Perception Tests durchaus in der Lage, Harmonien zu unterscheiden (Brockmeier et al., 2010; Pflug, 2010). Auch wenn dies nicht untersucht wurde, implizieren die Ergebnisse der vorliegenden Studie, dass CI-Nutzer zumindest den Durakkord von den anderen unterscheiden konnten. Der Akkorddiskrimination liegt die Fähigkeit zur Erfassung kleiner Tonhöhenunterschiede zu Grunde, da schon die Verschiebung eines einzigen Tones um einen Halbton von einem konsonanten zu einem dissonanten Klangeindruck führen kann (s.Kap.1.5). Obwohl große interindividuelle Unterschiede herrschen, sind einige CI-Nutzer durchaus in der Lage, Tonabstände von einem Halbton wahrzunehmen (Gfeller et al., 2007), jedoch liegt der durchschnittliche Diskriminationsumfang mit ungefähr drei Halbtönen sowohl für Sinustöne im Freifeld (Pretorius und Hanekom, 2008) als auch für synthetische Klaviertöne (Kang et al., 2009) höher. Die entscheidenden Tonabstände in der vorliegenden Studie, die einen konsonanten

oder dissonanten Klangeindruck eines Akkords bewirken, lagen zwischen einem und zwei Halbtonschritten (s.Kap.1.5). Allerdings handelte es sich bei den dargebotenen Klangbeispielen dieser Studie nicht nur um zwei aufeinanderfolgende in der Tonhöhe differierende Töne – ein Akkord bestand aus vier harmonischen Tonkomplexen. Somit stellt das verwendete Testmaterial einen komplexen akustischen Stimulus dar: den Tonkomplex an sich, der aus mehreren Teiltönen besteht. Von diesen Tonkomplexen erklingen mehrere gleichzeitig und bilden den Akkord. Im direkten Vergleich führten komplexe akustische Stimuli in allen Frequenzbereichen zu einer schlechteren Melodiediskrimination als Sinustöne (Singh, Kong und Zeng, 2009). Jedoch wurde vorliegend im Unterschied zu den obigen Studien (Brockmeier, 2011; Pflug, 2010) anstatt auf komplexe Klaviertöne auf synthetische harmonische Tonkomplexe zurückgegriffen, welche nicht abklingen und daher von CI-Nutzern besser wahrgenommen werden könnten. So zeigte sich, dass die Melodieidentifikation bei einer Auswahl verschiedener Instrumente (Galvin, Fu und Oba, 2008) und die Tonhöhendiskrimination (Haumann et al., 2007) mit Klavierklängen eine große Herausforderung für CI-Nutzer darstellt und die Ergebnisse im Vergleich zur Darbietung mit anderen Instrumenten schlechter waren. Daher dürften CI-Nutzer in den vorliegend durchgeführten Tests von der Anwendung synthetischer Tonkomplexe profitiert haben.

Die Empfindung von Konsonanz könnte bei einem Cochlea-Implantat schließlich dadurch beeinflusst werden, dass die einzelnen Teiltöne eines Tones in ein gemeinsames Band fallen und dort durch Schwebung eine unangenehme Empfindung generieren. So könnte es sein, dass Akkorde, deren Grundfrequenzen der einzelnen Akkordtöne weiter auseinander liegen, harmonischer beurteilt werden. Um diesen Aspekt zu beurteilen, wäre eine Untersuchung der Beziehung aller fünf Komponenten der vier Akkordtöne zu den unterschiedlichen Frequenzmaps der CI-Nutzer notwendig, auf deren Darstellung jedoch aufgrund des eingeschränkten Umfangs dieser Arbeit verzichtet wird.

Trotz dieser Hürden auf Seiten der CI-Nutzer beurteilten beide Probandengruppen den Durakkord als die konsonanteste Harmonie. Inwieweit er in seiner Funktion als Abschluss einer Harmoniefolge erkannt wird, soll im Folgenden diskutiert werden.

4.4 Kadenztest

Der Eindruck einer harmonischen Vollendung entsteht durch die Rückkehr der Musik zum harmonischen Zentrum, der Tonika (Meyer, 1956). Die Wahrnehmung einer solchen Vollendung stand im Zentrum des zweiten Experiments, dem Kadenztest.

Die Normalhörenden der vorliegenden Studie waren in ihrer Gesamtheit ohne Schwierigkeiten in der Lage sind, das Ende einer Harmoniefolge korrekt einzuordnen. So erreichten alle Probanden dieser Gruppe bis auf drei in Bedingung 1 in beiden Bedingungen Sensitivitätsindizes $> 1,5$ und konnten diese Aufgabe damit bewältigen. CI-Nutzer erlangten

in dem Test weitaus schlechtere Ergebnisse. Der Großteil von ihnen arbeitete auf Rateniveau, unabhängig davon, ob es sich bei den falschen Schlussakkorden um einen verschobenen Durakkord (Bedingung 1) oder einen verminderten bzw. übermäßigen Akkord (Bedingung 2) handelte. Der Proband (CI04) bewältigte die Aufgabe in Bedingung 1 (verschobener Akkord) mit einem Sensitivitätsindex von $d_1' = 3,4$ sicher, in Bedingung 2 (dissonanter Akkord) lag er mit $d_2' = 1,35$ deutlich über dem Durchschnitt der CI-Probanden ($d_2' = 0,3$). Damit war er als einziger CI-Proband in der Lage zu entscheiden, ob eine Akkordsequenz harmonisch befriedigend oder unbefriedigend endete. Der Proband CI05 erreichte zumindest in der zweiten Bedingung einen Sensitivitätsindex von $d_2' = 1,2$. Einzelnen CI-Nutzern ist es offenbar möglich, den harmonischen Schluss einer Kadenz einzuordnen, auch wenn dies eine Herausforderung für sie darstellt.

Es ist denkbar, dass einige Akkorde leichter als falscher Schlussakkord identifiziert werden können als andere. So könnte ein um zwei Töne verschobener Durakkord aufgrund der weiteren Abweichung von der Tonika mit weniger Schwierigkeiten detektiert werden als ein Akkord, der nur um einen Halbton verschoben wurde. In hier nicht dargestellten Post-hoc-Tests konnte jedoch für keine der Probandengruppen ein signifikanter Unterschied zwischen den Akkorden in den zwei Bedingungen nachgewiesen werden. In der Gruppe der Normalhörenden ist dieses Ergebnis durch den Ceiling-Effekt zu begründen: Sie waren in ihrer Gesamtheit so vertraut mit den harmonischen Konzepten, dass sie die Aufgabe unabhängig vom Ausmaß der Veränderung weitgehend fehlerfrei bewältigten. Für die CI-Nutzer hingegen stellte das Einordnen eine große Herausforderung dar. Im weiteren Verlauf werden die Ursachen dafür diskutiert.

In einer EEG-Studie mit Normalhörenden evozierte der dissonante Klang eines durch einen Halbton verschobenen Akkordes in einer Akkordfolge ein ereigniskorreliertes Potenzial, dessen Amplitude bei Musikern größer war als bei Nichtmusikern (Levett and Martin, 1992). In anderen Studien sollte in einer Folge von Harmonien die perfekte Kadenz (V-I) als ein konsonanter und die Beendigung mit der Quarte (I-IV) als ein abweichender Abschluss erkannt werden (Bigand et al., 1999, 2003; Bigand and Pineau, 1997). Diesen nahmen die normalhörenden Probanden mit und ohne Musikerfahrung als weniger abgeschlossenen wahr. Zudem benötigten sie mehr Zeit um eine Entscheidung zu treffen. Die vorliegenden Ergebnisse der normalhörenden Gruppe, die sicher zwischen korrekten und falschen Kadenzen unterschied, stehen im Einklang mit diesen.

Studien mit CI-Nutzern zeigten, dass auch sie unerwartete Akkorde in einer Harmoniesequenz registrieren (Koelsch et al., 2004). Dabei löste das Auftauchen eines irregulären Akkords eine ereigniskorrelierte Potentialkomponente aus, wenn auch weniger ausgeprägt als bei Normalhörenden. In der hier vorliegenden Studie waren die CI-Nutzer bis auf zwei Teilnehmer nicht in der Lage, eine solche Unterscheidung korrekter und falscher

Kadenzen zu treffen. Durch welche Faktoren lassen sich diese abweichenden Ergebnisse der CI-Nutzer erklären?

Reduzierte Tonhöhenunterscheidung als grundlegende Fähigkeit und Komplexität des akustischen Reizes

Wie auch für den Paarvergleich einzelner Akkorde ist für die Bewältigung des Kadenztests die Wahrnehmung kleiner Tonhöhenunterschiede essenziell, sodass diese reduzierte Fähigkeit der CI-Nutzer (Gfeller et al., 2002; Kang et al., 2009) die defizitären Ergebnisse zum Teil erklären könnte. Ein Großteil konnte selbst einfache Melodien wie „Happy Birthday“ nicht in ihrer Gesamtheit wahrnehmen (Gfeller et al., 2010). Dagegen gelang es Kindern zumindest unter Zuhilfenahme rhythmischer Hinweise Melodien auf normalhörendem Niveau korrekt zu identifizieren (Volkova et al., 2014). Ausgehend davon, dass Akkorde oftmals zur Begleitung von Melodien verwendet werden, stellen solche komplexen akustischen Informationen in realen Hörsituationen eine wahrscheinlich noch größere Herausforderung für CI-Nutzer dar. So verschlechterte sich bei ihnen im Vergleich zu Normalhörenden die Fähigkeit der Melodieerkennung nach Einsetzen eines weiteren Instruments, das einen konstanten Ton spielte, um mehr als 15% (Galvin, Fu und Oba, 2009). Je mehr Informationen verarbeitet werden müssen, desto schwieriger ist eine genaue Perzeption für CI-Nutzer.

