

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

Wahrnehmung musikalischer Harmonien bei prälingual ertaubten Kindern und Jugendlichen
mit Cochlea-Implantat

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. med.

(doctor medicinae)

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

vorgelegt von	Victoria Zimmer, geb. Dörschel
aus	Elsterwerda
Magdeburg	2020

Bibliographische Beschreibung

Zimmer, Victoria

Wahrnehmung musikalischer Harmonien bei prälingual ertaubten Kindern und Jugendlichen mit Cochlea-Implantat

2020, 72 Bl., 17 Abb., 3 Tab., 3 Anl.

Kurzreferat

In der vorliegenden Studie wird untersucht, welche Aspekte musikalischer Harmonie von vor dem Spracherwerb (prälingual) vollständig ertaubten Kindern und Jugendlichen mit Cochlea-Implantat-Versorgung wahrgenommen werden. Dabei werden sie mit normalhörenden Kindern und Jugendlichen verglichen. Paarweise dargebotene einzelne Akkorde diskriminieren beide Gruppen ausreichend sicher, jedoch sind die Cochlea-Implantat-Träger weniger zuverlässig als die Normalhörenden. Dabei zeigt sich eine Verbesserung mit zunehmendem Alter für die Cochlea-Implantat-Träger. Zudem bevorzugen die Cochlea-Implantat-Träger sowie die Normalhörenden den Dur-Akkord gegenüber anderen Akkordtypen. Sie zeigen dabei das musikalisch erwartete Präferenzmuster, welches sich in der Intensität seiner Ausprägung zwischen den beiden Gruppen nicht unterscheidet. Hier wird eine positive Altersabhängigkeit mit der Ausprägung des Musters nur für die Normalhörenden gefunden. Bei der Darbietung von kurzen Musikstücken, die entweder auf dem musikalisch erwarteten Dur-Akkord enden oder auf einem dissonanten Akkord, sollen die Probanden angeben, ob das Stück gut oder schlecht endet. Dabei antworten die Cochlea-Implantat-Träger ausnahmslos auf dem Rateniveau, während die Normalhörenden annähernd perfekt antworten. Hier zeigt sich eine starke Altersabhängigkeit für die Normalhörenden-Gruppe. Obwohl sie Freude an Musik haben und mit ihrer Diskriminationsfähigkeit von Akkorden und dem gezeigten Akkordpräferenzmuster die Voraussetzungen zur Wahrnehmung musikalischer Kadenzen erfüllen, können prälingual ertaubte CI-Träger Akkorde im Zusammenhang nicht einordnen. Das zeigt ein fehlendes Verständnis für die musikalische Syntax an.

Schlüsselwörter: Cochlea-Implantat, Harmonie, Kinder, Konsonanz, Musik

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Das gesunde Gehör	2
1.2	Grade der Schwerhörigkeit	4
1.3	Indikationsstellung für ein Cochlea-Implantat bei Kindern	5
1.4	Aufbau und Funktionsweise von Cochlea-Implantaten	5
1.5	Einflussfaktoren auf den postoperativen Hörerfolg	6
1.6	Musikalische Begriffsklärung und Grundlagen	8
1.7	Cochlea-Implantat und Musik	10
1.7.1	Zeitliche Parameter	12
1.7.2	Spektrale Parameter	12
1.8	Studien mit Kindern	13
1.9	Problemstellung	15
1.9.1	Studienablauf und Hypothesenaufstellung	16
2	Material und Methoden	18
2.1	Teilnehmer	18
2.1.1	Cochlea-Implantat-Träger	18
2.1.2	Normalhörende Kinder und Jugendliche	20
2.2	Versuchsaufbau	20
2.3	Fragebogen	21
2.4	Vortest	21
2.5	Experiment 1	22
2.6	Experiment 2	23
2.7	Experiment 3	24

2.8	Durchführung.....	25
2.9	Datenanalyse	25
3	Ergebnisse	29
3.1	Experiment 1	29
3.2	Experiment 2	32
3.3	Experiment 3	34
3.4	Fragebogen.....	37
4	Diskussion	40
4.1	Experiment 1	40
4.2	Experiment 2	41
4.3	Experiment 3	43
4.4	Alterseffekte	45
4.5	Fragebogen.....	47
4.6	Allgemeine Einflussfaktoren	48
5	Zusammenfassung	50
6	Literaturverzeichnis.....	51
7	Danksagung.....	56
8	Ehrenerklärung	58
9	Darstellung des Bildungsweges	59
10	Anlagen	61

Abkürzungsverzeichnis

a	Anstieg Trendlinie
ACE	Advanced Combination Encoders (Kodierungsstrategie)
c	Antworttendenz (Signalentdeckungstheorie)
CI	Cochlea-Implantat
CIS	Continuous Interleaved Sampler (Kodierungsstrategie)
d'	Sensitivitätsindex (Signalentdeckungstheorie)
dB HL	Dezibel Hearing Level
DGPP	Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie
ebd.	ebenda (Verweis auf die zuvor angegebene Quelle)
FR	Falschalarmrate/n
FSP	Fine Structure Processing (Kodierungsstrategie)
HR	Trefferrate/n (englisch „Hearing Rate/s“)
HTS	Halbtonschritt/e
KCI	Kind mit CI (Teil der Probandenpseudonymisierung)
KNH	normalhörendes Kind (Teil der Probandenpseudonymisierung)
MBEA	Montreal Battery of Evaluation of Amusia (Testbatterie)
MCCI	Music in Children with Cochlear Implants (Testbatterie)
MUMU	Münchener Musik Fragebogen
MuSIC Perception Test	Musical Sounds in Cochlear Implants Perception Test (Testbatterie)
NH	Normalhörend/e
S	Fragebogenpunktzahl (englisch „Score“)
UWCAMP	University of Washington Clinical Assessment of Music Perception Test (Testbatterie)

1 Einführung

Laut aktuellen Schätzungen der World Health Organization (WHO) leiden im Jahr 2018 etwa 466 Millionen Menschen an einer behindernden Hörschädigung, das bedeutet einen Hörverlust, der 40 dB bei Erwachsenen, bzw. 30 dB bei Kindern auf dem besseren Ohr übersteigt. Das entspricht 6 % der Weltbevölkerung. 34 Millionen dieser Menschen sind Kinder, was einem Anteil von 7 % entspricht. Aufgrund mangelnder Präventionsmaßnahmen ist laut WHO ein Anstieg der Gesamtprävalenz auf 630 Millionen bis 2030, beziehungsweise über 900 Millionen bis 2050 zu erwarten (WHO 2018). Zudem zählen Hörschädigungen zu den fünf Krankheiten, die zu den meisten Lebensjahren mit Behinderung führen laut der Analyse der Global Burden of Disease Studie der WHO (GBD 2016 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators 2017). Entsprechend wichtig ist die Auseinandersetzung mit dem Thema Hörschädigung und ihren Auswirkungen auf das Leben der Menschen.

Neben der Kommunikationseinschränkung, die bis zur sozialen Isolation führen kann (Olusanya et al. 2014), stellt auch das veränderte oder ganz fehlende Musikerleben einen starken Einschnitt in das Leben der Betroffenen dar. Auch wenn dabei viel im Unbewussten abläuft, hat Musik dennoch einen besonderen Stellenwert als Mechanismus zur Stimmungsregulation. Dabei wird Musik insbesondere genutzt, um die eigene Stimmung aufzuhellen, auch wenn negative Gefühle dabei initial kurzzeitig verstärkt werden (Saarikallio und Erkkilä 2007). Des Weiteren bildet Musik eine wichtige soziale Grundlage. Zum einen sind die aktuellen Charts und Musikpreise ein häufiges Gesprächsthema. Der individuelle Musikgeschmack beeinflusst sogar, ob Freundschaften geschlossen oder vermieden werden, da Menschen damit bestimmte Charaktereigenschaften verbinden und so das Gegenüber kategorisieren (Knobloch et al. 2000). Zum anderen fördert sowohl die passive Wahrnehmung als auch insbesondere die aktive Teilnahme an Musik die geistige Entwicklung von Kindern: angefangen mit Kreativität, Spracherwerb, Lesen, räumliches Denken, Koordination bis hin zu sozialen Fähigkeiten und Empathie (Hallam 2010; Politimou et al. 2019).

Heutzutage erlangen selbst vollständig ertaubte Menschen durch Innenohrprothesen, die sogenannten Cochlea-Implantate (CI), die Möglichkeit, wieder am Hören teilzuhaben. Das bedeutet jedoch keine vollständige Heilung und nicht jeder Hörgeschädigte kann davon profitieren.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Wahrnehmung von Musik von CI-Trägern. Im Folgenden wird zunächst der aktuelle Kenntnisstand zu CIs und „Musikwahrnehmung mit CI“ mit den zum Verständnis notwendigen Grundlagen geschildert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf Studien bei Kindern, da sie aufgrund der Gefahr der nur unzureichend entwickelten Kommunikationskompetenz sowie die Nachteile durch den mangelnden Musikeinfluss einer besonderen Entwicklungsgefährdung mit entsprechenden Folgen im alltäglichen Leben ausgesetzt sind (le Clercq et al. 2020). Es folgt die Darstellung des Aufbaus, der Durchführung und der Analyse der Experimente sowie der gewonnenen Daten und deren Diskussion.

1.1 Das gesunde Gehör

Das Gehör ist aufgrund seiner Konstruktion und Lage einer der empfindlichsten und komplexesten Sinne des Menschen (Abbildung 1). Der Aufbau gliedert sich in Außen-, Mittel- und Innenohr. Der Schall gelangt über das äußere Ohr zum Trommelfell und regt dieses zum Schwingen an. Die Schwingungen werden auf die im Mittelohr liegende Gehörknöchelchenkette und damit auf das sich anschließende ovale Fenster des Innenohres übertragen. Das Innenohr besteht aus der Hörschnecke (Cochlea) und dem Gleichgewichtsorgan. Die Cochlea enthält die um $2\frac{1}{2}$ Windungen aufsteigende Scala vestibuli, sowie die absteigende Scala tympani, welche beide mit Perilymphe ausgefüllt sind. Die Scala vestibuli und die Scala tympani sind durch die Basilarmembran und dem darauf befindlichen mit Endolymphe gefüllten Ductus cochlearis voneinander getrennt. Wird durch die Gehörknöchelchenkette nun Druck auf das ovale Fenster und damit die Perilymphe ausgeübt, so wird die Schwingung auf die Basilarmembran übertragen. Die Schwingung erreicht für hohe Frequenzen basisnah und tiefe Frequenzen apexnah auf einem bestimmten Abschnitt der Basilarmembran ein Maximum an Auslenkung (Wanderwellentheorie). Dies sorgt für eine tonotope Gliederung, welcher auch die dazugehörigen Neurone mit ihrer Frequenzspezifität unterliegen. Innerhalb des Schneckengangs sitzt der Basilarmembran das so genannte Corti-Organ auf, welches die inneren und äußeren Haarzellen enthält. Im Bereich der maximalen Auslenkung der Basilarmembran kommt es zur Auslenkung der Stereozilien der inneren Haarzellen, welche eine Kaskade in Gang setzt, die zur Auslösung eines Aktionspotentials in den afferenten Hörnervenzellen mit Weiterleitung über die Hörbahn führt. Die Auslösung dieses Ablaufs erfolgt phasengekoppelt an einen bestimmten Auslenkungszeitpunkt der Basilarmembran. So wird nicht nur die Einhüllende, sondern auch die zeitliche Feinstruktur des Schallsignals übertragen. Dieser Vorgang unterstützt die Frequenzwahrnehmung bis etwa 5.000 Hz (Moore 2003,

S. 42 – 45), was maßgeblich zum Richtungshören, Sprachverstehen, sowie der Musikwahrnehmung beiträgt. Die äußeren Haarzellen sorgen für die cochleäre Verstärkung von Schallsignalen geringer Intensität, so dass die hohe Frequenzselektivität erreicht werden kann. Das menschliche Gehör ist dadurch in der Lage, im Bereich von etwa 20 Hz bis 20.000 Hz auch geringe Frequenzunterschiede wahrzunehmen (Gelfand 1998, S. 281).

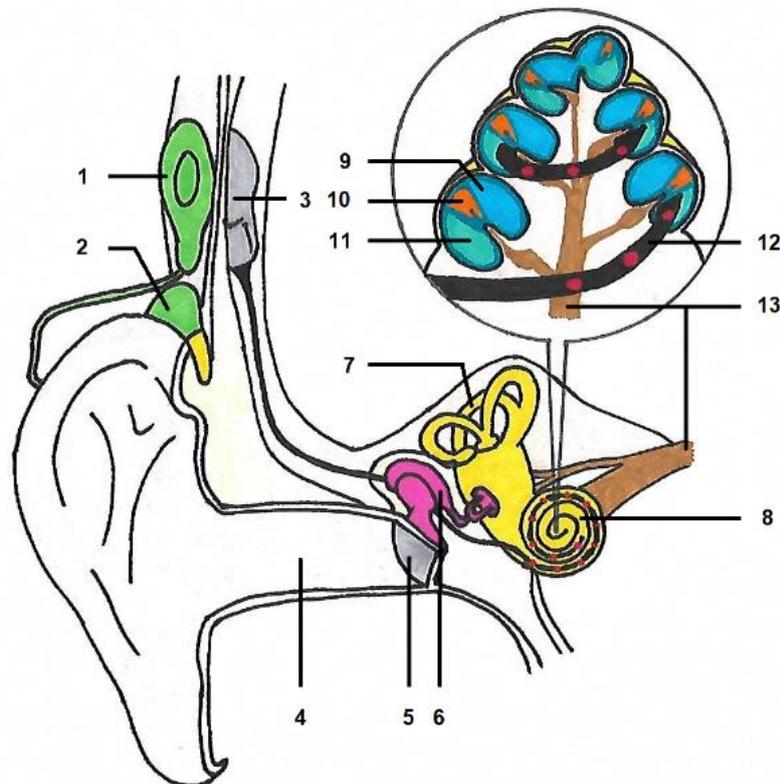


Abbildung 1: Schematische Darstellung des menschlichen Gehörs mit Cochlea-Implantat-Versorgung und Detaildarstellung der intracochleären Lage des Elektrodenträgers. Sendespule (1), Hinter-dem-Ohr-Soundprozessor mit Mikrofon und Batteriefach (2), Empfangsspule (3), Äußerer Gehörgang (4), Trommelfell (5), Gehörknöchelchenkette (6), Bogengangsystem des Gleichgewichtorgans (7), Cochlea mit eingelegtem Elektrodenträger (8), Scala vestibuli (9), Ductus cochlearis (10), Scala tympani (11), Elektrodenträger (12), Hörnerv (13)

1.2 Grade der Schwerhörigkeit

Die Einteilung der Schwerhörigkeit erfolgt in der Regel nach dem im für Luft- und Knochenleitung durchgeführten Tonaudiogramm (subjektives Verfahren) oder per Brainstem Evoked Response Audiometry (objektives Verfahren) ermittelten Hörverlust. Er wird in „Dezibel Hearing Level“ (dB HL) für acht verschiedene Frequenzen, die den Hauptsprachbereich abdecken (125 Hz – 8.000 Hz), angegeben. Dieser ist auf die durchschnittlichen frequenzabhängigen Ruhehörschwellen bezogen, welche an jugendlichen Normalhörenden ermittelt wurden (Kießling et al. 2018, S. 62 – 64; Lenarz und Boenninghaus 2012, S. 35 – 37). In Tabelle 1 ist die Einteilung der Grade der Schwerhörigkeit für Kinder angelehnt an die WHO-Richtlinie (WHO 2017) dargestellt. Unterschieden wird zusätzlich anhand des Ertaubungszeitpunkts zwischen prä-, peri- und postlingualen (vor, während und nach dem Spracherwerb aufgetretenen) Schwerhörigkeiten beziehungsweise Ertaubungen.