Tendenz zu hohen Falsch-Alarmraten oder niedrigen Trefferraten

Möglichweise tendierte die Probandengruppe dazu, auch weniger konsonante Harmonien als Schlussakkord zu akzeptieren oder im Gegenteil, keinen der dargebotenen Akkorde als harmonischen Abschluss anzunehmen. Mit einem Blick auf die Grafiken 20 und 21 (s.Kap.3.4.1) lässt sich dieser Aspekt widerlegen. Sowohl bei den Treffer- als auch den Falsch-Alarmraten wurden durchschnittliche Werte erreicht, es lagen weder Tendenzen zu hohen Falsch-Alarmraten noch niedrige Trefferraten vor. Das spricht gegen die These, dass weniger konsonante Harmonien als abschlussbildend eingeschätzt oder im Gegenteil keiner der dargebotenen Akkorde als ein möglicher Abschluss in Betracht gezogen wurde.

Der Faktor Dissonanz und Zuhilfenahme weiterer Hinweise

Im ersten Experiment (s. 4.2 Paarvergleich) wurde gezeigt, dass die Gesamtheit der CI-Nutzer den Klangcharakter eines isoliert dargebotenen Akkords durchaus ähnlich zu den Normalhörenden beurteilte – der Durakkord wurde allen anderen vorgezogen. Stellte der dissonante Klang allein, also die sensorische Dissonanz, den entscheidenden Hinweis für einen falschen Schlussakkord dar? Wäre das der Fall, sollte insbesondere Bedingung 2 niedrige Falsch-Alarmraten und hohe Sensitivitätsindizes aufweisen, da ein der Grundtonart

fremder, dissonanter Akkord als falscher Schlussakkord leichter zu identifizieren sein sollte als ein in sich harmonischer Akkord. Die Ergebnisse des Probanden CI05 stützten diese Hypothese, wohingegen derer CI04s aufgrund höherer Sensitivitätsindizes und niedrigerer Falsch-Alarmraten in Bedingung 1 diese nicht bestätigten. Die Ergebnisse der anderen CI-Probanden ließen sich dafür nicht verwenden, weil die Kadenzten gar nicht diskriminiert wurden. Diese zwei Einzelfälle erlauben nicht den Schluss, dass der Faktor Dissonanz den alleinigen Hinweis zur Lösung dieser Aufgabe liefern kann. Bei der Darbietung realer Musik könnten CI-Nutzern von der Verwendung weiterer Hinweise profitieren. So können beispielsweise ein langsamer werdendes Tempo oder textliche Hinweise wie ein Satzende ein Phrasenende signalisieren. Dass das in Hinblick auf das Erkennen von Melodien funktioniert, wurde bereits nachgewiesen (Gfeller et al., 2012; McDermott, 2004). Es ist denkbar, dass CI-Nutzer von solchen Hinweisen in Bezug auf das Erkennen eines musikalischen Abschlusses ebenfalls profitieren können.

Neuronale Mechanismen und implizites Wissen

Können CI-Nutzer den Klangcharakter eines isoliert dargebotenen Akkords ohne Schwierigkeiten beurteilen, so stellt dessen Analyse in einer Folge von Harmonien, die horizontale Konsonanz, eine Aufgabe höheren neuronalen Anspruchs (Krumhansl 1990; Regnault, Bigand, and Besson 2001) dar. Dass ein Teilnehmer den Kadenztest bewältigte, zeigt, dass es mit einem Cochlea-Implantat durchaus möglich ist, korrekte Kadenzten zu erkennen. Diese Ergebnisse sind mit anderen Studien konform (Koelsch et al. 2004). Die von CI-Nutzern zur Verarbeitung musikalischer Information genutzten neuronalen Mechanismen sind auch nach der Implantation noch funktionsfähig. Das Ausmaß und die Qualität dieser Verarbeitung unterliegen jedoch individuellen Differenzen. Diese sind zum einen durch die auditorische Deprivation (s.Kap.4.6) und Unterschiede hinsichtlich des Musikerlebens bedingt (s.Kap.4.5.2).

Bei dem harmonischen Empfinden handelt es sich um eine implizite Fähigkeit, die sich unbeabsichtigt und ohne gezielte Übung entwickelt (Bharucha, 1987; Krumhansl, 1990; Tillmann, Bharucha und Bigand, 2000). Sie ist bereits bei sechs- und siebenjährigen Kindern ohne Musiktraining vorhanden, deren Entwicklung setzt sich aber bis mindestens zum 11.Lebensjahr fort (Schellenberg et al., 2005). Derartige Erfahrungen bezüglich des musikalischen Syntax' sind für den Kadenztest von besonderer Bedeutung. Die definierte Abfolge von Harmonien folgt gewissen Regeln und bewirkt innerhalb des Musikstückes einen Spannungsauf- und -abbau. Hörern, die die Akkorde nicht präzise wahrnehmen, bleibt dieser Effekt vorenthalten. In meinen Untersuchungen zeigte sich, dass normalhörende Nicht-Musiker den Schlussakkord einer Kadenz richtig einordnen konnten, während CI-Nutzer bei der Aufgabe deutliche Defizite aufwiesen. Die Teilnehmer meiner Studie waren postlingual

erlaubt, hatten somit zuvor implizites harmonisches Wissen auf akustischem Weg erworben. Dennoch ist es denkbar, dass einzelne Probanden einer zu kurzen Exposition des uneingeschränkten Hörens unterlagen um sich mit den standardisierten Harmoniemodellen vertraut zu machen (Schellenberg et al., 2005). Dagegen zeigten prälingual ertaubte Kinder durchaus zu Normalhörenden vergleichbare Leistungen in musikalischen Tests zur Melodieerkennung (Stabej et al., 2012). Mit Hilfe dieser Tests wurden die Mediane der Dissonanzbewertungen zwischen den beiden Probandengruppen verglichen. Somit erlaubten sie keine genauen Aussagen zur Beurteilung der verschiedenen Akkordtypen. Eine Durchführung unserer Messungen an Kindern und Jugendlichen könnte diese Ergebnisse überprüfen.

4.5 Untersuchung individueller Einflussfaktoren auf die Harmoniewahrnehmung

Im Folgenden werden die Zusammenhänge der Harmoniewahrnehmung mit dem Musikerleben und dem Sprachverständnis diskutiert. Des Weiteren wurde ein möglicher Zusammenhang zur Sprachkodierungsstrategie untersucht.

4.5.1 Sprachverständnis im Störgeräusch

Paarvergleich

Mit dem euklidischen Abstand konnte ein Zusammenhang zwischen einer ähnlicheren Akkordbewertung zu Normalhörenden und einem besserem Sprachverstehen der CI-Nutzer nicht nachgewiesen werden. Zwei CI-Probanden (CI04, CI13), die Akkorde in ihrer Harmonie ähnlich Normalhörender beurteilen, zeigten allerdings auch ein sehr gutes Sprachverständnis (SNR: CI04 -2,9 dB; CI13 -1,5 dB). Diese Probanden nahmen den Klangcharakter des Durakkords als sehr harmonisch wahr, gefolgt vom Mollakkord. Damit gleicht ihre Beurteilung derer Normalhörender. Abweichend von der Vergleichsgruppe beurteilte der Proband CI04, der in dem anderen Test besonders gut abschnitt, jedoch den dissonanten B5 als den Akkord höchster Konsonanz.

Kadenztest

Die beiden besten Probanden besaßen ein durchschnittliches (SNR CI05 1,59 dB) und ein sehr gutes (SNR CI04 -2,9 dB) Sprachverstehen. Möglicherweise profitierten sie von ihrer Fähigkeit, in einer Fülle akustischer Informationen wichtige Anteile herauszufiltern, das heißt in einer geräuschvollen Umgebung die Sprache und in unserem Experiment in einer Vielzahl von Tönen eventuell den oder die entscheidenden Anteile.

Ein gutes Sprachverständnis in Ruhe geht mit besseren Leistungen der Melodieerkennung einher (Olszewski et al., 2005). Ein gutes Sprachverstehen im Störgeräusch hat einen positiven Einfluss auf die Wahrnehmung komplexer Tonhöhen (Won et al., 2010) und die Wahrnehmung des Timbres (Gfeller et al., 2008). Insbesondere die letztgenannte Tatsache

könnte sich in meinen Experimenten widerspiegeln. Die Perzeption des Timbres eines musikalischen Tons erfordert die differenzierte Wahrnehmung eines Klangspektrums, bestehend aus einer Grundfrequenz, einzelnen Obertönen und Rauschteilen. Diese Komplexität des Aufbaus gleicht derer von Harmonien, die aus mehreren Tönen mit ihren Grundtönen bestehen.

4.5.2 Musikerleben

Paarvergleich

Es war kein Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Musikerlebens und den Ergebnissen des Paarvergleichs nachweisbar. CI-Probanden, die Akkorde in ihrer Harmonie ähnlich Normalhörender beurteilen (CI04, CI02, CI13), zeigten ein durchschnittlich ausgeprägtes Musikerleben.

Der Proband CI04 erreichte im Münchener Musikfragebogen einen Score von 11 Punkten und lag damit im unteren Drittel der Untersuchungsgruppe. Musik spielt in seinem Leben eine eher untergeordnete Rolle (5/10), in seiner Kindheit und zum Zeitpunkt der Untersuchung spielte er kein Instrument, Gesang wurde mit drei (von zehn möglichen) Punkten bewertet.

Kadenztest

In der vorliegenden Studie zeigten sich nur zwei CI-Nutzer (CI04, CI05) in der Lage die Aufgabe zu bewältigen. Sie wiesen mit 11 Punkten ein durchschnittliches (CI04) und mit 20 Punkten (CI05) ein ausgeprägtes Musikerleben auf.

Kunkel (Kunkel, 2004) verzeichnete keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Diskrimination harmonischer Akkorde mit der musikalischen Vorbildung, der Häufigkeit des Musik Hörens, dem Gefallen am Musik hören und der Tragedauer des Implantats. Brockmeier et al. (Brockmeier et al., 2010) konnten ebenso keinen Zusammenhang zwischen der Musikalität der Probanden und der Akkorddiskrimination und der Beurteilung der Dissonanz im Mu.S.I.C. Perception Test nachweisen. Bei den CI-Nutzern der vorliegenden Studie zeigte sich ein homogen niedriges ausgeprägtes Musikerleben, was zu den geringen Differenzen zwischen den Fertigkeiten der einzelnen Probanden in beiden Experimenten beigetragen haben könnte. Bei auf spektralen Informationen basierenden Aufgaben profitierten CI-Nutzer von einem musikalischen Training sowohl vor Eintreten der Ertaubung als auch nach der Implantation eines CIs (Gfeller et al., 2008). Insbesondere das Training nach der Implantation führte zu einer Verbesserung verschiedener Aspekte der Musikperzeption (Driscoll et al., 2009; Galvin, Fu und Nogaki, 2007; Gfeller et al., 2002; Gfeller et al., 2000). Die Probanden CI04 und CI05 hatten wie alle teilnehmenden CI-Nutzer der vorliegenden Studie vor der Implantation keinen Musikunterricht und auch danach kein gezieltes Training zur Musikwahrnehmung mit dem Implantat erhalten. Mit Hilfe von

Übungseinheiten und des wiederholten Untersuchens musikalischer Diskriminationsleistungen könnte ein solcher Einfluss überprüft werden. Die guten Leistungen der beiden Probanden sind durch das Musikerleben jedenfalls nicht erklärbar.

Während bei den Normalhörenden in Bedingung 1 kein Zusammenhang zum Musikerleben nachweisbar war, waren in Bedingung 2 musikalische Normalhörende besser in der Lage in einer Harmoniefolge einen richtigen Schlussakkord wahrzunehmen und einen falschen zu entdecken. Musikalische Probanden identifizierten auch einen dissonanten Schlussakkord signifikant leichter als einen transponierten. Normalhörende bewältigten diesen Test insgesamt sehr gut (Ceiling-Effekt) und insbesondere die Probanden mit einem ausgeprägten Musikerleben erreichten das Optimum. Während des Experiments berichteten die normalhörenden Teilnehmer, dass Bedingung 2 (verminderter oder übermäßiger Schlussakkord) subjektiv leichter zu bewältigen sei als Bedingung 1 (Dur-Akkord einer anderen Tonart). Es ist denkbar, dass musikalische Probanden aufgrund ihres Musikerlebens mit der Tonalität und den dazugehörigen Harmonien vertrauter sind. Musiker schneiden im Allgemeinen in auf Tonhöhenunterscheidung beruhenden Aufgaben besser ab als wenig Musikerfahrene (Fuller et al., 2014). In Hinblick auf meine Studie bleibt die Frage, was den entscheidenden Hinweis zur Erkennung eines abschließenden Akkords liefert. Basiert die Entscheidung auf Grundlage der horizontalen Konsonanz, also der Fähigkeit den Akkord innerhalb der Akkordfolge als den falschen zu erkennen oder wird der Klangcharakter des Akkords unabhängig vom Kontext als dissonant empfunden und damit aufgrund seiner vertikalen Konsonanz zugeordnet?

4.5.3 Kodierungsstrategie

Paarvergleich und Kadenztest

Es ist denkbar, dass die CI-Nutzer von zeitlicher Feinstrukturinformation profitierten, die in den hier verwendeten Kodierungsstrategien FSP und FS4 in unterschiedlicher Präzision implementiert ist. Die Feinkodierungsstrategien ermöglichen eine bessere Abbildung zeitlicher Informationen. Daher finden sie ihren Nutzen in herausfordernden Situationen wie der Wahrnehmung des Timbres (Heng et al., 2011) und der Sprache im Störgeräusch (Vermeire, Punte und Van De Heyning, 2010). Die neueren Kodierungsstrategien dienen der verbesserten Übertragung der zeitlichen Feinstruktur. Von dieser Tatsache sollten alle Versuchsteilnehmer profitiert haben. Die Pulse werden auf bis zu zwei (FSP) oder vier (FS4) Elektroden übertragen. Die Feinstruktur umfasst bei FSP den Bereich bis max. 300–500 Hz, bei FS4 bis 1kHz. Die in der vorliegenden Studie verwendeten Grundfrequenzen der vier Töne der jeweiligen Akkorde liegen zum Teil über 300 Hz. So betragen die Grundfrequenzen des Sus4 185 Hz, 370 Hz, 554 Hz und 988 Hz. Davon könnten FS4-Anwender wie der Proband CI04 profitiert haben.

Für die Akkorddiskrimination sehr niedriger Frequenzen mit natürlichen Instrumenten wurde gegenüber des Hörens ohne Feinstruktur ein leichter Vorteil gefunden (Boeckmann-Barthel et al., 2013). Untersuchungen zum Sprachverstehen im Störgeräusch zeigten keinen Unterschied zwischen FSP und FS4 (Riss et al., 2014). Der qualitative Klang von Popmusik wurde mit FSP etwas besser bewertet als mit FS4, während sich hinsichtlich der klassischen Musik keine Unterschiede zwischen den Kodierungsstrategien zeigten (Riss et al., 2014) Es liegen bisher keine Ergebnisse vor, die einen signifikanten Vorteil einer Kodierungsstrategie hinsichtlich der Musikperzeption belegen.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigten in keinem der Experimente einen Unterschied zwischen den Kodierungsstrategien FS4 und FSP. Somit kann die Kodierungsstrategie als alleiniger Faktor das gute Abschneiden des Probanden nicht erklären. In Bezug auf das zweite Experiment lässt sich dies immerhin durch die Tatsache begründen, dass es nur einen Probanden mit soliden Ergebnissen gab.

4.6 CI04 – ein Beispiel der Möglichkeiten

Der Proband CI04 wies unter der Verwendung von FS4 das zweitbeste Sprachverstehen und ein durchschnittliches Musikerleben auf. Mithilfe dieser Faktoren konnte nicht umfassend erklärt werden, warum nur dieser CI-Proband in der Lage war, den Kadenztest in beiden Bedingungen erfolgreich zu bewältigen. Zudem bewertete er Akkorde in ihrer Konsonanz ähnlich wie die Vergleichsgruppe. Welche weiteren Faktoren können seine Ergebnisse erklären?

Tragedauer des Implantats

Bei postlingual ertaubten CI-Nutzern ist auch 18–30 Monate nach der Implantation eine Verbesserung der Sprachwahrnehmung möglich, wobei die größten Verbesserungen innerhalb der ersten sechs Monate postoperativ zu verzeichnen sind (Tyler und Summerfield, 1996). Mit zunehmender Tragedauer des Implantats nimmt die Fähigkeit der Melodieerkennung zu (Gfeller et al., 2008). Der Proband CI04 wies allerdings die im Vergleich zu den anderen Studienteilnehmern kürzeste Tragedauer des Cochlea-Implantats auf. Zum Untersuchungszeitraum lag die Einsetzung 11 Monate zurück. Eine weitere Verbesserung seiner Leistungen ist denkbar. Auch nach einem Jahr kann es bei FSP-Nutzern noch einen Gewinn an Sprachverständlichkeit geben (Vermeire, Punte und Van De Heyning, 2010). Eine Wiederholung meiner Messreihen mit dem Probanden CI04 könnte einen Vergleich der Entwicklung der Musikwahrnehmung in Abhängigkeit der Tragedauer ermöglichen.

Anzahl aktiver Elektroden

Der Proband CI04 konnte unter Verwendung der maximalen Anzahl aktiver Elektroden auf optimale Voraussetzungen zurückgreifen. Mit zwölf aktiven Elektroden benutzte er damit bis zu zwei mehr als andere Probanden meiner Untersuchungen. Zumindest in höheren Frequenzbereichen kann ein Vorteil der Melodiewahrnehmung durch Erhöhung der Anzahl aktiver Elektroden erreicht werden (Singh, Kong und Zeng, 2009). Mit Frequenzen zwischen 147 Hz und 5545 Hz beanspruchten unsere Tests einen ausgedehnten Frequenzbereich, der jedoch von den Implantaten aller Probanden abgedeckt wurde (s.Kap.2.1.1) und die besseren Ergebnisse von CI04 nicht erklären kann.