Hörverlust in dB HL	Schweregrad
26 - 30	leicht/mild (erschwertes Sprachverstehen bei geringem Sprachpegel, aus der Entfernung, sowie in Umgebungsgeräuschen)
31 - 60	- <i>behindernde Hörschädigung</i> - moderat (erschwertes Sprachverstehen bei durchschnittlichem Sprachpegel)
61 - 80	schwer (Sprachverstehen nur bei hohem Sprachpegel)
≥ 81	- <i>Hörrestigkeit/Taubheit</i> - profund (laute Geräusche können eventuell als Vibrationen wahrgenommen werden)

Tab. 1: Einteilung der Schweregrade des Hörverlusts bei Kindern. Angelehnt an die WHO-Richtlinie (WHO 2017)

1.3 Indikationsstellung für ein Cochlea-Implantat bei Kindern

Die Indikation zur Versorgung mit einem CI besteht bei einer Schallempfindungsschwerhörigkeit ab einem Hörverlust von 70 – 90 dB HL (Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie e.V. (DGPP) 2013). Schallempfindungsschwerhörigkeiten beruhen auf einer Störung des Innenohres oder weiter zentral liegenden Strukturen. Die Ursachen einer solchen Schwerhörigkeit werden je nach Studie mit unterschiedlicher Häufigkeit angegeben: 22 bis 54 % sind genetisch bedingt, 2 bis 9 % sind pränatal, 7 bis 19 % perinatal und 2 bis 14 % postnatal erworben. Etwa 30 bis 49 % unterliegen jedoch unbekanntem Ursachen (DGPP 2013). Zur Entscheidung über die Behandlung des Hörverlusts ist die Ursache der Hörstörung jedoch von untergeordneter Bedeutung (Zeitler et al. 2012). Voraussetzung für eine erfolgreiche CI-Versorgung ist allerdings, dass der Hörnerv und die weiteren zentralen Strukturen weitestgehend intakt sind. Daher ist ein Tonaudiogramm allein zur Indikationsstellung nicht ausreichend. Je älter das Kind, desto mehr rücken subjektive Tests in den Vordergrund, wie z.B. Sprachtests im Störschall. Neben der HNO-ärztlichen Basisdiagnostik wie Anamnese und Erhebung des HNO-Status müssen zudem objektive Hörprüfungen erfolgen. Dazu zählen transitorisch evozierte otoakustische Emissionen, Distorsionsprodukte otoakustischer Emissionen, Impedanzaudiometrie und Brainstem Evoked Response Audiology. Zusätzlich können eine Elektrocochleografie und ein elektrischer Hörnervenfunktionsstest (Promontoriumstest) durchgeführt werden. Die Erstellung eines hochauflösenden Felsenbein-Computertomogramms, sowie eines hochauflösenden Magnetresonanztomogramms sind obligatorisch, da eine Implantation bei Cochlea-Atrophie beispielsweise unmöglich ist.

1.4 Aufbau und Funktionsweise von Cochlea-Implantaten

Ein CI ist eine implantierbare elektronische Innenohrprothese, welche in Abbildung 1 dargestellt ist. Es besteht aus einem wie ein Hinter-dem-Ohr-Hörgerät angebrachten Mikrophon mit Soundprozessor und Batteriefach sowie einem implantierten Elektroden-Träger. Das Mikrophon empfängt die Geräusche, welche im Soundprozessor verarbeitet werden. Je nach Hersteller gibt es unterschiedliche Kodierungsstrategien, um die akustischen in elektrische Signale umzuwandeln. Als Beispiele seien hier Continuous Interleaved Sampler (CIS), Advanced Combination Encoders (ACE) und Fine Structure Processing (FSP) genannt. Dann werden die Signale über eine Sendespule, die etwas oberhalb vom Mastoid auf der Kopfhaut sitzt, an eine Empfangsspule unter der Kopfhaut, an welcher sie magnetisch haftet, mittels

einer Radiofrequenzverbindung übertragen. Nachdem die notwendigen Informationen aus der Trägerfrequenz entnommen wurden, wird diese induktiv in Energie zur Versorgung des Implantats umgewandelt. Die Empfangsspule sendet die Signale an Reizelektroden (i.d.R. 12 – 22 Reizelektroden, herstellerabhängig), die auf einem Elektrodenträger, welcher durchschnittlich $1\frac{1}{4}$ Windungen weit in die Scala tympani der Cochlea eingebracht wird (Landsberger et al. 2014, Kießling et al. 2018, S. 193 – 194), gleichmäßig verteilt liegen. Durch die tonotope Gliederung der Cochlea und des Hörnervs können bei gezielter Ansteuerung von Elektroden bestimmte Frequenzbereiche stimuliert werden. Damit werden Höreindrücke erzeugt. Mithilfe der gleichzeitigen Ansteuerung mehrerer Elektroden können sogenannte virtuelle Kanäle durch die Interaktion der elektrischen Felder erzeugt werden, was eine deutlich höhere Frequenzauflösung ermöglichen soll. Als Beispiel sei hier die Kodierungsstrategie HiRes 120[™] genannt, bei welcher trotz nur 16 vorliegender Elektroden 120 virtuelle Kanäle und damit 120 verschiedene stimulierbare Frequenzbereiche möglich sind (Kießling et al. 2018, S. 179). Für nähere Informationen zur Funktionsweise von Cochlea-Implantaten und den verschiedenen Kodierungsstrategien siehe Zeng 2004; Hochmair 2015, Kießling et al. 2018 (S. 167 – 183).

1.5 Einflussfaktoren auf den postoperativen Hörerfolg

Im Idealfall erlangen stark hörgeschädigte Kinder durch eine CI-Versorgung einen sehr guten Zugang zur Welt des Hörens. Dann ist ein Regelschulbesuch möglich, sowie ein freies Sprachverstehen und eine von Normalhörenden nicht zu unterscheidende Sprachproduktion (May-Mederake 2012). Leider gelingt das nur bei einem Teil der Implantierten und viele Kinder sind auch nach CI-Versorgung auf unterstützende Gebärden angewiesen (Hall 2017). Zu den wichtigsten positiven Einflussfaktoren zählt das Alter bei Implantation, da Kinder erst noch das Hören erlernen müssen. Bei prälingual ertaubten Kindern sollte das Implantationsalter möglichst unter 2 Jahren sein, um die sprachlichen Fähigkeiten im Vergleich zu normalhörenden Kindern aufholen zu können. Dies ist mit durchschnittlich $4\frac{1}{2}$ Jahren erreicht (Nicholas und Geers 2007). Bei postlingual ertaubten Kindern ist es wichtig, eine möglichst kurze Zeitspanne zwischen Ertaubung und Implantation zu erreichen (Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie e.V. 2012). Zu den weiteren positiven Einflussfaktoren zählen unter anderem eine frühzeitige Versorgung mit Hörgeräten bei (vermutetem) vorliegendem Restgehör, keine zusätzlichen körperlichen oder psychischen Beeinträchtigungen, normale nonverbale kognitive Fähigkeiten, ein hohes Bildungsniveau der Eltern, sowie eine hohe Qualität des elterlichen sprachlichen Inputs und

der Eltern-Kind-Beziehung mit intensiver andauernder Teilhabe am Rehabilitationsprozess (DGPP 2013). Ebenso zu beachten ist die Insertionstiefe des Elektrodenträgers. Durchschnittlich beträgt diese $1 \frac{1}{4}$ Windungen, was auf der Basilarmembran einer Frequenz von etwa 500 Hz entspricht (Landsberger et al. 2014). Tiefere Frequenzen werden entsprechend nicht optimal stimuliert. Daraus resultiert häufig ein schlechtes Sprachverstehen (Rotteveel et al. 2005). Postlingual ertaubte CI-Träger beschreiben die wahrgenommene Sprache zudem als „metallisch“, „roboterhaft“, „nachhallend“ oder „pfeifend“ und vergleichen sie mit der Stimme von Mickey Mouse (Kießling et al. 2018, S. 227 – 228). Landsberger et al. (2014) konnten in ihrer Studie zeigen, dass mit längeren Elektrodenträgern, die bis zu zwei Windungen tief eingeführt wurden, weitere Frequenzen durch die CI-Träger wahrgenommen werden konnten, was zu einem angenehmeren Klangerleben beiträgt. Eine zu tiefe Insertion und ungünstige Operationsmethoden bergen jedoch das Risiko der Zerstörung noch funktionierender cochleärer Strukturen (Kießling et al. 2018, S. 206 – 210), was für Patienten mit Restgehör eine hohe Relevanz hat. Auch bei Kindern ist der postoperative Hörerfolg mit besser erhaltenem Restgehör größer (Nicholas und Geers 2006), denn im Falle von Resthörigkeit kann eine Versorgung mit elektroakustischer Stimulation angestrebt werden. Dabei wird herkömmliche Hörgerätetechnik für die tiefen Frequenzen mit einer CI-Versorgung für die hohen Frequenzen kombiniert. Dadurch können Patienten zumindest teilweise die akustische Stimulation nutzen und haben Zugang zur natürlichen Feinstrukturübertragung im tieftonalen Bereich, welche auch für das Musikerleben maßgeblich ist (Hochmair 2015). Bei binaural vorliegender Hörschädigung ist unbedingt eine beidseitige Versorgung mit Hörhilfen anzustreben. Es konnte bereits bei Kindern mit CI gezeigt werden, dass dies zu einer Verbesserung des Sprachverstehens im Störgeräusch führt (Steffens et al. 2008). Ebenso kann sich das Richtungsgehör signifikant durch eine binaurale Versorgung verbessern. Dabei nahm der Effekt mit abnehmendem Abstand zwischen den beiden Implantationen zu (ebd.).

1.6 Musikalische Begriffsklärung und Grundlagen

Nachdem das Basiswissen sowie der aktuelle Forschungsstand zu CIs dargestellt wurde, werden nachfolgend für die Arbeit wichtige musikalische Fachtermini erläutert. Es gibt für Begriffe wie Dissonanz, Konsonanz und Harmonie keine einheitlichen Definitionen. Diese Dissertation orientiert sich an den nachfolgenden zwei Definitionen nach Terhardt (1984) und Tramo (2001).

Terhardt (1984) verwendet den Begriff „musikalische Konsonanz“, welcher sich aus zwei Aspekten zusammensetzt: der „sensorischen Konsonanz“ und der „Harmonie“. Die sensorische Konsonanz beschreibt die Abwesenheit von störenden Faktoren jedweder Art, insbesondere aber Schwebungen und Rauigkeit. Sie bezieht sich nicht allein auf Musik und ist weitgehend angeboren. Das belegen Studien, nach denen bereits 2 - 4 Monate alte Kinder sensorisch konsonante aus zwei Tönen bestehende Intervalle bevorzugen (Trainor et al. 2002). Harmonie hingegen repräsentiert die typischen, musikspezifischen Aspekte, die für unsere westliche Musik gelten. Harmonie ist weitgehend erlernt, wie viele Studien bestätigen. Gregory et al. (1996) fanden heraus, dass Kinder im Alter von 3 - 4 Jahren verschiedene Tonarten nicht mit bestimmten Stimmungen verbanden; 7 - 8-Jährige hingegen taten dies. 4-Jährige sind offenbar weder sensitiv gegenüber Tonarten-Zugehörigkeit noch harmonischen Regeln, 5-Jährige hingegen sind ausreichend sensitiv gegenüber Tonarten-Zugehörigkeit, aber nicht gegenüber harmonischen Regeln (Corrigall und Trainor 2014). Schellenberg et al. (2005) fanden heraus, dass 6-Jährige signifikant schneller Vokale identifizieren, wenn die Akkordserie, in der sie präsentiert werden, mit dem musikalisch korrekten Akkord endet. Dies lässt den Schluss zu, dass eine solide Kenntnis von Regeln westlicher Musik mindestens implizit in diesem Alter vorhanden ist. Dieser Verlauf zeigt eine deutliche Altersabhängigkeit an. Solche Harmonieaspekte sind demnach offenbar erlernt.

Alternativ teilt Tramo et al. (2001) musikalische Konsonanz in eine horizontale (zeitliche) und eine vertikale (gleichzeitige) Komponente ein. Die vertikale Dimension bezieht sich auf einzeln betrachtete, simultan erklingende Tonkombinationen aus zwei oder mehr Tönen. Die horizontale Dimension bezieht sich auf seriell dargebotene Töne oder Tonkombinationen (z.B. eine Melodie). Da die sensorische Konsonanz nach dieser Definition primär durch den Grad der Rauigkeit und Schwebungen gemeinsam erklingender Töne beeinflusst wird, kann man sie hauptsächlich in der vertikalen Dimension finden.

Diese Definition findet sich in den vorliegenden Experimenten wieder: in Experiment 1 und 2 wird insbesondere die vertikale Ebene der musikalischen Konsonanz untersucht, wohingegen in Experiment 3 die horizontale Ebene betrachtet wird.

Typische Tonkombinationen (Akkorde) sind Dur-, Moll-, verminderte und übermäßige Akkorde. Durakkorde (in Grundstellung) bauen sich aus dem Grundton, der darüberliegenden großen Terz – das entspricht 4 Halbtonschritten (HTS) – und der wiederum darüberliegenden kleinen Terz (3 HTS) auf und umfasst damit insgesamt eine reine Quinte (7 HTS). Bei Mollakkorden baut auf dem Grundton eine kleine Terz und darüber eine große Terz auf, was insgesamt ebenfalls eine reine Quinte darstellt. Verminderte Akkorde bestehen aus zwei aufeinander aufbauenden kleinen (insgesamt eine verminderte Quinte, 6 HTS), übermäßige Akkorde hingegen aus zwei großen Terzen (insgesamt eine übermäßige Quinte, 8 HTS). Bittet man normalhörende Menschen, singuläre Akkorde nach ihrer Konsonanz zu ordnen, so findet sich in absteigender Reihenfolge Dur > Moll > vermindert > übermäßig (Roberts 1986). Dabei werden Dur- und Moll-Akkorde musikologisch als konsonant eingestuft, übermäßige und verminderte Akkorde hingegen als dissonant. In der Horizontalen beschreibt Harmonie die erlernte Abfolge von Akkorden nach bestimmten musikalischen Regeln. Dafür werden sowohl konsonante als auch dissonante Akkorde zum Spannungsauf- und -abbau genutzt und die Empfindung als explizit konsonant oder dissonant verschwimmt durch den Kontext (Regnault et al. 2001). In der westlichen Musik spielen dabei Kadenzten, insbesondere die Abfolge von der sogenannten Dominante und Tonika, zum Abschluss von Phrasen und Stücken eine große Rolle. Die Tonika und Dominante ergeben sich aus den tonleitereigenen Dreiklängen. Ein simpler Dreiklang besteht aus dem Ton, der darüberliegenden Terz und Quinte. Man kann nun auf jeden Ton einer Tonleiter einen solchen Dreiklang aufbauen. Der erste Dreiklang der Tonleiter, welcher auf dem Grundton basiert, bildet die Tonika. Der Dreiklang auf dem fünften Ton der Tonleiter ist die Dominante. Zum Abschluss einer Phrase bildet man die Abfolge „Dominante – Tonika“. Dies wird vom Zuhörer in der Regel als befriedigend empfunden, wohingegen ein unerwarteter Akkord Unbehagen und Spannung im Hörer hervorrufen würde (Regnault et al. 2001).