Dauer der Ertaubung und Hörerfahrung vor der Ertaubung

Zu den Faktoren, die einen starken Einfluss auf das postoperative Outcome haben, zählen die Dauer und Schwere der Taubheit (Friedland, Venick und Niparko, 2003). Bereits die Dauer des moderaten Hörverlustes (definiert als Zeitpunkt an dem die Probanden einen Hörverlust bei Sinustönen von mehr als 40 dB aufweisen) korreliert negativ zum Sprachverständnis. Der durchschnittliche Sprachverständnisverlust postlingual Ertaubter, die nicht mit einem CI versorgt sind, liegt bei 0,23% pro Jahr (Lazard et al., 2012). Begründet liegt dies in der auditorischen Deprivation: Eine länger währende Taubheit führt zu anatomischen und funktionellen Veränderungen der am Hörvorgang beteiligten Strukturen (Shepherd et al., 2006) und zu einer Anpassung der kognitiven Verarbeitung (Lazard, Innes-Brown und Barone, 2014).

Der überwiegende Anteil der CI-Nutzer der vorliegenden Studie wies eine über Jahre progrediente Hörstörung auf, während bei dem Probanden CI04 vor der Implantation bereits eine 10jährige Gehörlosigkeit vorlag, sodass von einer ausgeprägten auditorischen Deprivation auszugehen ist. Dennoch erlangten Teilnehmer mit einer kürzeren Ertaubungsdauer keine besseren Ergebnisse als dieser. Diese Tatsache geht mit Studien konform, in denen kein Zusammenhang der Melodieerkennung mit der Ertaubungsdauer nachweisbar war (Olszewski et al., 2005).

Auffallend ist die langjährige Hörerfahrung vor der Ertaubung dieses Probanden von über 60 Jahren, die ihn von den anderen Studienteilnehmern abgrenzt. Zumindest in Bezug auf die Wahrnehmung rhythmischer Komponenten können CI-Nutzer von der Hörerfahrung profitieren (Olszewski et al., 2005). Postlingual ertaubte Probanden weisen nach dieser Studie eine bessere Musikperzeption als prälingual ertaubte auf, was darauf zurückzuführen ist, dass selbst eine geringe Hörerfahrung die Anwendung von Hinweisen wie Rhythmus und Text ermöglicht.

Alter des Probanden

Der Proband CI04 war mit 72 Jahren einer der ältesten Studienteilnehmer. Andere Studien legen einen negativen Einfluss des Alters auf die Musikwahrnehmung durch strukturelle Veränderungen des Gehirns nahe (Lazard, Innes-Brown und Barone, 2014). Probanden erlangen mit zunehmendem Alter in Untersuchungen zur Melodieerkennung schlechtere Ergebnisse (Gfeller et al., 2008; Olszewski et al., 2005). Das Alter hat einen schwach bis mittelgradig ausgeprägten Einfluss auf musikalische Parameter wie das Erkennen harmonischer Akkorde (Kunkel, 2014).

Zusammenfassend kann in der vorliegenden Studie kein einzelner Parameter die guten Leistungen dieses Probanden erklären. Die abgrenzenden Faktoren waren optimale technische Voraussetzungen in einer Kombination mit sehr gutem Sprachverstehen und einer langen Hörerfahrung vor der Ertaubung. Bisherige Studien zeigen eine große interindividuelle Variabilität der Musikperzeption mit dem Cochlea-Implantat (Looi, Gfeller und Driscoll, 2012; Wilson und Dorman, 2008), ohne dass deren Gründe grundlegend erklärt werden können. Eine Ursache für das Abschneiden der CI-Nutzer liegt wohl zusätzlich zu den oben erörterten Faktoren in der immer noch nicht optimalen Übertragung spektraler Informationen (Olszewski et al., 2005; Yitao und Li, 2013).

4.7 Allgemeine Einflussfaktoren auf die Musikwahrnehmung

Neben dem musikalischen Kontext und der Erfahrung des Zuhörers spielen kulturelle Traditionen sowie der Musikstil in der Einordnung des Klangcharakters eine bedeutende Rolle (Krumhansl, 1997). So ist davon auszugehen, dass Hörer, die mit Musik aus dem Jazzbereich aufgewachsen sind, ein anderes Präferenzmuster für isolierte Akkorde aufweisen als an klassische Musik gewöhnte Hörer. Solche Einflüsse ließen sich in unserer Studie nicht ausschließen, auch wenn die favorisierten Musikstile unserer Probanden Pop, Rock und Klassik darstellten – Stile, in denen die klassischen harmonischen Strukturen vorherrschen.

Es ist denkbar, dass das bilaterale Hören einen positiven Einfluss auf gute Leistungen der Musikwahrnehmung hat. Der Vergleich von uni- und bilateral implantierten CI-Nutzern zeigte eine größere Zufriedenheit der Musikwahrnehmung der beidseits Implantierten (Veekmans et al., 2009). Für sie spielt Musik eine größere Rolle im Leben, sie berichteten über weniger Schwierigkeiten in der Melodie- und Timbreperzeption und agieren hinsichtlich der Timbre-Perzeption von Flöte und Piano sicherer als einseitig implantierte (Veekmans et al., 2009).

Bilateral implantierte Nutzer sind in herausfordernden Situationen wie dem Sprachverstehen im Störgeräusch (Blamey et al., 2015; Litovsky et al., 2006; Müller, Schön und Helms, 2002) und dem Musikerleben (Marsella, Scorpecci und Babiloni, 2014) gegenüber einseitig implantierten CI-Nutzern im Vorteil. Es ist durchaus denkbar, dass für so

komplexe akustische Reize wie Harmonien es darstellen, bilaterales Hören für ein befriedigendes Hörerlebnis vorteilig ist.

Die Wahrnehmung und Verarbeitung musikalischer Parameter unterliegt der Lateralität, der Zuordnung zu einer Gehirnhälfte (Platel et al., 1997). Unter der Verwendung der Positronen-Emissions-Tomografie führten Aufgaben zur Tonhöhen- und Timbre-Wahrnehmung vornehmlich zu einer Aktivität der rechten und Rhythmuswahrnehmung zu einer Aktivität der linken Hemisphäre (Platel et al., 1997). Während der Wahrnehmung von Harmonien kommt es bei Nichtmusikern zu einer erhöhten Durchblutungsgeschwindigkeit in der rechten Hemisphäre wie transkranielle Ultraschall-Doppler-Untersuchungen zeigten (Evers et al., 1999). Vor diesem Hintergrund wäre eine nachfolgende Durchführung der Messungen unter Beobachtung des Einflusses der Implantatseite erstrebenswert.

Aufgrund der Tagesformabhängigkeit von kognitiven und psychoakustischen Leistungen wäre eine Wiederholung der Messreihe interessant.

4.8 Testdesign

Die Auswahl der Normalhörenden orientierte sich am Alter der CI-Nutzer, sodass wir einen ähnlichen Altersmedian der Probandengruppen mit 61 Jahren für CI-Nutzer und 60 Jahren für Normalhörende erreichten. Damit sollten weitere Einflussfaktoren reduziert werden, denn wie oben beschrieben (s.Kap.4.6) ist das Alter mit reduzierten Leistungen der Musikperzeption assoziiert. Daher motivierte sich auch die auf den ersten Blick großzügig angesetzte Hörschwelle von 30 dB als Auswahlkriterium für normalhörende Probanden. Vergleiche mit anderen Arbeiten (Sucher und McDermott, 2007) belegten deren Anwendung und auch der Vergleich zu Literaturnormwerten (EN ISO 7029:2000) zeigte, dass die beiden Probanden, die eine Hörschwelle über 20 dB aufwiesen noch immer im Rahmen ihrer Altersgruppe lagen (Anhang 1).

Unter der Annahme, dass Sinustöne besser wahrgenommen werden als Komplextöne (s.Kap.4.3), wäre eine Variation der Stimuli interessant, um zu überprüfen, ob diese Vorteilsnahme auch in Bezug auf die Harmonieperzeption greift.

Die Durchführung aller Tests (Musikperzeption, Sprachverstehen und Fragebogen zum Musikerleben) dauerte im Durchschnitt 90 Minuten, was insbesondere für CI-Nutzer und anspruchsvolle Aufgaben eine lange Dauer darstellt. Da die entscheidenden Tests zur Musikperzeption nach Durchführung des Auswahltests (Freiburger Einsilbertest) gleich zu Beginn durchgeführt wurden, betraf das nur die beiden Hauptexperimente. Jedoch hatten die Probanden die Möglichkeit nach Beendigung einzelner Messreihen individuell Pausen zu machen. Inwieweit die schlechteren Ergebnisse der CI-Nutzer durch die erhöhte Höranstrengung und der damit verbundenen, möglicherweise zu schnellen, Stimulidarbietung zusammen hängen, bleibt offen.

5. Zusammenfassung

Ein Cochlea-Implantat ermöglicht aufgrund der direkten elektrischen Reizung des Hörnervs Menschen mit einer an Taubheit grenzenden Schallempfindungsstörung ein gutes Sprachverständnis. Bei der Musikwahrnehmung jedoch weisen sie sowohl technisch, biologisch als auch durch das reduzierte Musikerleben bedingte Defizite auf. Inwieweit CI-Nutzer Harmonien im Vergleich zu Normalhörenden wahrnehmen, wurde in der vorliegenden Studie anhand zweier Tests untersucht. Zu diesem Zweck wurden 15 CI-Nutzer und 19 in Bezug auf das Alter und die Musikerfahrung passende normalhörende Teilnehmer ausgewählt. Mit einer Auswahl von Fragen des Münchener Musikfragebogens wurde das Musikerleben, mit dem Oldenburger Satztest das Sprachverstehen im Störgeräusch der Probanden festgestellt.

Im Paarvergleich von Akkorden wurde ein isoliert dargebotener Durakkord von Normalhörenden erwartungsgemäß als angenehmer im Vergleich zu musiktheoretisch weniger konsonanten Akkorden wahrgenommen. Beurteilen auch CI-Nutzer den Durakkord als den angenehmsten der dargebotenen, so wiesen die Bewertungen des Mollakkords einen signifikanten Unterschied auf: Dieser musiktheoretisch eher konsonante Akkord wurde von CI-Nutzern gegenüber den anderen Akkordtypen nicht präferiert. Insgesamt jedoch zeigen die Ergebnisse, dass es mit dem CI möglich ist, Akkorde trotz der vielfachen Einschränkungen zu einem gewissen Maß in ihrer Konsonanz wahrzunehmen. Im Kadenztest zeigten CI-Nutzer eine eingeschränkte Wahrnehmung der harmonischen Syntax mit Folgen von Akkorden. Bis auf einen Probanden wiesen sie Schwierigkeiten auf harmonische Veränderungen eines Schlussakkords einer Kadenz einzuordnen. Die eingeschränkte Übertragung musikalischer Informationen betrifft somit sowohl die vertikale (einzelne Akkorde betreffende) als auch die horizontale (Akkordsequenzen betreffende) Konsonanz. Zusammenhänge zur Harmoniewahrnehmung und dem Sprachverständnis im Störgeräusch, dem Musikerleben und Kodierungsstrategie ließen sich nicht nachweisen.

Die Ergebnisse dieser Studie beleuchten ein neues Detail der eingeschränkten Zufriedenheit von CI-Nutzern mit der Musikwahrnehmung. Hier ist herauszustellen, dass CI-Nutzer wie auch Normalhörende den Durakkord als konsonanter wahrnehmen als den verminderten und übermäßigen Akkord, den Akkord mit einem Quartvorhalt und den Akkord mit einer übermäßigen Quinte. Die Wahrnehmung harmonischer Informationen ist CI-Nutzern, wenn auch eingeschränkt, zugänglich. Hinsichtlich der Erkennung der musikalischen Syntax und eines musikalischen Abschlusses weisen sie Defizite auf. In vorherigen Studien wurde gezeigt, dass gezieltes musikalisches Training einen positiven Einfluss auf die Musikwahrnehmung hat. Eingedenk der Tatsache, dass einer der CI-Nutzer auch im Kadenztest zu Normalhörenden vergleichbare Ergebnisse erzielte, könnte dies in weiteren Studien untersucht werden.

6. Literaturverzeichnis

- Amon R. 2015. "Lexikon Der Harmonielehre." Verlag J.B. Metzler, 2. Auflage: 58.
- Besson M, Chobert J und Marie C. 2011. "Transfer of Training between Music und Speech: Common Processing, Attention, and Memory." *Front Psychol* 2 (94): 1–12.
- Bharucha JJ. 1987. "Music Cognition and Perceptual Facilitation: A Connectionist Framework." *Music Percept* 5 (1): 1–30.
- Bharucha JJ und Stoeckig K. 1986. "Reaction time and musical expectancy: priming of chords." *J Exp Psychol* 12 (4): 403-410.
- Bigand E, Poulin B, Tillmann B, Madurell F und D'Adamo DA. 2003. "Sensory versus Cognitive Components in Harmonic Priming." *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 29 (1): 159–171.
- Bigand E, Madurell F, Tillmann B und Pineau M. 1999. "Effect of Global Structure and Temporal Organization on Chord Processing." *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 25 (1): 184–197.
- Bigand E und Pineau M. 1997. "Global Context Effects on Musical Expectancy." *Percept Psychophys* 59 (7): 1098–1107.
- Bigand E, Parncutt R und Lerdahl F. 1996. "Perception of Musical Tension in Short Chord Sequences: The Influence of Harmonic Function, Sensory Dissonance, Horizontal Motion, and Musical Training." *Percept Psychophys* 58 (1): 124–141.
- Blamey PJ, Maat B, Başkent D, Mawman D, Burke E, Dillier N, [...] und Lazard DS. et al. 2015. "A Retrospective Multicenter Study Comparing Speech Perception Outcomes for Bilateral Implantation and Bimodal Rehabilitation." *Ear Hear* 36 (4): 408–416.
- Böckmann-Barthel M Ziese M, Rostalski D, Arens C und Verhey JL 2013. "Melody and Chord Discrimination of Cochlear Implant Users in Different Pitch Ranges." *Cochlear Implants Int* 14 (5): 246–251.
- Boenninghaus HG und Lenarz T. 2007. "Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde", Springer, Heidelberg 13. Auflage: S 34.
- Brockmeier SJ, Peterreins M, Lorens A, Vermeire K, Helbig S, [...] und Kiefer J.2010. "Music Perception in Electric Acoustic Stimulation Users as Assessed by the Mu.S.I.C. Test." *Adv Otorhinolaryngol* 67: 70–80.
- Brockmeier SJ, Fitzgerald D, Searle O, Fitzgerald H, Grasmeder M, [...]und Arnold W. 2011. "The MuSIC Perception Test: A Novel Battery for Testing Music Perception of Cochlear Implant Users." *Cochlear Implants Int* 12 (1): 10–20.
- Bruns L, Mürbe D und Hahne A. 2016. "Understanding Music with Cochlear Implants." *Sci Rep* 6: 1-14.
- Cook ND und Fujisawa TX. 2006. "The Psychophysics of Harmony Perception: Harmony Is a Three-Tone Phenomenon." *Empir Musicol Rev* 1 (2): 106–126.

- Dahlhaus C. 1980. "Harmony In S. Sadie (Ed.)." *The New Grove's dictionary of music and musicians* London: Macmillan, Vol.8, 175–177.
- Drennan WR, Oleson JJ, Gfeller K, Crosson J, Driscoll VD, [...]und Rubinstein JT. 2015. "Clinical Evaluation of Music Perception, Appraisal and Experience in Cochlear Implant Users." *Int J Audiol* 54 (2): 114–123.
- Drennan WR und Rubinstein JT. 2008. "Music Perception in Cochlear Implant Users and Its Relationship with Psychophysical Capabilities." *J Rehabil Res Dev* 45 (5): 779-789.
- Driscoll VD, Oleson J, Jiang D und Gfeller K. 2009. "Effects of Training on Recognition of Musical Instruments Presented through Cochlear Implant Simulations." *J Am Acad Audiol* 20 (1): 71–82.
- Ernfors P, Van De Water T, Loring J und Jaenisch R. 1995. "Complementary Roles of BDNF and NT-3 in Vestibular and Auditory Development." *Neuron* 14 (6): 1153–1164.
- Evers S, Dannert J, Rödding D, Rötter G und Ringelstein EB. 1999. "The Cerebral Haemodynamics of Music Perception." *Brain* 122 (1): 75–85.
- Friedland DR, Venick HS und Niparko JK. 2003. "Choice of Ear for Cochlear Implantation: The Effect of History and Residual Hearing on Predicted Postoperative Performance." *Otol Neurotol* 24 (4): 582–89.
- Fuller CD, Galvin JJ, Maat B, Free RH und Başkent D. 2014. "The Musician Effect: Does It Persist under Degraded Pitch Conditions of Cochlear Implant Simulations?" *Front Neurosci* 8: 1–16.
- Galvin JJ, Fu QJ und Nogaki G. 2007. "Melodic Contour Identification by Cochlear Implant Listeners." *Ear Hear* 28 (3): 302–319.
- Galvin JJ, Fu QJ, und Oba S. 2008. "Effect of Instrument Timbre on Melodic Contour Identification by Cochlear Implant Users." *J Acoust Soc Am* 124 (4): 189-195.
- Galvin JJ, Fu QJ und Oba S. 2009. "Effect of a Competing Instrument on Melodic Contour Identification by Cochlear Implant Users." *J Acoust Soc Am* 125 (3): 98-103.
- Gfeller K, Christ A, Knutson JF, Witt S, Murray KT und Tyler RS. 2000. "Musical Backgrounds, Listening Habits, and Aesthetic Enjoyment of Adult Cochlear Implant Recipients." *J Am Acad Audiol* 11 (7): 390–406.
- Gfeller K, Witt S, Stordahl J, Mehr M und Woodworth G. 2000. "The Effects of Training on Melody Recognition and Appraisal by Adult Cochlear Implant Recipients." *J Acad Rehabil Audiol* 33: 115–138.
- Gfeller K, Turner C, Mehr M, Woodworth G, Fearn R, [...] und Stordahl J. 2002. "Recognition of Familiar Melodies by Adult Cochlear Implant Recipients and Normal-Hearing Adults." *Cochlear Implants Int* 3 (1): 29–53.
- Gfeller K, Turner C, Oleson J, Zhang X, Gantz B, Froman R und Olszewski C. 2007. "Accuracy of Cochlear Implant Recipients on Pitch Perception, Melody Recognition, and