1.7 Cochlea-Implantat und Musik

Im folgenden Kapitel erfolgt die Zusammenführung von CIs und Musik. Bei der Entwicklung von CIs lag lange Zeit das Hauptaugenmerk auf dem Sprachverständnis, da die zwischenmenschliche Kommunikation den Schlüssel zu sozialer Integration darstellt. Zu erkennen ist dies daran, dass der CI-Prozessor ursprünglich „Sprachprozessor“ genannt wurde. Je weiter die CI-Entwicklung voranschritt, desto mehr erweiterten sich die Anforderungsschwerpunkte an die Geräte. Als Beispiel sei hier das Richtungshören zum Orten von Geräuschquellen genannt. Immer mehr findet inzwischen auch das Musikhören mit CI Beachtung. Dabei sind als wichtige Unterschiede zur Sprache zwei Faktoren zu nennen: der weit aus größere Frequenzumfang in all seiner Variabilität und die Unvorhersehbarkeit. Um Sprache zu verstehen, kann im Gegensatz zum Musikhören unterstützend das Lippenlesen genutzt werden.

Die Studienlage zum Thema Musikhören und CI wächst stetig, muss aber differenziert betrachtet werden, da das etwaige Bestehen von Restgehör und der Ertaubungszeitpunkt einen entscheidenden Einflussfaktor darstellen. Die meisten Studien wurden bislang hauptsächlich an erwachsenen CI-Trägern, die zudem meist vollständig postlingual ertaubt sind, erhoben. Um eine Vergleichbarkeit der Daten erzeugen zu können wurden einige Testbatterien entwickelt, die wichtige musikalische Fähigkeiten überprüfen. Dazu zählen unter anderem der „University of Washington Clinical Assessment of Music Perception Test“ (UWCAMP) (Kang et al. 2009), der „Musical Sounds in Cochlear Implants (MuSIC) Perception Test“ (Brockmeier et al. 2011), die „Montreal Battery of Evaluation of Amusia“ (MBEA) (Peretz et al. 2003) und die „Music in Children with Cochlear Implants“ (MCCI) Testbatterie (Roy et al. 2014).

Der UWCAMP (Kang et al. 2009) untersucht die Fähigkeit der Richtungswahrnehmung von Tonhöhenunterschieden sowie das Erkennen von Melodien und Timbre. Dafür werden den Teilnehmern im ersten Subtest Tonpaare vorgespielt und sie sollen entscheiden, welcher Ton höher klingt. Im zweiten Subtest bekommen die Teilnehmer Melodien dargeboten, denen sie den Titel zuordnen sollen. Nach dem gleichen Prinzip sollen sie im dritten Subtest dem Klangbeispiel das bildlich dargestellte Instrument zuordnen.

Im MuSIC Perception Test (Brockmeier et al. 2011) werden Daten zu folgenden Fähigkeiten erhoben: die Diskrimination von Rhythmus, Tonhöhe, Melodie und Akkorden; das Erkennen der Anzahl von gleichzeitig erklingenden Instrumenten und die Identifikation von Instrumenten. Des Weiteren wird die Dissonanz- und Emotionsempfindung von Musik ermittelt.

Um die Fähigkeit zur Rhythmusdiskrimination zu untersuchen werden den Probanden paarweise Rhythmusbeispiele vorgespielt und sie müssen entscheiden, ob sie gleich oder verschieden klingen. Im zweiten Subtest bekommen die Probanden Töne paarweise vorgespielt und sie sollen entscheiden, ob der erste oder zweite Ton höher klingt. Im dritten Subtest bekommen die Probanden Tonfolgen paarweise dargeboten, von denen eine jeweils aus identischen Tönen besteht und die andere eine oder mehrere Tonhöhenänderungen enthält. Die Probanden sollen in dem Test entscheiden, in welcher Tonfolge die Änderung zu finden ist. Nach dem gleichen Prinzip erfolgt die Testung der Fähigkeit zur Akkorddiskrimination, wobei die Tonfolgen durch Akkordfolgen ersetzt werden. In zwei weiteren Subtests sollen die Probanden die Anzahl der gehörten Instrumente angeben, bzw. das gehörte Instrument identifizieren. Bei der Dissonanzbewertung sollen sie Akkorde auf einer Skala von 1 („harsch oder diskordant“) bis 10 („angenehm oder melodisch“) bewerten. Im letzten Subtest sollen die Probanden die ausgelöste Emotion durch vorgespielte Musikstücke auf einer Skala von 1 („sehr traurig“) bis 10 („sehr fröhlich“) einschätzen.

Die MBEA (Peretz et al. 2003) testet mittels Diskriminationsaufgaben das Erkennen von Tonleiterzugehörigkeit, Melodiekontur, Intervallen und Rhythmus. Dafür werden den Probanden paarweise Melodien dargeboten, welche identisch sind oder sich in der Tonleiterzugehörigkeit, der Kontur, den Intervallen oder dem Rhythmus unterscheiden. Die Probanden sollen entscheiden, ob die Melodien jeweils gleich oder verschieden sind. In zwei weiteren Aufgaben sollen die Probanden einschätzen, ob es sich bei dem Hörbeispiel um einen Marsch oder einen Walzer handelt (Metrumbeurteilung) und ob sie dargebotene Melodiebeispiele bereits in den vorherigen Aufgaben gehört haben. Bei letzterer Aufgabe werden die Probanden zu Beginn der Experimente nicht dazu aufgefordert, bewusst auf die Melodien zu achten. Dadurch kann das sogenannte inzidentelle (unbewusste) Lernen untersucht werden.

Um auch Kinder mit CI auf musikalische Fähigkeiten hin untersuchen zu können, wurde die für normalhörende Kinder unter 9 Jahren entwickelte „Primary Measures of Music Audiation“ (PMMA) (Gfeller und Lansing 1991) Testbatterie für Kinder mit CI zur MCCI Testbatterie (Roy et al. 2014) weiterentwickelt. Sie besteht aus Paarvergleichen zu den Bereichen Rhythmus, Tonhöhe, Melodiekontur, Harmonie (Akkordabfolge) und Timbre. In allen entsprechenden Subtests sollen die Probanden zu den paarweise vorgespielten Musik- bzw. Tonbeispielen entscheiden, ob sie gleich oder verschieden sind.

Aufgrund der großen Rolle, die Musik im Leben von Menschen spielt – ob nun bewusst oder unbewusst wahrgenommen – ist es mir wichtig herauszufinden, welche Aspekte der Musik bereits durch CIs geleistet werden können und wo es Defizite gibt. Wie bereits erläutert ist Musik insbesondere für Kinder wichtig zur Entwicklungsunterstützung in vielfältigen Bereichen. Es ist jedoch noch unklar, wie die Entwicklung der Harmoniewahrnehmung bei CI-versorgten Kindern abläuft. Im Folgenden wird zunächst die aktuelle Studienlage zum Thema „Musik und CI“ in ihren wichtigsten Ergebnissen dargestellt.

1.7.1 Zeitliche Parameter

Zu den zeitlichen Musikparametern gehören das Metrum (regelmäßiges Betonungsmuster), die Tondauer, das Tempo und der Rhythmus. CIs können solche zeitlichen Parameter sehr gut abbilden, sodass CI-Träger im Vergleich mit Normalhörenden eine vergleichbare Leistung erbringen (Brockmeier et al. 2011; McDermott 2004; Limb und Roy 2013). Es ist CI-Trägern mit entsprechender Kodierungsstrategie sogar möglich, Unterschiede in der zeitlichen Feinstruktur wahrzunehmen (Drennan et al. 2010).

1.7.2 Spektrale Parameter

Spektrale Parameter sind die frequenzbezogenen Eigenschaften der Musik wie beispielsweise Tonhöhe, Timbre sowie der Melodieverlauf. Aufgrund der hohen Frequenzauflösung der Cochlea ist es Normalhörenden möglich, mindestens Unterschiede von $\frac{1}{4}$ HTS wahrzunehmen (Zarate et al. 2012). Der kleinste in westeuropäischer Musik übliche Tonabstand ist 1 HTS. Im Gegensatz dazu benötigen CI-Träger im Mittel 3 HTS, gelegentlich aber auch bis zu 24 HTS als Mindestabstand für eine erfolgreiche Tonhöhendiskrimination (Kang et al. 2009; Pretorius und Hanekom 2008; Drennan und Rubinstein 2008). Daher ist es nicht verwunderlich, dass CI-Träger bei der Identifizierung von Melodien kaum mehr als das Rateniveau erreichen, besonders wenn ihnen Hinweise vom Rhythmus fehlen. Im Gegensatz dazu meistern Normalhörende diese Aufgabe nahezu perfekt (Kong et al. 2004). Bereits bei der Diskriminierung von Melodien, Harmonien und Timbre schneiden CI-Träger signifikant schlechter ab als Normalhörende, agieren dabei aber oberhalb des Rateniveaus (Brockmeier 2011).

Zu der Frage nach dem Empfinden von Harmonie, Konsonanz und Dissonanz gibt es nur wenige und zudem widersprüchliche Studien. In der Studie von Brockmeier et al. (2011)

konnte in Bezug auf Dissonanz- und Emotionsbewertung kein Unterschied zwischen CI-Nutzern und Normalhörenden nachgewiesen werden. Caldwell et al. (2016) präsentierten CI-Trägern und Normalhörenden Melodien mit Akkordbegleitung in unterschiedlichen Dissonanzgraden. Sie fanden im Gegensatz zu Brockmeier et al. (2011) heraus, dass CI-Träger alle Klangbeispiele als gleich angenehm einstufen während die Normalhörenden gemäß des musikalischen Dissonanzgrades differenzierten. Spitzer et al. (2019) untersuchten an einseitig ertaubten CI-Trägern die Empfindung von Konsonanz von Intervallen aus zwei simultan erklingenden Tönen. Die CI-Träger zeigten für das Hören mit ausschließlich dem normalhörenden Ohr die gleiche Intervallpräferenz wie die Kontrollgruppe aus Normalhörenden. Auch das kombinierte Hören mit beiden Modalitäten zeigte keine signifikanten Unterschiede zur Vergleichsgruppe. Sollten die CI-Träger die gleichen Stimuli jedoch ausschließlich mit CI bewerten, so fiel die Bewertung grundsätzlich schlechter aus und zeigte einen insgesamt deutlich eingeschränkteren für die Bewertung genutzten Bereich der Skala. Knobloch et al. (2018) führte an postlingual ertaubten CI-Trägern eine Studie durch, bei der gezeigt werden konnte, dass CI-Träger den Dur-Akkord gegenüber anderen Akkorden wie Moll, vermindertem und übermäßigem Akkord signifikant bevorzugten. Jedoch bevorzugten sie im Gegensatz zu den Normalhörenden den konsonanteren Moll-Akkord nicht gegenüber den dissonanteren Akkordtypen. In einem weiteren Test sollten die Probanden entscheiden, ob eine Akkordfolge schlüssig oder offen endet, um herauszufinden, inwieweit CI-Träger dazu in der Lage sind, eine Einschätzung gemäß der (westlichen) musikalischen Syntax zu treffen. Ausschließlich zwei von 15 Probanden erzielten dabei eine ausreichend große Sicherheit. Alle anderen CI-Nutzer agierten auf dem Rateniveau. Ein Grund für die gute Performance dieser beiden CI-Träger konnten Knobloch et al. jedoch nicht eruieren, obwohl die Musikgewohnheiten und -erfahrungen der Probanden mithilfe eines an den Münchner Musik Fragebogen (MUMU) (Brockmeier 2008) angelehnten Fragebogens erfasst und in die Auswertung einbezogen worden.

1.8 Studien mit Kindern

Die Ergebnisse zum Thema „Kinder mit CI und Musik“ ähneln denen von erwachsenen CI-Trägern. Die hier dargestellten Studien wurden überwiegend bei Kindern im Alter von 8 bis 18 Jahren erhoben, wobei die jüngsten Teilnehmer einzelner Studien 5 Jahre alt waren.

In den ausgewählten Studien konnte gezeigt werden, dass Rhythmen von Kindern mit CI oberhalb des Rateniveaus, aber schlechter als von normalhörenden Gleichaltrigen diskriminiert

werden (Stabej et al. 2012; Hopyan 2012) oder sogar genauso gut (Roy et al. 2014). Wenn Kinder mit CI entscheiden sollen, ob eine Abfolge von fünf Tönen aus dem gleichen Ton besteht, oder ob der vierte Ton von den anderen verschieden ist, können sie Tonhöhenunterschiede ab ungefähr 1 HTS wahrzunehmen (Vongpaisal et al. 2006). Einzelne diskriminieren sogar Unterschiede ab $\frac{1}{2}$ HTS, wohingegen normalhörende Kinder bereits Unterschiede von $\frac{1}{4}$ HTS wahrnehmen (ebd.). Präsentiert man hingegen zwei Melodien, die sich nur in einem oder zwei Tönen um 1 HTS unterscheiden, so agieren Kinder mit CI auf dem Rateniveau. Gleichaltrige Normalhörende können diese Aufgabe jedoch gut lösen (ebd.). Die Fähigkeit zur Unterscheidung von Tonhöhen ist auch wichtig zum Sprachverstehen, beziehungsweise der Sprachinterpretation. Je besser Kinder mit CI unterschiedliche Töne diskriminieren können, desto besser können sie zwischen Fragen und Aussagen unterscheiden (See et al. 2013). Kinder mit CI können auch Instrumente unterscheiden und identifizieren, allerdings schlechter als gleichaltrige Normalhörende (Roy et al. 2014; Stabej et al. 2012). Auch beim Diskriminieren und Erkennen von Melodien und Liedern unterscheiden sich Kinder mit CI und normalhörende Gleichaltrige signifikant. Denn Kinder mit CI erreichen zwar Ergebnisse oberhalb vom Rateniveau, werden aber von den Normalhörenden, die oftmals einen Ceiling-Effekt erreichen, in der Regel überragt (Stordahl et al. 2002; Scorpecci 2012). Olszewski et al. (2005) wiesen dabei nach, dass prälingual ertaubte Kinder mit CI signifikant schlechter Lieder erkennen als postlingual ertaubte Kinder, welche wiederum signifikant schlechter performen als postlingual ertaubte Erwachsene. Trotz der eingeschränkten Wahrnehmung von Musik bewerten Kinder mit CI den Dissonanzgrad einzeln dargebotener Akkorde wie normalhörende Gleichaltrige (Stabej et al. 2012). Auch die Bewertung von Liedern ist zwischen den beiden Gruppen ähnlich. Kinder mit CI mögen jedoch nicht-klassische Musik (Pop, Rap, Country) signifikant weniger als Normalhörende (Stordahl et al. 2002). Wenn Kinder mit CI Musik Emotionen zuordnen sollen (fröhlich versus traurig), agieren sie weniger akkurat als Normalhörende. Zudem nutzen Kinder mit CI als Bewertungskriterium insbesondere das Tempo, wohingegen sich Normalhörende mit zunehmendem Alter auf das Tongeschlecht beziehen (Giannantonio et al. 2015). Kinder mit CI schätzen Musik auch eher als traurig ein im Vergleich zu normalhörenden Gleichaltrigen (Stabej et al. 2012).

Einige der aufgeführten Studien legen eine Altersabhängigkeit zumindest bestimmter musikalischer Fähigkeiten nahe. Bei perinatal vollständig ertaubten Kindern mit CI nimmt insbesondere das Höralter, d.h. die Zeit seit der ersten CI-Erstanpassung, Einfluss auf die Ergebnisse. Nachgewiesen wurde dies bei der Melodie- beziehungsweise Liederkennung (Olszewski et al. 2005; Scorpecci et al. 2012). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Zeit,

die ein Kind mit Restgehör mit rein akustischer Erfahrung vor CI-Versorgung verbracht hat. Je mehr und je länger Restgehör besteht, desto besser ist die Rhythmusunterscheidung und das inzidentelle Lernen (Hopyan et al. 2012). Bei der Entwicklung zumindest einiger musikalischer Fähigkeiten besteht außerdem eine Verzögerung zwischen hörgeschädigten und normalhörenden Kindern. Van Besouw et al. (2011) führten eine Fragebogenstudie durch, bei denen die Eltern von Kindern mit CI Angaben über das Musikverhalten ihrer Kinder machten. Kinder mit CI begannen demnach mit 2 bis 3 Jahren zu singen, normalhörende Kinder bereits mit 1 bis 2 Jahren. Die CIs wurden im Durchschnitt mit 2 Jahren in Betrieb genommen, was die Verzögerung zwischen den beiden Gruppen erklärt. Es hebt außerdem die Wichtigkeit des Betrachtens des Höralters bei der Datenanalyse von Studienergebnissen auf diesem Gebiet hervor. Gleiches gilt für den Einfluss durch musikalisches Training auf normalhörende Kinder und solche mit CI. Dieses verbessert nicht nur musikalische, sondern auch sprachliche Fähigkeiten (Torppa und Huotilainen 2019; Cheng et al. 2018).

1.9 Problemstellung

Wie bereits oben erläutert, hat Musik einen hohen Stellenwert in der Gesellschaft und insbesondere in der Entwicklungsförderung von Kindern. Um auch CI-Trägern diese Vorteile nutzbar zu machen, ist es zunächst notwendig herauszufinden, was mit einem CI bereits geleistet werden kann und wo noch Verbesserungsbedarf besteht. Aus diesem Grund werden für die vorliegende Studie prälingual vollständig ertaubte Kinder mit CI ausgewählt, deren CI-Hören nicht durch akustische Hörerfahrung, sondern nur durch elektrische Hörerfahrung geformt ist. Dadurch wird ein Vergleichen des elektrischen Hörens mit der erinnerten akustischen Klangempfindung mit CI vermieden, die die Wahrnehmung beeinflussen könnte. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, werden Vergleichsdaten in einer Gruppe von normalhörenden Kindern erhoben. Da die Altersspannen von Probandengruppen bisheriger Studien meist zu klein sind, um eine eventuell bestehende Altersabhängigkeit musikalischer Fähigkeiten erkennen zu können, haben die in der vorliegenden Studie untersuchten Gruppen von Kindern ein breit gefächertes Altersspektrum (siehe Kapitel 2.1).

1.9.1 Studienablauf und Hypothesenaufstellung

Die bestehende Erfahrung mit Musik wird mithilfe eines kurzen Fragebogens (siehe Kapitel 2.3) erhoben, um sicherzustellen, dass beide Gruppen in diesem Punkt vergleichbar sind. Die Wahrnehmung von Konsonanz wird mittels dreier Experimente an einer Gruppe von mit CIs versorgten Kindern im Vergleich zu normalhörenden Gleichaltrigen untersucht.

Mit dem ersten Experiment wird getestet, ob die Probanden paarweise dargebotene, sich nur gering unterscheidende Akkorde diskriminieren können. Dies ist die Voraussetzung dafür, eine Kadenz als solche wahrnehmen zu können. Da Roy et al. (2014) bereits gezeigt haben, dass bei den CI-Trägern eine Diskriminationsfähigkeit von Akkorden vorhanden ist, stelle ich folgende Hypothese auf:

- (1) Die CI-Träger diskriminieren Akkorde oberhalb des Rateniveaus. Dabei sind sie dennoch weniger zuverlässig als die normalhörende Kontrollgruppe.

Das zweite Experiment testet, ob sich die Präferenz für verschiedene Akkordtypen zwischen CI-Trägern und Normalhörenden unterscheidet. Dafür werden unterschiedliche Akkorde paarweise vorgespielt. Die Probanden sollen entscheiden, ob sie den ersten oder zweiten Akkord als schöner empfinden. Ich stelle in Anbetracht der oben aufgeführten Herausforderungen des Hörens mit CI folgende Hypothese auf:

- (2) Die CI-Träger lernen zwar, die gleichen Akkorde zu bevorzugen wie Normalhörende, dieses Muster ist aber aufgrund der technischen Limitationen des CIs geringer ausgeprägt.

Das dritte Experiment überprüft, ob die CI-Träger dazu in der Lage sind, einen harmonisch korrekten Kadenzschluss zu erkennen. Dafür werden kurze harmonisierte Liedauschnitte vorgespielt, die mit einer korrekten Kadenz auf einem Dur-Akkord oder mit abgewandelter Kadenz enden. Die Probanden müssen entscheiden, ob das Stück gut oder schlecht endet. Dies stellt eine komplexere Aufgabe dar, da eine Abfolge mehrerer Akkorde bewertet werden muss. Das setzt neben der Diskriminationsfähigkeit voraus, dass mehrere akustische Stimuli ausreichend lang im Gedächtnis bleiben, um sie miteinander zu vergleichen. Obwohl Knobloch et al. (2018) gezeigt haben, dass nur wenige postlingual ertaubte adulte CI-Träger eine ähnliche Aufgabe bewältigen, stelle ich aufgrund der ausschließlich elektrischen Hörerfahrung bei prälingual ertaubten früh-implantierten CI-Trägern für das dritte Experiment folgende Hypothese auf:

- (3) Wenn die CI-Nutzer die Akkorde in Experiment 1 unterscheiden können und in Experiment 2 den Dur-Akkord gegenüber anderen Akkordtypen bevorzugen, dann können sie auch die Kadenzbewertung bewältigen. Dabei sind sie dennoch weniger zuverlässig als die normalhörende Kontrollgruppe.

Aufgrund des unter 1.6 und 1.8 geschilderten Einflusses des Alters, beziehungsweise der Hörerfahrung, auf die Entwicklung der musikalischen Fähigkeiten sowohl bei normalhörenden Kindern als auch bei Kindern mit CI stelle ich folgende weitere Hypothesen auf:

- (4) Die Leistung in Experiment 1 steigt für beide Gruppen mit zunehmender Hörerfahrung an.
- (5) In Experiment 2 wird das Präferenzmuster für die unterschiedlichen Akkordtypen für beide Gruppen mit steigender Hörerfahrung zunehmend ausgeprägter.
- (6) Die Leistung in Experiment 3 steigt für beide Gruppen mit zunehmender Hörerfahrung an.

2 Material und Methoden

2.1 Teilnehmer

Für die Studie wurden zwei Gruppen betrachtet. Die Messungen erfolgten dabei im Zeitraum von Dezember 2013 bis Oktober 2015. Ein gültiges, von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität befürwortendes Ethikvotum lag vor Beginn der Experimente vor (Anlage 1).

2.1.1 Cochlea-Implantat-Träger

Eine CI-Gruppe wurde über die regelmäßig einbestellten Patienten des Universitätsklinikums Magdeburg sowie des Cecilienstift Krankenhauses Halberstadt rekrutiert und bestand aus 13 Kindern und Jugendlichen. KCI07 wurde aufgrund von störendem Umgebungslärm während der Messung von der Auswertung ausgeschlossen. Die restlichen 12 Probanden waren im Alter von $7 \frac{7}{12}$ Jahren bis $18 \frac{11}{12}$ Jahren mit im Mittel $14 \frac{4}{12}$ Jahren ($SD = 3 \frac{4}{12}$ Jahre). Davon waren vier männliche und acht weibliche Teilnehmer, welche gleichmäßig über das Altersspektrum verteilt waren. Alle Teilnehmer der CI-Gruppe sind prälingual vollständig ertaubt und erhielten bis spätestens zur Vollendung des 3. Lebensjahres die Erstanpassung des ersten CIs. Im Mittel lag die CI Erfahrung bei $12 \frac{5}{12}$ Jahren ($SD = 3 \frac{3}{12}$ Jahre), mindestens jedoch bei 6 Jahren. Alle Teilnehmer waren mit Ausnahme von KCI02 bilateral mit Cochlea-Implantaten versorgt. Die demografischen Einzeldaten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Kein CI-Teilnehmer hatte weitere körperliche oder geistige Behinderungen. Alle sprachen Deutsch als Muttersprache und wurden von hörenden Sorgeberechtigten aufgezogen.

Teilnehmer	Alter bei Testung (Jahre)	Alter bei Erstanpassung (Jahre)	Höralter (Jahre)	CI-Modell	CI-Prozessor	CI-Kodierungsstrategie	Aktive Kanäle rechts/links	Untere Grenzfrequenz (Hz)	Obere Grenzfrequenz (Hz)
KCI01	15,6	1,6	14,0	Combi 40+ ¹	OPUS 2	FS4	12/12	100	8500
KCI02	16,8	2,1	14,7	Combi 40+ ¹ (unilateral)	OPUS 2	HDCIS	11/–	200	7000
KCI03	15,6	1,8	13,8	Combi 40+ ¹	OPUS 2	FS4	12/12	100	8500
KCI04	15,6	1,8	13,8	Combi 40+ ¹	OPUS 2	FS4	12/12	100	8500
KCI05	13,7	2,0	11,7	PULSAR ¹	OPUS 2	FSP	12/12	100	8500
KCI06	15,9	2,3	13,6	Combi 40+ ¹	OPUS 2	FSP	12/12	100	8500
KCI08	18,9	1,8	17,2	C124M ²	CP810	CIS	12/12	200	7146
KCI09	13,5	3,0	10,5	PULSAR 1000 ¹	OPUS 2	FSP	12/10	100	8000
KCI10	17,8	2,3	15,4	C124RE ²	CP910	ACE	18/18	188	6813
KCI11	7,6	1,6	6,0	HiRes90K Helix ³	Harmony	HiRes-Sw/ Fidelity 120	16/16	333	6665
KCI12	8,5	1,8	6,8	C124RE ²	CP910	ACE	22/22	188	6938
KCI13	13,2	1,0	12,2	C124M ²	CP910	ACE	22/22	188	7938

Tabelle 2: Demografische und Gerätedaten der CI-Träger. Die unteren und oberen Grenzfrequenzen stimmen bei den bilateral Implantierten jeweils für beide Seiten überein. Lediglich KCI02 ist unilateral implantiert. Die Fußnoten an den CI-Modellen kennzeichnen den Hersteller: MED-EL (1), Cochlear (2), Advanced Bionics (3).

2.1.2 Normalhörende Kinder und Jugendliche

Die zweite Gruppe diente als Kontrollgruppe. Sie wurde über das schwarze Brett für die Mitarbeiter der Universitätsklinik Magdeburg rekrutiert und bestand aus 25 normalhörenden (NH) Kindern und Jugendlichen. Die Ergebnisse des Probanden KNH18 wurden aufgrund einer technischen Störung im Versuchsaufbau von der Auswertung ausgeschlossen. Die übrigen 24 Probanden waren im Alter von $5\frac{10}{12}$ Jahren bis $18\frac{2}{12}$ Jahren mit im Mittel $12\frac{4}{12}$ Jahren ($SD = 3\frac{5}{12}$ Jahre). 14 der 24 Probanden waren männlich und zehn weiblich. Sie wurden dem Höralter der CI-Teilnehmer entsprechend ausgewählt; das Höralter der NH-Probanden entspricht ihrem Alter. Weitere Auswahlkriterien zur Teilnahme waren, dass sie außerhalb der Schule kein musikalisches Training, wie z.B. eine musiks schulische Ausbildung hatten, um mit der Gruppe der CI-Träger vergleichbar zu sein. Zusätzlich durfte der audiometrisch in Luftleitung gemessene Hörverlust 25 dB nicht übersteigen. Untersucht wurden dabei Frequenzen im Bereich zwischen 125 Hz und 8000 Hz. Alle NH-Probanden sprachen Deutsch als Muttersprache.

2.2 Versuchsaufbau

Die Probanden wurden einzeln getestet. Es war ihnen freigestellt zu entscheiden, ob die Eltern im Raum bleiben sollten. In diesem Falle saßen die Eltern hinter den Probanden außerhalb ihrer Reichweite, sodass keine Interaktion stattfinden konnte. Die Messungen wurden in einem schallgedämmten Raum im Freifeld durchgeführt. Dabei stand ein Lautsprecher (Reveal R5A, Tannoy Ltd., Coatbridge, UK) 1,30 m entfernt frontal vor dem jeweiligen Probanden mit der Oberkante etwa auf Stirnhöhe. Die Lautstärke wurde so eingestellt, dass der jeweilige Proband sie als angenehm empfand. Der Versuchsaufbau war für beide Gruppen gleich, sodass die Signaleinspeisung in das CI über den Mikrofoneingang des jeweiligen CI-Trägers erfolgte. Die CI-Träger behielten die Einstellungen ihrer CIs bei und nutzten bei beidseitiger Implantation beide Implantate. Damit sollte sichergestellt werden, dass tatsächlich der alltägliche Höreindruck mit dem CI untersucht wird. Die Probanden saßen auf einem unbeweglichen Stuhl und erhielten die Instruktionen über einen Touchscreen, auf dem sie auch antworteten.

Mithilfe von MATLAB (The Mathworks Inc., Natick MA, USA) wurden die Stimuluspräsentation, Antwortdokumentation sowie Bedienoberfläche kontrolliert.

Die verwendeten Stimuli waren in allen drei Experimenten Akkorde, die aus vier Komplextönen bestanden. Jeder Komplexton war aus den fünf kleinsten Vielfachen der Grundfrequenz F_0 mit zufälligen Phasen und einem Abfall um 6 dB pro Teilton aufgebaut.