- Speech Reception in Noise." *Ear Hear* 28 (3): 412–423.
- Gfeller K, Oleson J, Knutson JF, Breheny P, Driscoll V und Olszewski C. 2008. "Multivariate Predictors of Music Perception and Appraisal by Adult Cochlear Implant Users." *J Am Acad Audiol* 19 (2): 120–134.
- Gfeller K, Jiang D, Oleson J, Driscoll V und Knutson JF. 2010. "Temporal Stability of Music Perception and Appraisal Scores of Adult Cochlear Implant Recipients." *J Am Acad Audiol* 21 (1): 28-34.
- Gfeller K, Jiang D, Oleson J, Driscoll V, Olszewski C, Knutson JF [...] und Gantz B. 2012. "The Effects of Musical and Linguistic Components in Recognition of Real-World Musical Excerpts by Cochlear Implant Recipients and Normal-Hearing Adults." *J Music Ther* 49 (1): 68-101.
- Gifford RH, Shallop JK und Peterson AM. 2008. "Speech Recognition Materials and Ceiling Effects: Considerations for Cochlear Implant Programs." *Audiol Neurootol* 13 (3): 193–205.
- Hallam S, Cross I und Thaut M, 2008 "The Oxford Handbook of Music Psychology", *Oxford University Press, Second Edition: S.70.*
- Haumann S, Mühler R, Ziese M und von Specht H. 2007. "Diskrimination Musikalischer Tonhöhen Bei Patienten Mit Kochleaimplantat." *Hno* 55: 613–19.
- Helmholtz H. 1954 "On the sensation of tone as a physiological basis for the theory of music." edited and translated by A. J. Ellis. Dover, New York, first ed.1885.
- Heng J, Cantarero G, Elhilali M und Limb CJ. 2011. "Impaired Perception of Temporal Fine Structure and Musical Timbre in Cochlear Implant Users." *Hear Res* 280 (1-2): 192-200.
- HörTech gGmbH. 2011. "Oldenburger Satztest Adaptive Sprachaudiometrie Mit Sätzen in Ruhe Und Im Störgeräusch." HörTech gGmbH Oldenburg, 37.
- Johnson-Laird PN, Kang OE und Leong YC. 2012. "On Musical Dissonance." *Music Percept* 30 (1): 19–35.
- Kang R, Nimmons GL, Drennan W, Longnion J, Ruffin C, Nie K, [...] und Rubinstein J. 2009. "Development and Validation of the University of Washington Clinical Assessment of Music Perception Test." *Ear Hear*, 30 (4), 411–418.
- Koelsch S, Wittfoth M, Wolf A, Müller J und Hahne A. 2004. "Music Perception in Cochlear Implant Users: An Event-Related Potential Study." *Clin Neurophysiol* 115 (4): 966–972.
- Kong YY, Cruz R, Jones JA und Zeng FG. 2004. "Music Perception with Temporal Cues in Acoustic and Electric Hearing." *Ear Hear* 25 (2): 173–185.
- Kral A und Sharma A. 2012. "Developmental Neuroplasticity After Cochlear Implantation." *Trends Neurosci* 35 (2): 111–22.
- Krumhansl CL. 1990. "Cognitive Foundations of Musical Pitch." *Oxford University Press, New York: 77-110.*

- Krumhansl, CL. 1997. "An Exploratory Study of Musical Emotions and Psychophysiology." *Can J Exp Psychol* 51 (4): 336–353.
- Kunkel L. 2014. "Untersuchungen zur Perzeption musikalischer Parameter von Cochlea-Implantat-Trägern mit den Sprachkodierungsstrategien ACE und MP3000 im Vergleich zu normalhörenden Probanden." Dissertation, Magdeburg.
- Lassaletta L, Castro A, Bastarrica M, Pérez-Mora R, Madero R, De Sarriá J und Gavilán J. 2007. "Does Music Perception Have an Impact on Quality of Life Following Cochlear Implantation?" *Acta Otolaryngol* 127 (7): 682–686.
- Lazard DS, Vincent C, Venail, F, Van de Heyning P, Truy E, [...] und Blaymey PJ. 2012. "Pre-, Per- and Postoperative Factors Affecting Performance of Postlinguistically Deaf Adults Using Cochlear Implants: A New Conceptual Model over Time." *PLoS ONE* 7 (11): 1–11.
- Lazard DS, Innes-Brown H und Barone P. 2014. "Adaptation of the Communicative Brain to Post-Lingual Deafness. Evidence from Functional Imaging." *Hear Res* 307: 136–143.
- Levett C und Martin F. 1992. "The Relationship between Complex Music Stimuli and the Late Components of the Event-Related Potential." *Psychomusicology* 11 (2): 125–140.
- Limb CJ. 2006. "Cochlear Implant-Mediated Perception of Music." *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg* 14 (5): 337–340.
- Limb CJ und Roy AT. 2014. "Technological, Biological, and Acoustical Constraints to Music Perception in Cochlear Implant Users." *Hear Res* 308: 13–26.
- Limb CJ und Rubinstein JT. 2012. "Current Research on Music Perception in Cochlear Implant Users." *Otolaryngol Clin North Am* 45 (1): 129–140.
- Litovsky R, Parkinson A, Arcaroli J und Sammeth C. 2006. "Simultaneous Bilateral Cochlear Implantation in Adults: A Multicenter Clinical Study." *Ear Hear* 27 (6): 714-731.
- Looi V, Gfeller K und Driscoll VD. 2012. "Music Appreciation and Training for Cochlear Implant Recipients: A Review." *Semin Hear* 33 (4): 307–334.
- Looi V, McDermott HJ, McKay C und Hickson L. 2008. "Music Perception of Cochlear Implant Users Compared with that of Hearing Aid Users." *Ear Hear* 29 (3): 421–434.
- Marsella P, Scorpecci A, Vecchiato G, Colosimo A, Maglione AG und Babiloni F. 2014. "Neuroelectrical imaging study of music perception by children with unilateral and bilateral cochlear implants." *Cochlear Implants Int* 15 (1): 68-71.
- McDermott HJ 2004. "Music Perception with Cochlear Implants: A Review." *Trends Amplif* 8 (2): 49–82.
- Mehta AH und Oxenham AJ. 2017. "Vocoder Simulations Explain Complex Pitch Perception Limitations Experienced by Cochlear Implant Users." *J Assoc Res Otolaryngol* 18 (6): 1–14.
- Meyer LB. 1956. "Emotion and Meaning in Music." *The University of Chicago Press*: 25–26.

- Müller-Deile J. 2009. "Sprachverständlichkeitsuntersuchungen bei Kochleaimplantatpatienten." *Hno* 57: 580–592.
- Müller J, Brill S, Hagen R, Moeltner A, Brockmeier SJ, [...] und Anderson I. 2012. "Clinical Trial Results with the Med-El Fine Structure Processing Coding Strategy in Experienced Cochlear Implant Users." *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 74 (4): 185–198.
- Müller J, Schön F und Helms J. 2002. "Speech Understanding in Quiet and Noise in Bilateral Users of the MED-EL COMBI 40/40+ Cochlear Implant System." *Ear Hear* 23 (3): 198–206.
- Nadol JB Jr, Shiao JY, Burgess BJ, Ketten DR, Eddington DK, [...] und Shallop JK. 2011. "Histopathology of cochlear implants in humans." *Ann Otol Rhinol Laryngol* 110 (9): 883-891.
- NIDCD (2018): National Institute on Deafness and Other Communication Disorders, Bethesda, MD, USA, <https://www.nidcd.nih.gov/health/statistics/quick-statistics-hearing>, abgerufen am 10.01.2018.
- Nimmons GL, Kang RS und Drennan WR. 2008. "Clinical Assessment of Music Perception in Cochlear Implant Listeners." *Otol Neurotol* 29 (2): 149-155.
- Olszewski C, Gfeller K, Froman R, Stordahl J und Tomblin B. 2005. "Familiar Melody Recognition by Children and Adults Using Cochlear Implants and Normal Hearing Children." *Cochlear Implants Int* 6 (3): 123–140.
- Patel AD. 2003. "Language, Music, Syntax and the Brain." *Nat Neurosci* 6 (7): 674–681.
- Pflug C. 2010. "Bimodale Musikhörfähigkeiten mit Cochlea Implantat und Hörgerät bimodale Musikhörfähigkeiten mit Cochlea Implantat und Hörgerät." Dissertation, München..
- Platel H, Price C, Baron JC, Wise R, Lambert J, [...] und Eustache F. 1997. "The Structural Components of Music Perception. A Functional Anatomical Study." *Brain* 120 (2): 229–243.
- Plomp R und Levelt WJ. 1965. "Tonal Consonance and Critical Bandwidth." *J Acoust Soc Am* 38 (4): 548–560.
- Probst R, Grevers G und Iro H. 2008 "Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde" *Thieme, Stuttgart* 3.Auflage: 159, 164, 166, 179, 181.
- Pretorius LL und Hanekom JJ. 2008. "Free Field Frequency Discrimination Abilities of Cochlear Implant Users." *Hear Res* 244 (1-2): 77–84.
- Rameau JP. 1722. "*Traité de l'Harmonie*." Paris: J. B. C. Ballard, Livre II, Ch. V.
- Regnault P, Bigand E und Besson M. 2001. "Different Brain Mechanisms Mediate Sensitivity to Sensory Consonance and Harmonic Context: Evidence from Auditory Event-Related Brain Potentials." *J Cogn Neurosci* 13 (2): 241–255.
- Riss D, Hamzavi JS, Blineder M, Honeder C, [...] und Arnoldner C. 2014. "FS4 , FS4-P and FSP : A 4-Month Crossover Study of 3 Fine Structure Sound-Coding Strategies." *Ear*