2.3 Fragebogen

Um abschätzen zu können, wie viel Erfahrung mit Musik bei den individuellen Probanden zum Zeitpunkt der Messung bestand, habe ich in Zusammenarbeit mit meinem Betreuer Dr. M. Böckmann-Barthel einen Fragebogen erstellt (Anlage 2). Dieser ist angelehnt an den MUMU, welcher erstellt wurde, um Musikhörgewohnheiten von CI-Trägern zu eruieren (Brockmeier 2008). Dieser für postlingual ertaubte Erwachsene entwickelte Fragebogen enthält jedoch überwiegend Fragestellungen, die irrelevant für prälingual ertaubte Kinder sind. In Anlehnung daran haben wir einen eigenen Bogen aus sechs Fragen für beide Gruppen sowie zwei zusätzlichen Fragen für die CI-Träger erstellt.

2.4 Vortest

Um die Probanden mit dem Versuchsaufbau vertraut zu machen, wurde dem Versuch ein kurzer visueller Test vorangestellt. Dieser war analog zum ersten Experiment und nutzte die gleiche Benutzeroberfläche. Dabei wurden zwei aufeinanderfolgende Bilder gezeigt. Es wurden die orangene Maus, die gelbe Ente und der blaue Elefant der Kinderfernsehserie „Die Sendung mit der Maus“ verwendet. Die Aufgabe lautete „Sind die Bilder gleich oder verschieden?“. Es gab zwei Antwortknöpfe: Der erste hatte die Aufschrift „Ja“ und zeigte darunter zwei identische rosafarbene Dreiecke. Der zweite hatte die Aufschrift „Nein“ und zeigte ein rosafarbenes Dreieck und einen gelben Kreis, um die Aussagen zu verdeutlichen. Bereits nach wenigen Wiederholungen wurde deutlich, ob die Kinder mit der Aufgabe und der Benutzeroberfläche zurechtkamen. Alle Teilnehmer lösten den Test zu 100% korrekt. Daher war sichergestellt, dass selbst die jüngsten Teilnehmer diese Aufgabenform verstanden.

2.5 Experiment 1

Experiment 1 testete die Fähigkeit paarweise dargebotene Akkorde zu diskriminieren. Die in Experiment 1 verwendeten Akkordpaare wurden mithilfe von MATLAB generiert. Es wurden Paare von Akkorden präsentiert, deren Einzeltöne einen Abstand von mindestens 6 HTS hatten. Verwendet wurden dabei die vier Akkordtypen Dur, Moll, übermäßiger und verminderter Akkord (Abbildung 2), welche gleichmäßig auf 48 Akkordpaare aufgeteilt wurden. 24 davon boten zwei gleiche Akkorde, 24 hingegen verschiedene dar. Daraus wurden vier Stimuluslisten mit je 12 Akkordpaaren erstellt.

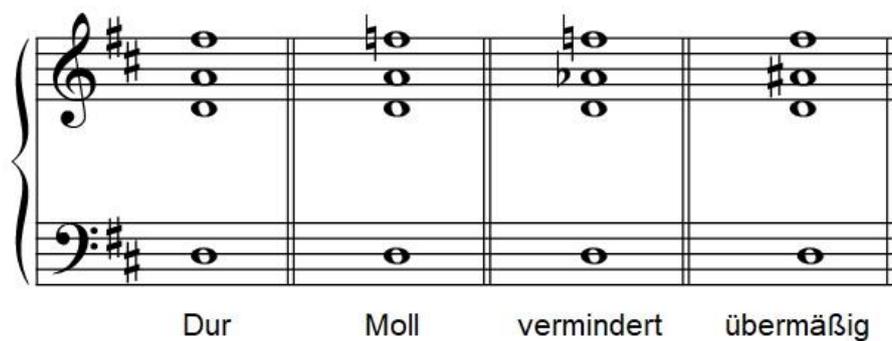


Abbildung 2: Notenbeispiel der verwendeten Akkordtypen in Experiment 1 und 2

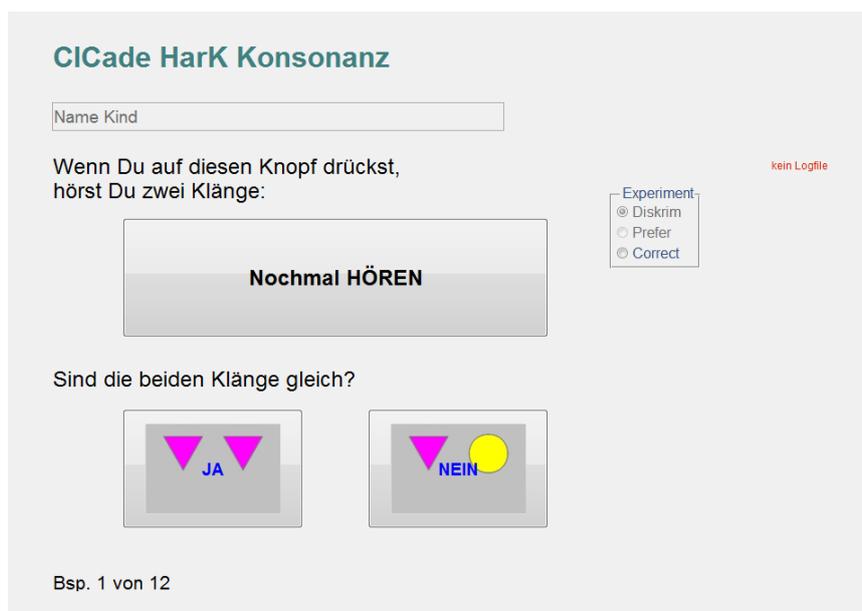


Abbildung 3: Ansicht der Benutzeroberfläche für Experiment 1

Die Akkorde waren auf fünf verschiedenen, zufällig verteilten Grundtönen aufgebaut, die jeweils 1 HTS auseinander lagen, entsprechend F0 von 125 Hz, 132 Hz, 140 Hz, 148 Hz sowie 157 Hz. Die Akkorde eines Paares hatten die gleiche Grundfrequenz und wurden mit einem Abstand von 2000 ms dargeboten bei einer Dauer von jeweils 1500 ms, einschließlich von je 80 ms für \cos^2 -Rampen, die die Akkorde ein- und ausleiteten. Die Aufgabenstellung „Wenn Du auf diesen Knopf drückst, hörst Du zwei Klänge. Sind die beiden Klänge gleich?“ wurde auf der Benutzeroberfläche angezeigt. Dazu waren die beiden Antwortknöpfe wie im Vortest zu sehen (Abbildung 3).

2.6 Experiment 2

In Experiment 2 wurde wie bei Knobloch et al. (2018) untersucht, ob die Probanden bestimmte Akkordtypen präferieren. Hierfür wurden die gleichen Akkorde wie in Experiment 1 verwendet. Es wurden ebenfalls 48 Akkordpaare dargeboten, welche jedoch alle aus je zwei unterschiedlichen Akkorden bestanden. Die Akkordpaare waren in vier Listen zu je 12 Items aufgeteilt. Auf der Benutzeroberfläche war zu lesen „Wenn Du auf diesen Knopf drückst, hörst Du zwei verschiedene Klänge. Welcher der beiden Klänge klingt schöner?“. Die beiden Antwortknöpfe waren hier mit „1“ und „2“ beschriftet (Abbildung 4).



Abbildung 4: Ansicht der Benutzeroberfläche für Experiment 2

2.7 Experiment 3

In Experiment 3 wurde die Fähigkeit zum Erkennen eines typischen Kadenzschlusses untersucht. Um die Aufmerksamkeit insbesondere der jüngeren Probanden zu erhöhen, wurden anstelle abstrakter Kadenzen, wie bei Knobloch et al. (2018), die Schlusstakte von acht Kinderliedern vierstimmig mit der Software capella 7 (capella-software AG, Söhrewald) im MIDI-Format generiert. Die MIDI-Dateien wurden mithilfe eines MATLAB-Codes (Schutte 2012) mit den oben beschriebenen Fünf-Ton-Komplexen resynthetisiert und als WAV-Dateien gespeichert. Alle Lieder endeten auf der gleichen Dominante-Tonika-Kadenz in enger Grundstellung. Sie unterschieden sich lediglich in der dem jeweiligen Lied zugeordneten Tonart in Halbtonschritten von D-Dur bis As-Dur (Anlage 3). Das Frequenzspektrum der beiden Schlussakkorde reichte von 100 Hz bis 2330 Hz. Jedes Lied wurde insgesamt acht Mal präsentiert: vier Male davon in der beschriebenen Originalfassung, zwei Mal mit einem verminderten und zwei Mal mit einem übermäßigen Akkord endend. Dabei stellen die beiden letzteren Schlussakkorde einen nach musikalischen Regeln falschen Abschluss dar. Die Hörbeispiele hatten abhängig von ihrem Tempo und Metrum eine Dauer von 7,5 s bis 8,2 s, wobei der Schlussakkord zwischen 950 ms bis 1800 ms dauerte. Die Dauer eines jeden Liedes war in der Original- und der veränderten Variante identisch. Es wurden vier Listen mit je 16 Stimuli erstellt. Auf der Benutzeroberfläche stand die Frage „Wenn Du auf diesen Knopf drückst, hörst Du ein kurzes Stück Musik. Endet das Stück gut oder schlecht?“. Ein Antwortknopf war mit „Gut“ beschriftet und zeigte darunter einen grünen, lächelnden Smiley. Der andere war mit „Schlecht“ beschriftet und zeigte darunter einen roten, unzufriedenen Smiley (Abbildung 5). Den Probanden wurde erläutert, dass „gut“ synonym für „angenehm“ und „abschließend“ stand. „Schlecht“ wiederum wurde als „unangenehm“ und „nicht abschließend“ erklärt.

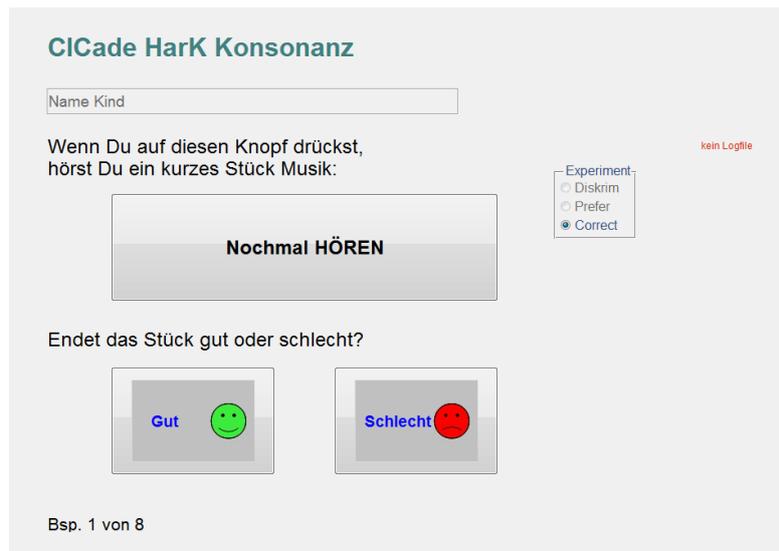


Abbildung 5: Ansicht der Benutzeroberfläche für Experiment 3

2.8 Durchführung

Bevor der Versuch begann, füllten die Probanden eigenständig oder mit Hilfe der Eltern und dem Versuchsleiter den Fragebogen (Anlage 2) aus. Anschließend wurde mit dem Vortest begonnen, auf dessen erfolgreiche Durchführung die drei Experimente folgten, welche insgesamt etwa 45 min dauerten. Die Experimente wurden in jeweils vier Blöcke bestehend aus je einer Stimulusliste pro Experiment eingeteilt.

Zu Beginn eines jeden Experimentes im ersten Block wurde die jeweilige Aufgabenstellung auch verbal durch den Versuchsleiter wiedergegeben. Des Weiteren wurden die Probanden aufgefordert, mit ihren eigenen Worten auszudrücken, wie die Aufgabe lautet, um sicherzustellen, dass sie korrekt verstanden wurde. Die Probanden bestimmten in allen drei Experimenten selbst, wann die Hörbeispiele abgespielt werden sollten und durften sie beliebig oft wiederholen, was jedoch kaum in Anspruch genommen wurde. Es gab keine zeitliche Einschränkung zur Bearbeitung der Aufgaben. Den Teilnehmern wurden Pausen zwischen den Blöcken angeboten.

2.9 Datenanalyse

Zur Auswertung von Experiment 1 und 3 wurde die Signalentdeckungstheorie herangezogen. Dazu wurden Trefferraten (HR) und Falschalarmraten (FR) in den Sensitivitätsindex d' überführt (Macmillan und Creelman 1990). Er gibt an, um wie viele Standardabweichungen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die gegebenen Antworten zur Einstufung als Target

(Zielreiz) und Distraktor (Ablenkungsreiz, „falsch-Alternative“) auseinanderliegen. Je weniger diese überlappen, je größer also d' ist, desto sicherer kann der jeweilige Proband diskriminieren. Ein $d' = 0$ entspricht einer vollständigen Überlappung der beiden Funktionen, was ein Agieren auf Rateniveau bedeutet (Stanislaw und Todorov 1999). Für Werte von $d' \geq 1$ wird eine ausreichend gute Diskriminationsfähigkeit angenommen. In Experiment 1 wurde die gegebene Antwort „Ja“ (gleich) bei tatsächlich gleichen Akkorden (Target) einem Treffer zugeordnet. Die Antwort „Ja“ (gleich) bei verschiedenen Akkorden (Distraktor) wurde als falscher Alarm gewertet. In Experiment 3 entsprach die Beurteilung der Endungen der Originalfassungen der Lieder (Target) als „gut“ einem Treffer. Die Einschätzung einer veränderten Endung eines Liedes (Distraktor) als „gut“ entsprach einem falschen Alarm.

Die Trefferrate errechnet sich aus

$$HR = \frac{\text{Treffer}}{\text{Anzahl Targets}}$$

Die Falschalarmrate errechnet sich aus

$$FR = \frac{\text{falsche Alarme}}{\text{Anzahl Distraktoren}}$$

Führt man für diese beiden Raten die z -Transformation durch, lässt sich daraus der Sensitivitätsindex d' mittels

$$d' = z(HR) - z(FR)$$

berechnen. Da bei Raten von 0 oder 1 die resultierende z -Funktion gegen unendlich strebt, wurden solche Werte korrigiert (Stanislaw und Todorov 1999). Dafür wurden perfekte Trefferraten von 1 mit $\frac{1}{2n}$ ersetzt, wobei n die Anzahl der Distraktoren ist. Perfekte Falschalarmraten von 0 wurden mit $1 - \frac{1}{2m}$ ersetzt, wobei m die Anzahl der Targets ist. Anhand dieser Korrekturformel ergibt sich aufgrund unterschiedlicher Zahlen der präsentierten Reize ein maximales $d' = 4,07$ für Experiment 1 und $d' = 4,31$ für Experiment 3. Um herauszufinden, ob die Probanden eine Antworttendenz zu einer Antwort haben, wurde die Antworttendenz c

aus der Signalentdeckungstheorie verwendet (Macmillan und Creelman 1990). Sie berechnet sich wie folgt:

$$c = -0,5(z(\text{HR}) + z(\text{FR}))$$

c gibt in Standardabweichungen an, inwieweit die Versuchsperson zu einer der beiden Antwortalternativen tendiert. Dabei bedeutet 0, dass keine Antwort bevorzugt wird. Ein $c < 0$ bedeutet eine Tendenz dazu, Distraktoren als Target zu bewerten. Das entspricht der Tendenz zur Antwort „Ja“ (gleich) bei verschiedenen Akkorden in Experiment 1, bzw. „Gut“ bei den veränderten Melodien in Experiment 3. Ein $c > 0$ bedeutet dementsprechend die Tendenz dazu, Targets als Distraktoren einzustufen. Je größer die Abweichung von 0, desto eher neigt der Proband dazu, die jeweilige Antwort zu geben. Zum Beispiel würde ein Proband im ersten Experiment mit einem $c < 0$ bei zwei Akkorden, die sich nur gering unterscheiden häufiger die Antwort „gleich“ wählen.

Für die Auswertung von Experiment 2 wurde ein Punktesystem verwendet. Bei jeder Antwort wurde dem bevorzugten Akkordtyp der Wert +1 zugeordnet, dem nicht bevorzugten Akkordtyp der Wert -1. Anschließend wurden diese Werte über alle Durchläufe aufsummiert, sodass sich ein möglicher Bereich von -24 bis 24 pro Akkordtyp ergab (vgl. Tufts et al. 2005). Um die Übereinstimmung mit der musiktheoretisch und psychoakustisch erwarteten Konsonanz zu prüfen, wurden die Akkorde mit absteigendem Dissonanzgrad (Dur – Moll – vermindert – übermäßig, vgl. Roberts 1986) in einem Diagramm auf der Abszisse angeordnet. Darüber wurden die entsprechenden Punktzahlen aufgetragen. Es wurde eine Trendlinie hindurchgelegt, deren Anstieg a das gesuchte Vergleichsmaß darstellt. Je steiler die Trendlinie fällt, desto ausgeprägter entspricht das Antwortmuster der Erwartung.

Der Fragebogen (vergleiche Anlage 2) wurde mithilfe der Punktzahl S ausgewertet, die sich wie folgt errechnet:

- | | | |
|----------------|--|----------------|
| 1. – 3. Frage: | 0 Punkte: | 0 Halbjahre |
| | 1 Punkt: | 1-7 Halbjahre |
| | 2 Punkte: | 8-14 Halbjahre |
| | 3 Punkte: | >14 Halbjahre |
| 4. – 6. Frage: | Die vergebenen Punkte entsprechen den Angaben auf den Likert-Skalen. | |

Es konnte eine maximale Punktzahl von 18 Punkten erreicht werden. Je höher die Punktzahl, desto höher war die Musikaktivität des jeweiligen Probanden.

Die statistische Auswertung erfolgte mit SPSS Statistics Version 24 (IBM, Armonk NY, USA). Dabei wurde ein t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich d' für Experiment 1 und 3, sowie a für Experiment 2 und die Punktzahl des Fragebogens zwischen den beiden Gruppen unterscheiden. Die Testung gegen 0 erfolgte mithilfe eines unabhängigen zweiseitigen t-Tests für c für Experiment 1 und 3, um eine etwaige Antworttendenz aufzudecken. Zur Überprüfung der Nullhypothese in Experiment 2, ob alle Akkordtypen gleich bewertet werden, wurde für jede Gruppe eine ANOVA mit dem Faktor „Akkordtyp“ durchgeführt. Im Falle eines signifikanten Ergebnisses wurde mittels Post-hoc-t-Tests paarweise überprüft, welche Akkordtypen unterschiedlich bewertet wurden. Der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aller drei Experimente und dem Höralter, wie auch der Fragebogenpunktzahl wurde mit der Pearson-Korrelation überprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Experiment 1

Mit Experiment 1 wurde überprüft, ob die Probanden in der Lage sind, zwei Akkorde zu diskriminieren. Die CI-Träger erreichten im Mittel ein $d' = 1,19$ (SD = 0,86). Bei Betrachtung der Einzeldaten hatten jedoch fünf der 12 CI-Träger ein $d' < 1$. Im Gegensatz dazu haben nur zwei der 24 NH ein $d' < 1$. Die NH-Probanden erreichten ein mittleres $d' = 2,00$ (SD = 0,90), welches sich signifikant von den CI-Trägern unterscheidet, $t(34) = 2,584$; $p < 0,05$ (Abbildung 6). Die Streuung der Daten zeigt, dass trotz insgesamt durchschnittlich guter Leistung diese Aufgabe auch für die NH-Probanden eine Herausforderung darstellt, zumal kein einziger Proband ein perfektes d' erreichte (Abbildung 7). Zwischen dem Höralter der CI-Träger und dem erreichten d' wurde eine signifikante positive Korrelation gefunden, was einen Lerneffekt dieser Fähigkeit anzeigt, $r = 0,654$; $p < 0,05$. In der Gruppe der NH-Probanden war die Korrelation zwischen Höralter und d' nicht signifikant, $r = 0,378$; $p > 0,05$. Der Zusammenhang zwischen d' und dem Höralter ist für Experiment 1 in Abbildung 8 dargestellt.

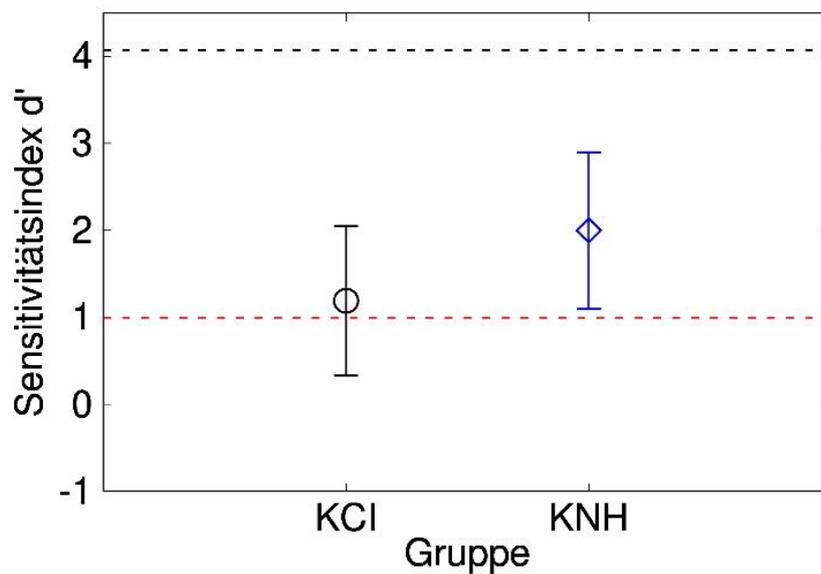


Abbildung 6: Mittelwert mit Standardabweichung des Sensitivitätsindex d' aus Experiment 1. Kinder mit CI (KCI, links), NH-Kinder (KNH, rechts), $d' = 1$ als Cut-off-Wert, ab wann eine Diskriminationsleistung als ausreichend sicher angenommen wird (---), maximal zu erreichendes $d' = 4,07$ (---)

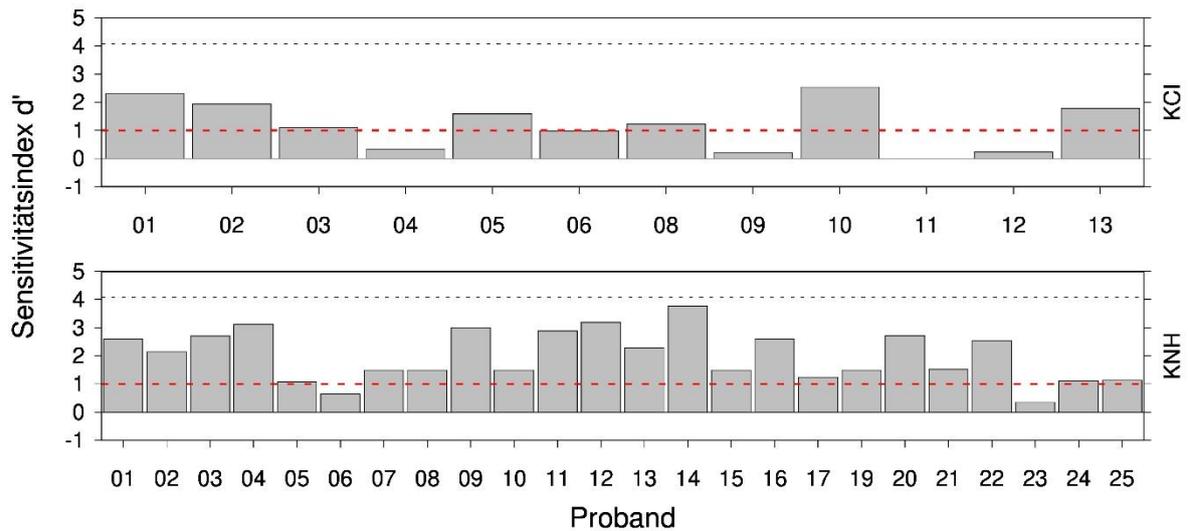


Abbildung 7: Darstellung der Einzelwerte des Sensitivitätsindex d' aus Experiment 1. Kinder mit CI (KCI, oben), NH-Kinder (KNH, unten), $d' = 1$ als Cut-off-Wert, ab wann eine Diskriminationsleistung als ausreichend sicher angenommen wird (---), maximal zu erreichendes $d' = 4,07$ (- - -)

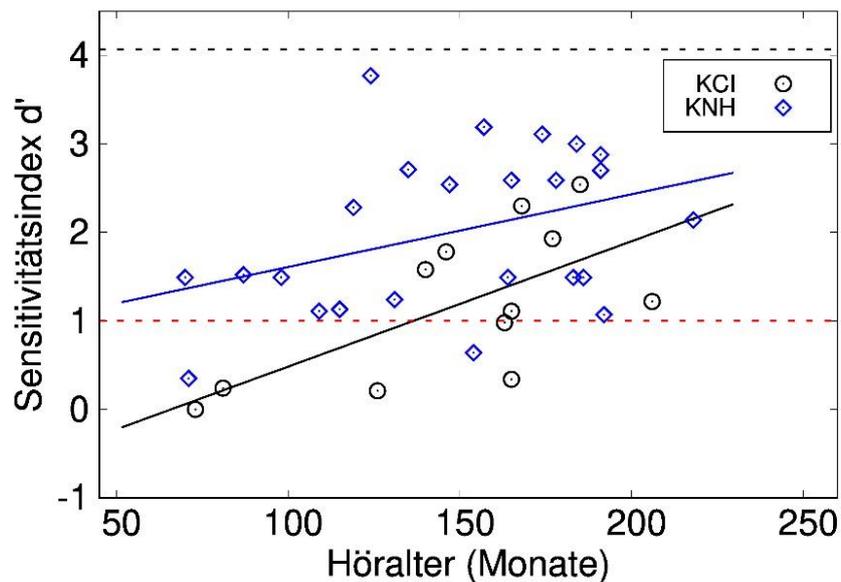


Abbildung 8: Darstellung des Sensitivitätsindex d' aus Experiment 1 in Abhängigkeit vom Höralter. Kinder mit CI (KCI, — Korrelationsgerade), NH-Kinder (KNH, — Korrelationsgerade), $d' = 1$ als Cut-off-Wert, ab wann eine Diskriminationsleistung als ausreichend sicher angenommen wird (---), maximal zu erreichendes $d' = 4,07$ (- - -)

In der Abbildung 9 wird das Antwortverhalten der individuellen Teilnehmer beider Gruppen mithilfe eines Streudiagramms, in dem die Trefferrate über der Falschalarmrate aufgetragen ist, verdeutlicht. Ein Punkt auf der Diagonalen entspricht dem Rateniveau. Liegt ein Punkt hingegen in der linken oberen Ecke, zeigt das ein perfektes Antworten des Teilnehmers an. Je höher die Falschalarmrate bei gleichzeitig hoher Trefferrate ist, desto höher ist die Tendenz dazu, Distraktoren als Targets einzustufen ($c < 0$; rechte obere Ecke). Je niedriger die Falschalarmrate bei gleichzeitig niedriger Trefferrate ist, desto höher ist die Tendenz dazu, Targets als Distraktoren einzustufen ($c > 0$; linke untere Ecke). Für die CI-Nutzer betrug die Antworttendenz durchschnittlich $c = -0,25$ ($SD = 0,64$), was nicht signifikant von 0 verschieden ist, $t(11) = -1,334$; $p > 0,05$ und daher keine Tendenz zu einer Antwortalternative anzeigt. Die NH-Probanden hatten im Mittel ein $c = -0,34$ ($SD = 0,47$), welches signifikant von 0 verschieden ist, $t(23) = -3,681$; $p = 0,001$. Das bedeutet eine Tendenz dazu, zwei unterschiedliche Akkorde als gleich zu bewerten. Zu erkennen ist dies in Abbildung 9, da es trotz sehr guter Trefferraten von im Mittel 88 % ($SD = 14\%$) vergleichsweise hohe Falschalarmraten mit einem Mittelwert von 29% ($SD = 19\%$) gibt.

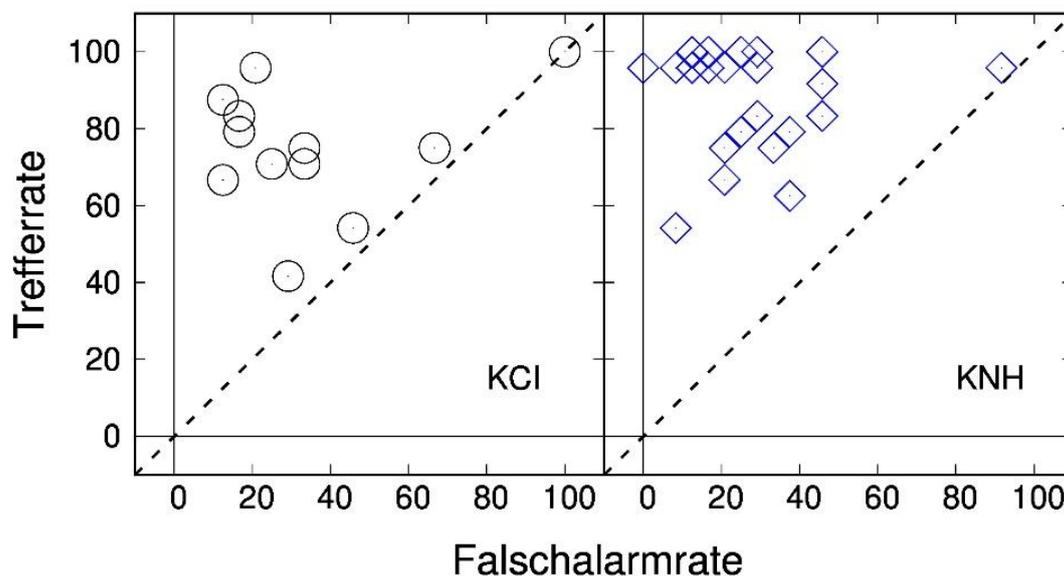


Abbildung 9: Darstellung des Antwortverhaltens für Experiment 1 mittels Trefferraten über den Falschalarmraten. Kinder mit CI (KCI, links), NH-Kinder (KNH, rechts), Rateniveau (- - -)

3.2 Experiment 2

Mit Experiment 2 wurden die Präferenzen für bestimmte Akkordtypen untersucht. Für die CI-Träger ergeben sich folgende Mittelwerte der Akkordtypen (siehe 2.5): Dur 5,5 Punkte (SD = 7,1 Punkte), Moll 3,8 Punkte (SD = 5,3 Punkte), übermäßig -3,2 Punkte (SD = 7,1 Punkte), vermindert -6,2 Punkte (SD = 4,5 Punkte). Das ist scheinbar eine leichte Abweichung von der musikologisch erwarteten Reihenfolge, da der verminderte Akkord etwas besser bewertet wurde als der übermäßige Akkord (Abbildung 10). Eine Varianzanalyse zeigt, dass die Punktzahl signifikant vom Faktor Akkordtyp abhängig ist, $F(1,66; 18,26) = 7,58; p < 0,01$. In den Post-hoc-t-Tests ergab sich, dass Dur- und Mollakkorde signifikant mehr Punkte als verminderte Akkorde erhielten, $p < 0,05$.