- Hear* 35 (6): 272–81.
- Roberts LA. 1986. "Consonance Judgments of Musical Chords by Musicians and Untrained Listeners." *Acta Acust United Acust* 62 (2): 163–171.
- Rockstro W, Dyson G, Drabkin W und Powers HS. 1980. "Cadence. In S. Sadie (Ed.)." *The New Grove's dictionary of music and musicians*: London: Macmillan, Vol.8, 582-592.
- Rosner BS und Narmour E. 1992. "Harmonic closure: music theory and perception." *Music Percept* 9 (4): 383-410.
- Tyler RS und Summerfield AQ. 1996. "Cochlear Implantation: Relationships with research on auditory deprivation and acclimatization." *Ear Hear* 17 (3): 38S-50S.
- Schellenberg EG, Bigand E, Poulin-Charronnat B, Garnier C und Stevens C. 2005. "Children's implicit knowledge of harmony in Western music." *Dev Sci* 8 (6): 551–566.
- Shannon RV, Zeng FG, Kamath V, Wygonski J und Ekelid M. 1995. "Speech Recognition with Primarily Temporal Cues." *Science* 270 (5234): 303–304.
- Shepherd RK und Hardie NA. 2001. "Deafness-induced changes in the auditory pathway: Implications for cochlear implants." *Audiol Neurootol* 6 (6): 305–318.
- Shepherd RK, Meltzer NE, Fallon JB und Ryugo DK. 2006. "Consequences of deafness and electrical stimulation on the peripheral and central auditory system." *Cochlear Implants, Second Edition, Thieme Medical Publishers New York, Stuttgart*: 25–39.
- Singh S, Kong YY und Zeng FG. 2009. "Cochlear implant melody recognition as a function of melody frequency range, harmonicity, and number of electrodes." *Ear Hear* 30 (2): 160–168.
- Snel-Bongers J, Briaire JJ, Vanpoucke FJ und Frijns JHM. 2012. "Spread of excitation and channel interaction in single and dual electrode cochlear implant stimulation." *Ear Hear* 33 (3): 367-376.
- Stabej KK, Smid L, Gros A, Zargi M, Kosir A und Vatovec J. 2012. "The perception abilities of prelingually deaf children with cochlear implants." *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 76 (10): 1392–1400.
- Stanislaw H und Todorov N. (1999). "Calculation of signal detection theory measures." *Behavior Research Methods, Instruments & Computers* 31: 137-149.
- Steinbeis N, Koelsch S und Sloboda JA. 2006. "The role of harmonic expectancy violations in musical emotions: Evidence from subjective, physiological, and neural responses." *J Cogn Neurosci* 18 (8): 1380–1393.
- Sucher CM, und McDermott HJ. 2007. "Pitch ranking of complex tones by normally hearing subjects and cochlear implant users." *Hear Res* 230 (1-2): 80–87.
- Teoh SW, Pisoni DB und Miyamoto RT. 2004. "Cochlear implantation in adults with prelingual deafness. Part I. Clinical Results." *Laryngoscope* 114 (9):1536-1540.
- Tillmann B, Bharucha JJ und Bigand E. 2000. "Implicit learning of tonality: A self-organizing

- approach." *Psychol Rev* 107 (4): 885–913.
- Tramo MJ, Cariani PA, Delgutte B und Braidida LD. 2001. "Neurobiological Foundations for the Theory of Harmony in Western Tonal Music." *Ann N Y Acad Sci* 930: 92–116.
- Veekmans K, Ressel L, Mueller J, Vischer M und Brockmeier SJ. 2009. "Comparison of Music Perception in Bilateral and Unilateral Cochlear Implant Users and Normal-Hearing Subjects." *Audiol Neurootol* 14 (5): 315–26.
- Vermeire K, Punte AK und Van De Heyning P. 2010. "Better Speech Recognition in Noise with the Fine Structure Processing Coding Strategy." *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 72 (6): 305–311.
- Volkova A, Trehub SE, Schellenberg EG, Papsin BC und Gordon KA. 2014. "Children's Identification of Familiar Songs from Pitch and Timing Cues." *Front Psychol*. 5: 863.
- Wagener K, Brand T und Kollmeier B. 1999. "Entwicklung Und Evaluation Eines Satztests Für Die Deutsche Sprache I: Design Des Oldenburger Satztests. Development and Evaluation of a German Sentence Test I: Design of the Oldenburg Sentence Test." *Z Audiol* 38 (1): 4–15.
- Wilson BS und Dorman MF. 2008. "Cochlear Implants: A Remarkable Past and a Brilliant Future." *Hear Res* 242 (1-2): 3–21.
- Won JH, Drennan WR, Kang RS und Rubinstein JT. 2010. "Psychoacoustic Abilities Associated with Music Perception in Cochlear Implant Users." *Ear Hear* 31 (6): 997–1003.
- Yitao M und Li X. 2013. "Music and Cochlear Implants." *J Otol* 8 (1): 32-38.
- Zarate JM, Ritson CR und Poeppel D. 2012. "Pitch-Interval Discrimination and Musical Expertise: Is the Semitone a Perceptual Boundary?" *J Acoust Soc Am* 132 (2): 984–993.
- Zeng FG, Tang Q und Lu T. 2014. "Abnormal Pitch Perception Produced by Cochlear Implant Stimulation." *PLoS ONE* 9 (2): 1-8.

7. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der Tonotopie der Cochlea, S.2, © Marie Knobloch
nach: Human Ear, Anatomy, Joseph E. Hawkins. o.J., Online ENCYCLOPÆDIA
BRITANNICA

Abb. 2: Abbildung der Frequenzen auf einer abgerollten Cochlea, S.2, © Marie Knobloch
Nach: Human Ear, Anatomy, Joseph E. Hawkins. o.J., Online ENCYCLOPÆDIA
BRITANNICA

Abb. 3: Schematische Darstellung eines implantierten Cochlea-Implantat-Systems, S. 3, ©
Marie Knobloch
nach: Cochlear Implantation: The Hannover Guideline. Lenarz T. p.6. Endo Press. Tuttlingen
2011

Abb. 4: Notenbeispiele von Akkorden, S. 9

Abb. 5: Notenbeispiele der Akkorde zum Paarvergleich, S. 15

Abb. 6: Eine perfekte Kadenz in D-Dur, S. 15

Abb. 7: Eine unvollendete Kadenz mit um 1–2 HT verschobenen Akkorden (Bedingung 1),
S.16

Abb. 8: Eine unvollendete Kadenz mit übermäßigen und verminderten Akkorden (Bedingung
2), S.16

Abb. 9: Individuelle Sprachverständnisschwellen der CI-Nutzer im Oldenburger Satztest mit
Störgeräusch, S.20

Abb. 10: Ergebnisse des Münchener Musikfragebogens der CI-Nutzer, S.21

Abb. 11: Ergebnisse des Münchener Musikfragebogens der Normalhörenden, S.21

Abb. 12: Bewertungen der verschiedenen Akkordtypen für die Normalhörenden (links) und
die CI-Nutzer (rechts), S.22

Abb. 13: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer gegenüber den
Normalhörenden, quantifiziert durch den Euklidischen Abstand (EA), S.25

Abb. 14: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit des
Sprachverstehens im Störgeräusch, S.26

Abb. 15: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit der MuMu-Scores, S.27

Abb. 16: Abweichung der Akkordbewertungen der CI-Nutzer in Abhängigkeit der Kodierungsstrategie, S.28

Abb. 17: Trefferraten der Normalhörenden in Bedingung 1 und 2, S.29

Abb. 18: Falsch-Alarmraten der Normalhörenden in Bedingung 1 und 2, S.29

Abb. 19: Sensitivitätsindizes Normalhörenden, S.30

Abb. 20: Trefferraten der CI-Nutzer, S.30

Abb. 21: Falsch-Alarmraten der CI-Nutzer, S.31

Abb. 22: Sensitivitätsindizes CI-Nutzer, S.31

Abb. 23: Sensitivitätsindizes der Normalhörenden in Abhängigkeit der MuMu-Scores , S.32

Tab. 1: Epidemiologische Daten der CI-Probanden, S.13

Tab. 2: Mittelwerte der Bewertungen der verschiedenen Akkordtypen für die Normalhörenden (links) und die CI-Nutzer (rechts) mit Standardabweichungen, S.23

Tab. 3: Akkordbewertungen der Normalhörenden, dabei werden der Dur- und Mollakkord signifikant harmonischer als die Akkorde Sus4, Aug, Dim, und B5 beurteilt, S.24

Tab. 4: Akkordbewertungen der CI-Nutzer, dabei wird der Durakkord als signifikant harmonischer als zu Moll, Aug und Dim bewertet, S.24

Tab. 5: Mittelwerte der Sensitivitätsindizes für Bedingung 1 und 2 beider Probandengruppen, S.32

8. Danksagungen

An dieser Stelle danke ich all jenen, die mich bei der Durchführung der Studie und der Verfassung dieser Dissertationsschrift unterstützt haben.

Zuerst danke ich Dr. rer. nat. Martin Böckmann-Barthel für die Überlassung des behandelten Themas, die allzeitige Unterstützung bei der Planung, Durchführung und Auswertung der Studie und die unzähligen konstruktiven Diskussionen.

Ich danke der Abteilung für Experimentelle Audiologie des Universitätsklinikums Magdeburg unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Jesko L. Verhey für die Schaffung der Voraussetzungen zum Erstellen dieser Arbeit sowie eine angenehme Arbeitsatmosphäre, wertvolle Anregungen und eine stete Hilfsbereitschaft, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Großer Dank gilt allen Probanden, die sich freiwillig für diese Studie zur Verfügung gestellt haben und diese somit erst ermöglicht haben. Der Firma MED-EL, Innsbruck danke ich für die Unterstützung bei Sachmitteln.