Für die NH-Probanden ergaben sich folgende mittlere Punktzahlen: Dur 8,3 Punkte (SD = 6,9 Punkte), Moll 1,4 Punkte (SD = 7,9 Punkte), vermindert -4,7 Punkte (SD = 5,2 Punkte) und übermäßig -5,0 Punkte (SD = 6,4 Punkte) (Abbildung 10). Diese Reihenfolge stimmt mit der gängigen Musiktheorie überein. Eine ANOVA, die für die NH-Gruppe durchgeführt wurde, zeigte ebenfalls eine hochsignifikante Abhängigkeit der Punktzahl vom Faktor Akkordtyp, $F(2,43; 55,84) = 15,92; p < 0,001$. Post-hoc-t-Tests zeigten hier, dass Dur- und Mollakkorde hochsignifikant mehr Punkte als verminderte und übermäßige Akkorde erhielten, $p < 0,001$.

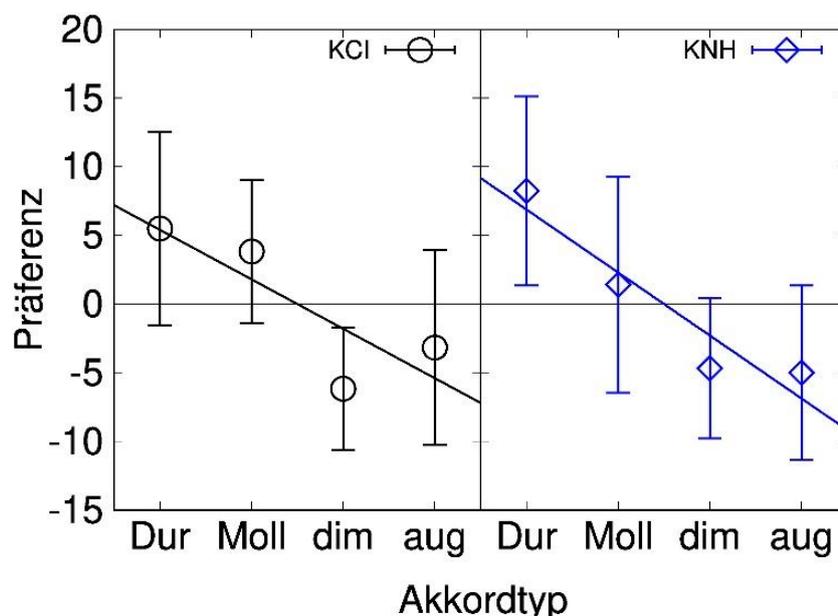


Abbildung 10: Präferenz der Akkordtypen mit Trendlinien. Kinder mit CI (KCI, links), NH-Kinder (KNH, rechts), verminderte Akkorde (dim), übermäßige Akkorde (aug)

Die Akkordpunktzahlen wurden in der unter Kapitel 2.5 erläuterten Reihenfolge aufgetragen und der Anstieg a der resultierenden Trendlinien ermittelt. Für die CI-Träger betrug er im Mittel $a = -3,6$ ($SD = 4,7$) und für die NH $a = -4,6$ ($SD = 4,0$). Des Weiteren bestätigt ein t-Test, dass es keinen signifikanten Unterschied der Anstiege und damit der Akkordbewertung zwischen den beiden Gruppen gab, $t(34) = -0,663$; $p > 0,05$. Für die CI-Träger konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Höralter und dem Anstieg a nachgewiesen werden, $r = -0,248$; $p > 0,05$. Für die NH-Probanden ergab sich jedoch eine signifikante negative Korrelation zwischen Alter und Anstieg a , $r = -0,480$; $p < 0,05$, die ein zunehmend ausgeprägtes musikologisch zu erwartendes Antwortmuster mit steigendem Alter anzeigt (Abbildung 11).

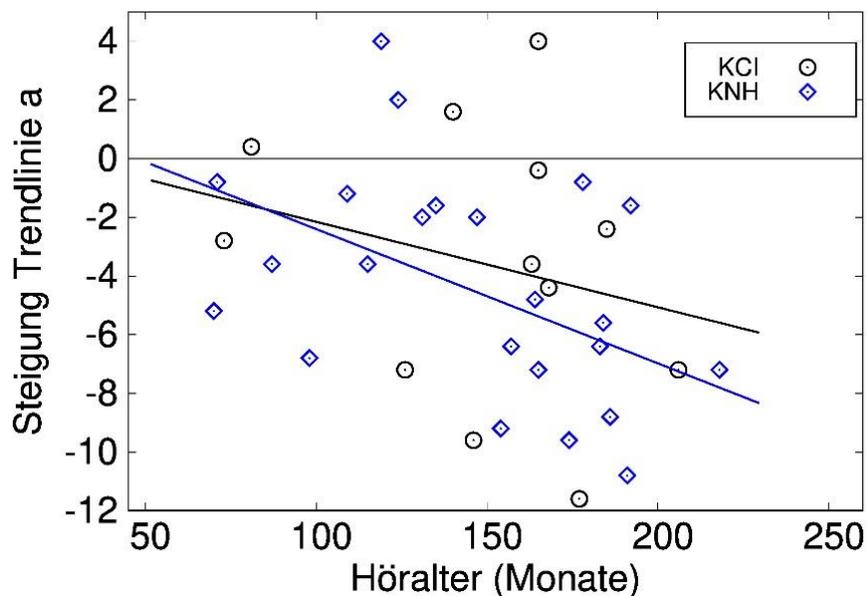


Abbildung 11: Darstellung der Steigungen der Trendlinien aus Experiment 2 in Abhängigkeit vom Höralter. Kinder mit CI (KCI, — Korrelationsgerade), NH-Kinder (KNH, — Korrelationsgerade)

3.3 Experiment 3

Mit Experiment 3 wurde die Empfindung von Kadenzschlüssen untersucht. Im Mittel erreichten die CI-Träger ein $d' = -0,10$ ($SD = 0,42$). Der höchste erreichte Wert der CI-Träger war bei Teilnehmer KCI13 $d' = 0,57$, wohingegen 14 der 24 NH-Probanden die Aufgabe perfekt lösten (Abbildung 12). Im Mittel betrug $d' = 3,7$ ($SD = 1,1$). Nur Teilnehmer KNH23 lag unterhalb von $d' = 1,0$. Der t-Test bestätigte, dass der Unterschied zwischen den beiden Gruppen signifikant ist, $t(34) = 15,592$; $p < 0,001$ (Abbildung 13).

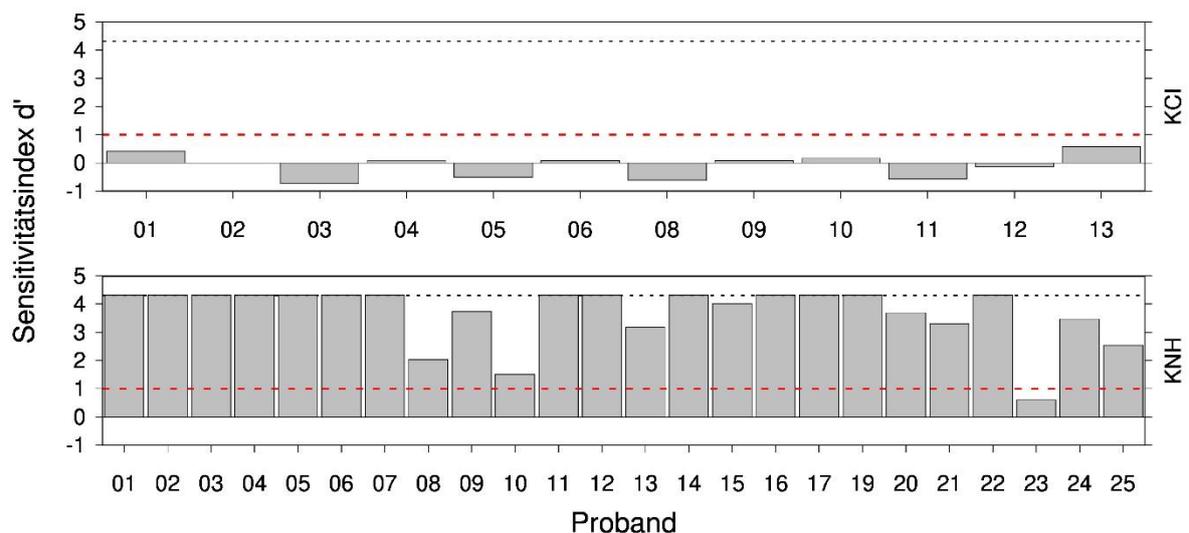


Abbildung 12: Darstellung der Einzelwerte des Sensitivitätsindex d' aus Experiment 3. Kinder mit CI (KCI, oben), NH-Kinder (KNH, unten), $d' = 1$ als Cut-off-Wert, ab wann eine Diskriminationsleistung als ausreichend sicher angenommen wird (---), maximal zu erreichendes $d' = 4,07$ (- - -)

Für die CI-Träger wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen Höralter und d' gefunden, $r = 0,133$; $p > 0,05$ jedoch bestand eine signifikante positive Korrelation zwischen Alter und d' für die NH Probanden, $r = 0,598$; $p < 0,01$ (Abbildung 14). Die Antworttendenz betrug für die CI-Träger $c = -0,31$ (SD = 0,41), welche sich signifikant von 0 unterscheidet, $t = -2,581$; $p < 0,05$ und damit die Neigung anzeigt, auch die veränderten Melodien als „gut“ zu bewerten. Die NH-Probanden hatten ein mittleres $c = 0,03$ (SD = 0,31), welches sich nicht signifikant von 0 unterscheidet, $t(23) = 0,437$; $p > 0,05$ und damit keine Tendenz zu einer Antwort anzeigt. In Abbildung 15 sind die Trefferraten über den Falschalarmraten dargestellt und verdeutlichen die getroffenen Aussagen zum Antwortverhalten beider Gruppen (vergleiche Abbildung 9).

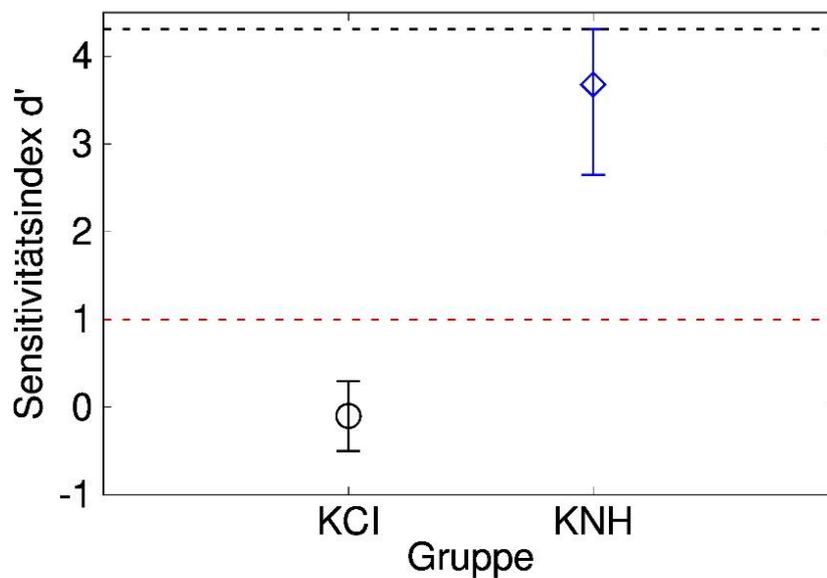


Abbildung 13: Mittelwert mit Standardabweichung des Sensitivitätsindex d' aus Experiment 3. Kinder mit CI (KCI, links), NH-Kinder (KNH, rechts), $d' = 1$ als Cut-off-Wert, ab wann eine Diskriminationsleistung als ausreichend sicher angenommen wird (---), maximal zu erreichendes $d' = 4,31$ (---)

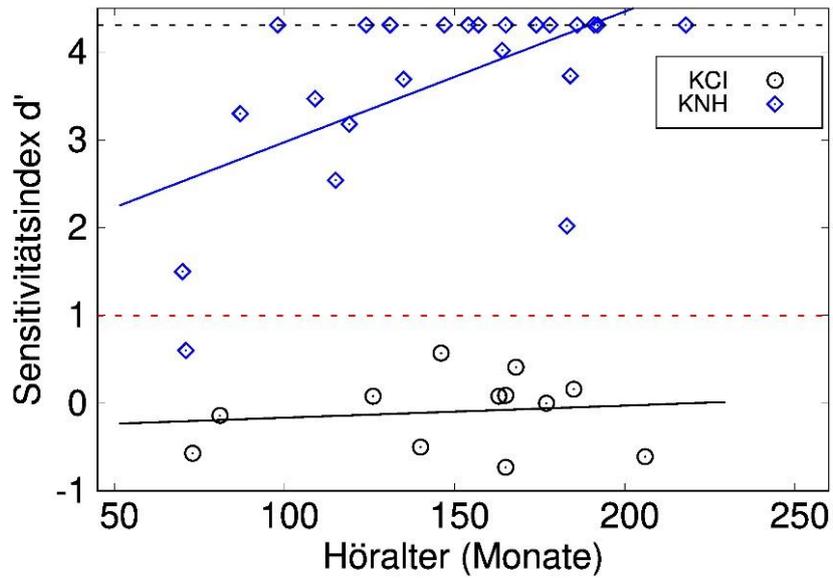


Abbildung 14: Darstellung des Sensitivitätsindex d' aus Experiment 3 in Abhängigkeit vom Höralter: Kinder mit CI (KCI, — Korrelationsgerade), NH-Kinder (KNH, — Korrelationsgerade), $d' = 1$ als Cut-off-Wert, ab wann eine Diskriminationsleistung als ausreichend sicher angenommen wird (- - -), maximal zu erreichendes $d' = 4,07$ (- - -)