Ich danke Frau Dipl.-Math. Anke Lux vom Institut für Biometrie und Medizinische Informatik für die Beratung und Unterstützung bei der statistischen Auswertung der erhobenen Daten. Für die Hilfe zur Erstellung der Grafiken dieser Schrift danke ich Dr. rer. nat. Jan Hots und Andreas Zink. Außerdem danke ich Dr. med. Melissa Elfriede Zink für ihre wertvollen Ratschläge zu dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für ihre bedingungslose Unterstützung und stetige Förderung meiner Interessen in jeder Hinsicht.

9. Ehrenerklärung

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

Harmoniewahrnehmung mit dem Cochlea-Implantat

in der Abteilung für Experimentelle Audiologie (Leiter der Abteilung Prof. Dr. rer. nat. Jesko L. Verhey) der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

mit Unterstützung durch Prof. Dr. rer. nat. Jesko L. Verhey und Dr. rer. nat. Martin Böckmann-Barthel

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.

Friedrichshafen, 26. Januar 2018

Marie Knobloch

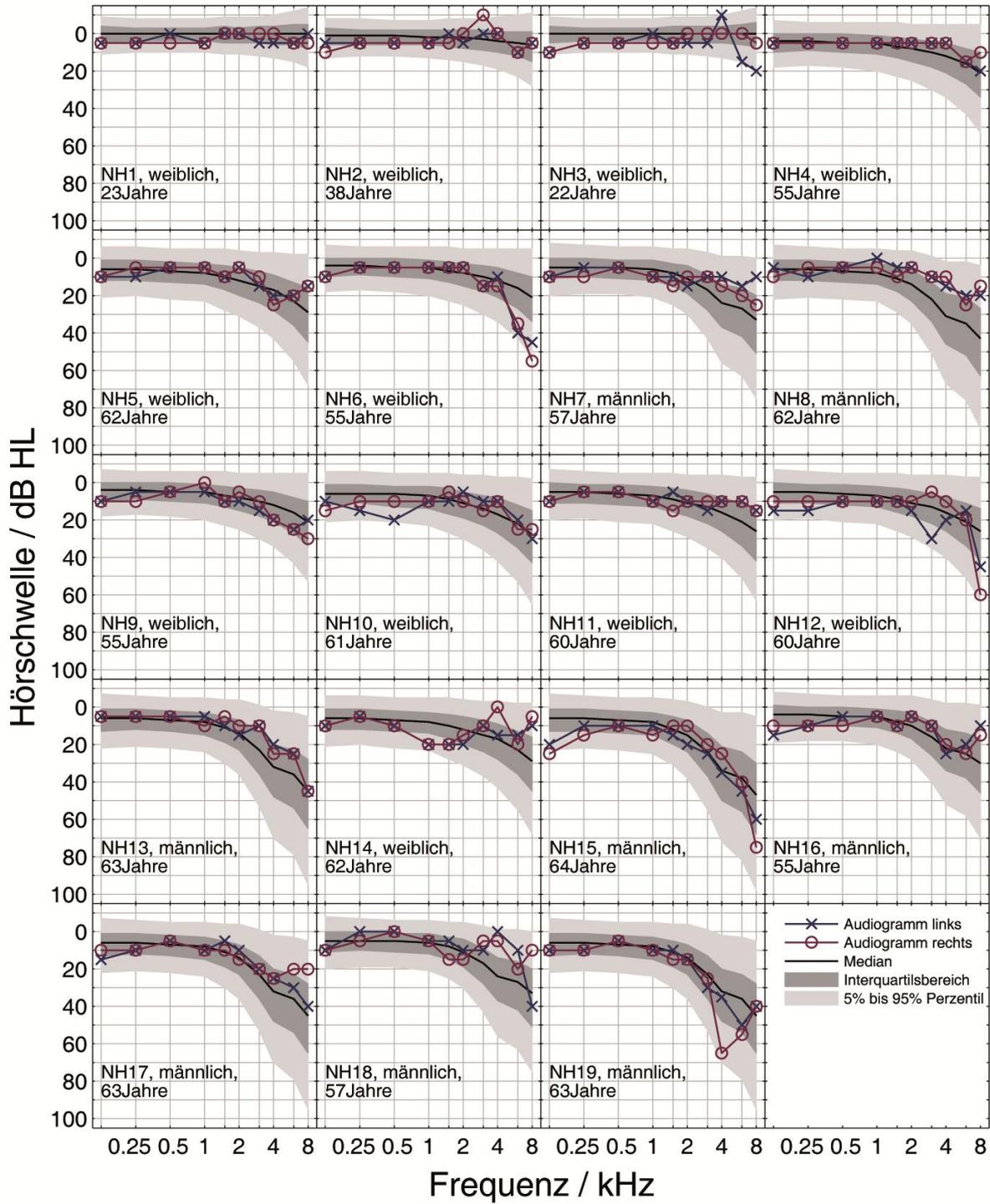
10. Darstellung des Bildungsweges

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

11. Anlagen

Anlage 1

Audiogramme der Normalhörenden



Anlage 2

MUMU (MÜNCHNER MUSIK) FRAGEBOGEN

Zum Erfassen von Musikhörgewohnheiten post-lingual ertaubter Probanden
nach der Cochlea-Implantation – Fragenauswahl für Projekt CI & musikalische
Harmonien

Bitte füllen Sie alle Felder aus! Lassen Sie keine Leerräume!

Probandenkürzel:		Geburtsdatum			
-------------------------	--	--------------	--	--	--

2. Welche Rolle spielte/spielt Musik in Ihrem Leben?

a) In der Zeit vor Eintritt der Hörminderung?

Eine sehr große 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Keine

b) In der Zeit Ihrer Hörminderung vor der Cochlea-Implantation?

Eine sehr große 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Keine

c) Jetzt, seit der Implantation?

Eine sehr große 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Keine

4. Wie klingt Musik im Allgemeinen mit dem Cochlea-Implantat?

Natürlich 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Unnatürlich

Angenehm 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Unangenehm

Deutlich 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Undeutlich

Weniger blechern 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Mehr blechern

Weniger hallig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Mehr hallig

5. Speisen Sie Musik normalerweise direkt in den Sprachprozessor ein?

(zB. Verwendung der Eingangsbuchse um den Sprachprozessor an Audiogeräte anzuschließen)

- Ja Nein

11. Können Sie hohe und tiefe Töne unterscheiden?

- Ja Nein

15. Welche Musikrichtungen haben Sie gehört oder hören Sie?

Mehrfachnennungen sind möglich.

In der Zeit vor Eintritt der Hörminderung	Klassische Musik <input type="checkbox"/>	Oper/Operette <input type="checkbox"/>	Religiöse Musik <input type="checkbox"/>	Volksmusik <input type="checkbox"/>
	Pop <input type="checkbox"/>	Rock <input type="checkbox"/>	Jazz/Blues <input type="checkbox"/>	Musik zum Tanzen <input type="checkbox"/>
In der Zeit Ihrer Hörminderung vor der Implantation	Klassische Musik <input type="checkbox"/>	Oper/Operette <input type="checkbox"/>	Religiöse Musik <input type="checkbox"/>	Volksmusik <input type="checkbox"/>
	Pop <input type="checkbox"/>	Rock <input type="checkbox"/>	Jazz/Blues <input type="checkbox"/>	Musik zum Tanzen <input type="checkbox"/>
Jetzt, nach der Implantation	Klassische Musik <input type="checkbox"/>	Oper/Operette <input type="checkbox"/>	Religiöse Musik <input type="checkbox"/>	Volksmusik <input type="checkbox"/>
	Pop <input type="checkbox"/>	Rock <input type="checkbox"/>	Jazz/Blues <input type="checkbox"/>	Musik zum Tanzen <input type="checkbox"/>

17. Spielen Sie selbst ein Instrument oder haben Sie ein Instrument gespielt?

a) In der Kindheit?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

b) In der Zeit vor Eintritt der Hörminderung?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

c) In der Zeit Ihrer Hörminderung vor der Cochlea-Implantation?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

d) Jetzt, nach der Implantation?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

19. Haben Sie gesungen oder singen Sie?

a) In der Zeit vor Eintritt der Hörminderung?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

b) In der Zeit Ihrer Hörminderung vor der Cochlea-Implantation?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

c) Jetzt, nach der Implantation?

Häufig 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Nie

22. Haben Sie außerhalb der Schule Musikunterricht (Instrument und/oder Gesang) erhalten?

Ja Nein

Falls Sie diese Frage mit „Nein“ beantwortet haben, fahren Sie bitte mit Frage 24 fort.

23. Wie lange haben Sie Musikunterricht außerhalb der Schule erhalten?

Weniger als 3 Jahre Mehr als 3 Jahre

24. Haben Sie mit dem Implantat geübt Musik zu hören?

- Ja Nein

Falls Sie diese Frage mit „Nein“ beantwortet haben, lassen Sie bitte die nächste Frage aus.

25. Wie haben Sie geübt Musik zu hören?

Ich habe immer wieder bekannte Musik gehört. <input type="checkbox"/>	Ich habe Musik nach Noten gemacht. <input type="checkbox"/>
Ich habe immer wieder unbekannte Musik gehört. <input type="checkbox"/>	Ich habe immer wieder bekannte Stücke ohne Noten gespielt. <input type="checkbox"/>
Ich habe Musik gehört und dazu die Noten gelesen. <input type="checkbox"/>	Musik war Teil meines Hör- und Kommunikationstrainings. <input type="checkbox"/>
Ich habe Musikunterricht genommen. <input type="checkbox"/>	

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!