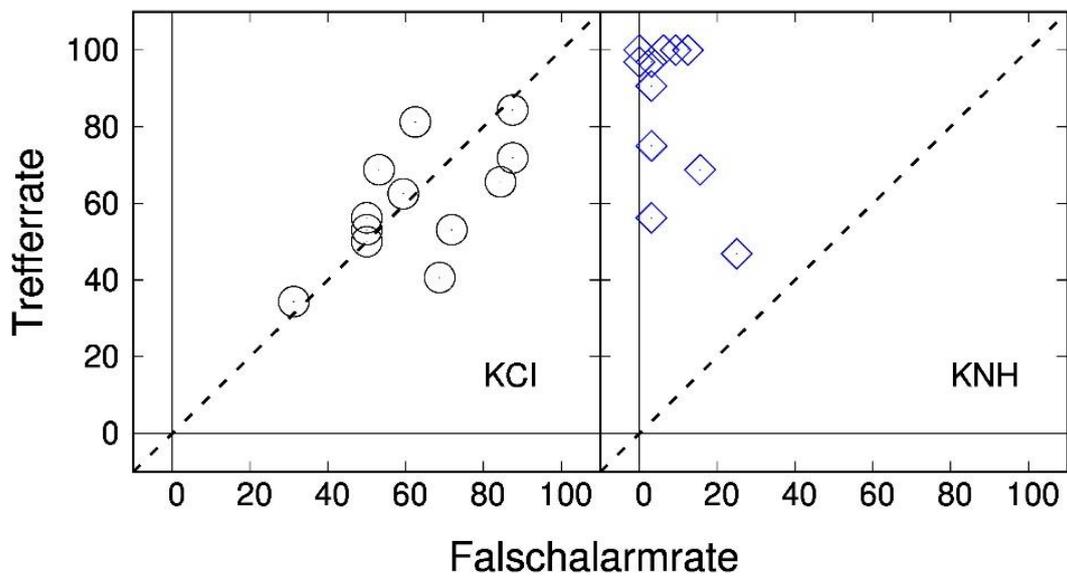


Abbildung 15: Darstellung des Antwortverhaltens für Experiment 3 mittels Trefferraten über den Falschalarmraten. Kinder mit CI (KCI, links), NH-Kinder (KNH, rechts), Rateniveau (- - -)

3.4 Fragebogen

Ausgewertet wurden nur elf von 12 Fragebögen der CI-Träger, da KCI04 den Bogen nicht vollständig ausgefüllt hatte und anschließend nicht mehr verfügbar war. In dieser Gruppe fielen zudem bei mehreren Probanden widersprüchliche Angaben der beiden Zusatzfragen auf. Aus diesem Grund wurden diese beiden Fragen von der Auswertung ausgeschlossen. Die deskriptive Auswertung der einzelnen Fragen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Gruppe	Anzahl Probanden		Punktzahl Minimum		Punktzahl Maximum		Punktzahl Mittelwert		Punktzahl Standardabweichung	
	CI	NH	CI	NH	CI	NH	CI	NH	CI	NH
Halbjahre schulischer Musikunterricht	11	24	1	0	20	20	9,18	11,08	6,15	6,42
Halbjahre außerschulischer Instrumentalunterricht	11	24	0	0	7	6	1,82	0,71	3,13	1,45
Halbjahre Chorerfahrung	11	24	0	0	8	24	0,73	1,67	2,41	5,30
Instrumentalerfahrung	11	24	0	0	3	1	1,23	0,54	0,98	0,51
Singen	11	24	0	0	2	3	0,73	1,69	0,90	1,16
Musikhören	11	24	2	2	3	3	2,73	2,79	0,47	0,41

Tabelle 3: Musikerfahrung von CI-Trägern und NH-Probanden laut Fragebogen. Für das Punktevergabeprinzip für die einzelnen Bereiche siehe 2.9 und Anlage 2.

Die erreichten Punktzahlen finden sich als Einzeldaten in Abbildung 16. Im Mittel lag die Punktzahl der CI-Träger bei $S = 6,9$ ($SD = 1,7$) und für die NH-Probanden bei $S = 7,5$ ($SD = 2,0$). Der Unterschied der mittleren Punktzahlen zwischen den beiden Gruppen war nicht signifikant, $t(33) = -0,906$; $p > 0,05$ (Abbildung 17). Es ergab sich in keiner Gruppe eine signifikante Korrelation mit der Punktzahl und d' von Experiment 1, $r_{CI} = -0,290$; $p > 0,05$; $r_{NH} = 0,167$; $p > 0,05$, dem Anstieg a von Experiment 2, $r_{CI} = 0,502$; $p > 0,05$; $r_{NH} = -0,235$; $p > 0,05$, d' von Experiment 3, $r_{CI} = -0,584$; $p > 0,05$; $r_{NH} = 0,351$; $p > 0,05$ sowie dem Höralter, $r_{CI} = -0,182$; $p > 0,05$; $r_{NH} = 0,306$; $p > 0,05$.

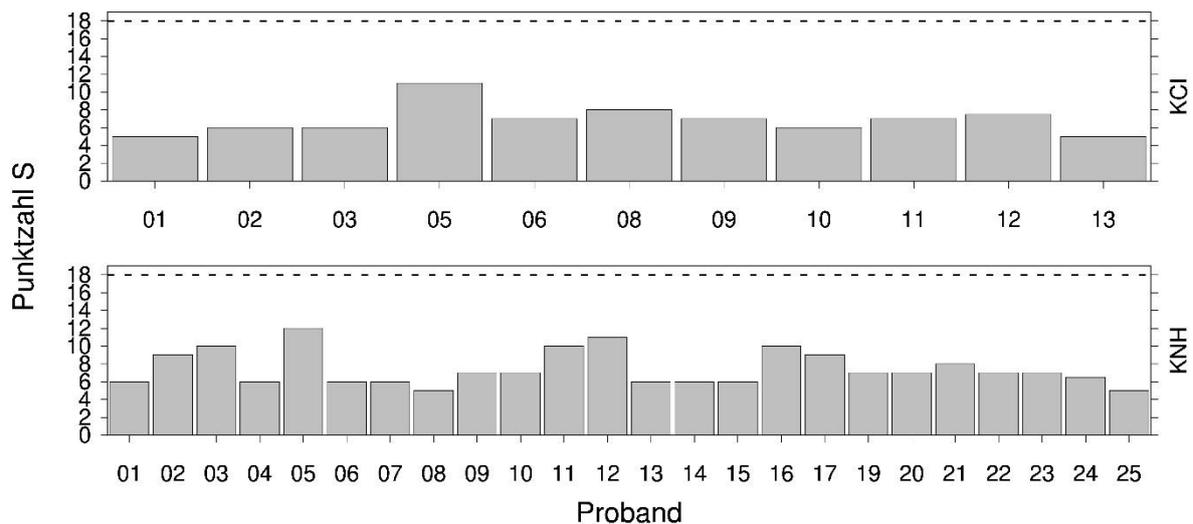


Abbildung 16: Darstellung der Einzelwerte der Fragebogenpunktzahl S. Kinder mit CI (KCI, oben), NH-Kinder (KNH, unten), maximal zu erreichende Punktzahl $S = 18$ (- - -)

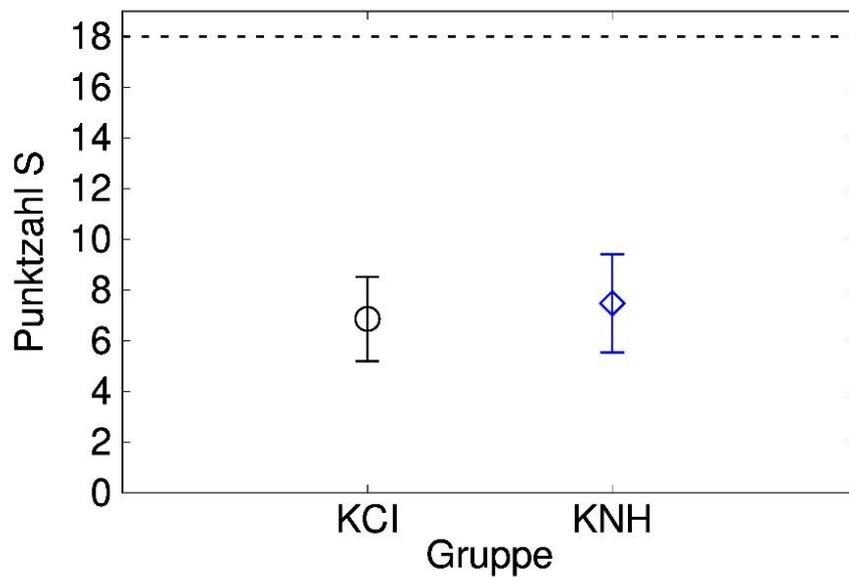


Abbildung 17: Mittelwert mit Standardabweichung der Fragebogenpunktzahl S. Kinder mit CI (KCI, links), NH-Kinder (KNH, rechts), maximal zu erreichende Punktzahl $S = 18$ (- - -)

4 Diskussion

Um die der Studie übergeordnete Fragestellung, wie sehr das Harmonieerleben von CI-Trägern dem von NH-Kindern und -Jugendlichen ähnelt, zu beantworten, werden nachfolgend zunächst die Ergebnisse der drei psychoakustischen Experimente unter Beachtung des aktuellen Forschungsstandes diskutiert. Nachfolgend werden Alterseffekte, der Aufbau des verwendeten Fragebogens sowie weitere allgemeine Einflussfaktoren kritisch hinterfragt.

4.1 Experiment 1

In Experiment 1 wurde untersucht, ob die CI-Träger die in Experiment 2 und 3 genutzten Akkorde unterscheiden können. Dafür ist eine möglichst genaue Übertragung spektraler Eigenschaften notwendig. Dies stellt eine große Herausforderung für CIs und damit ihre Träger dar (Limb und Roy 2014). Laut Vongpaisal et al. (2006) können einige Kinder mit CI durchaus Töne, die nur um 1 HTS auseinanderliegen unterscheiden. Im Gegensatz dazu belegen andere Quellen, dass CI-Träger im Mittel 3 HTS Abstand benötigen, um zwei Töne bewusst als unterschiedlich wahrnehmen zu können (Kang et al. 2009; Pretorius und Hanekom 2008). Dennoch konnten Brockmeier et al. (2011) zeigen, dass unilateral implantierte CI-Träger in der Regel dazu in der Lage sind, Akkorde zu diskriminieren. Dabei schnitten sie jedoch signifikant schlechter ab als die NH Kontrollgruppe. Roy et al. (2014) zeigten ebenfalls, dass Kinder mit CI Paare von Akkordfortschreitungen aus je drei Akkorden genauso gut wie die NH Kontrollgruppe unterscheiden können, wenn nur ein Akkord verändert wurde.

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende Hypothese (1) war daher, dass die CI-Träger bei der Akkorddiskrimination oberhalb des Rateniveaus liegen, aber dennoch im Mittel schlechter sind als die NH-Kontrollgruppe. Diese Hypothese wurde durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt. Zu beachten ist dabei, dass die Aufgabe für die CI-Träger dadurch erschwert gewesen sein könnte, dass sechs der 12 CI-Träger eine untere Grenzfrequenz oberhalb des verwendeten F0 der Akkordgrundtöne (125 Hz bis 157 Hz, vergleiche Tabelle 2) besaßen. Da aufgrund der durchschnittlichen Insertionstiefe erst Frequenzbereiche ab 500 Hz und höher optimal stimuliert werden können (Landsberger et al. 2014), bestand zudem möglicherweise eine verzerrte neuronale Abbildung im Vergleich zu NH. Dass die CI-Träger unter all diesen Umständen die Aufgabe dennoch so gut bewältigen konnten, ist erstaunlich. Jedoch könnte die Darbietung von Akkorden im Vergleich zu einzelnen Tönen die musikalische Wahrnehmung für CI-Träger erleichtern. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass bei CI-Trägern durch die künstliche Stimulation nicht das implizit erlernte Wissen zu Harmonie genutzt wird. Stattdessen

scheint vornehmlich die sensorische Wahrnehmung ausschlaggebend für die Wahrnehmung von Musik zu sein (Tillmann et al. 2019). Diese wird vermutlich zum einen durch Überlagerungen im sensorischen Gedächtnis als auch zum anderen durch die Feinstruktur, welche beim gleichzeitigen Erklängen mehrerer Töne (Akkord) entsteht, beeinflusst. Die durch Experiment 1 für prälingual ertaubte Kinder mit CI nachgewiesene Diskriminationsfähigkeit zweier Akkorde verdeutlicht, dass die in Experiment 2 und 3 genutzten Stimuli prinzipiell geeignet sind, die weiteren Fragestellungen zur Akkordpräferenz und Kadenzwahrnehmung zu untersuchen.

4.2 Experiment 2

In Experiment 2 wurde die Empfindung vertikaler musikalischer Konsonanz untersucht. Dabei wurde getestet, inwieweit CI-Träger bestimmte Akkordtypen präferieren. Ein ähnliches Experiment wurde bereits durchgeführt: bei Brockmeier et al. (2011) sollten CI-Träger und NH-Probanden Akkorde auf einer zehnstufigen Skala von „harsch/diskordant“ bis „angenehm/melodisch“ bewerten. Dabei konnte kein signifikanter Unterschied in der Akkordbewertung zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden. Leider wurde in der Arbeit nicht näher beleuchtet, um welche Akkorde es sich handelte und wie diese von den Probanden bewertet wurden. Im Vergleich dazu entsteht bei dem vorliegenden Experiment die Wichtung der Akkordtypen nicht durch eine Likert-Skala, sondern durch einen direkten Paarvergleich. Der Vorteil von dieser Methode besteht darin, dass auch feine Unterschiede sichtbar gemacht werden können. Denn bei zwei als sehr ähnlich konsonant, bzw. dissonant, empfundenen Akkorden würde auf einer Likert-Skala möglicherweise die gleiche Bewertung erfolgen. Im direkten Paarvergleich müssen sich die Probanden jedoch für einen bevorzugten Akkord entscheiden, sodass auch unbewusst wahrgenommene Unterschiede abgebildet werden können.

Unter Einbeziehung der Schwierigkeiten mit den spektralen Parametern von Musik lautete in Anbetracht der zum Zeitpunkt des Messbeginns vorhandenen Literatur die Hypothese (2) für das zweite Experiment: Prälingual ertaubte CI-Träger haben zwar trotz ausschließlich elektrischer Stimulation gelernt, die gleichen Akkorde wie NH zu bevorzugen; dieses Muster ist aber aufgrund der technischen Limitationen des CIs, und damit dem eingeschränkten und veränderten Höreindruck, geringer ausgeprägt. Diese Hypothese wurde durch die erhobenen Daten bestätigt. Das Präferenzmuster der Akkordtypen ist sogar in beiden Gruppen gleich ausgeprägt, wie in Abbildung 10 zu erkennen ist. Das gezeigte Präferenzmuster scheint zwar

für die CI-Träger gering von dem von Roberts (1986) für NH-Erwachsene gefundenen abzuweichen, allerdings wurden bei Roberts (1986) keine statistischen Vergleiche einzelner Akkorde berichtet. Im Vergleich dazu ergeben die post-hoc-t-Tests für die vorliegenden Daten, dass der Unterschied zwischen verminderten und übermäßigen Akkorden für beide Gruppen nicht signifikant ist, was auch der große Überlappungsbereich der Standardabweichungen für die beiden Akkordtypen in den zwei Gruppen verdeutlicht.

Im Vergleich der vorliegenden Daten mit Knobloch et al. (2018) zeigen zwar die NH-Erwachsenen die gleiche Präferenz wie die Probanden in der vorliegenden Studie; jedoch präferierten die postlingual ertaubten CI-Träger lediglich Dur und bewerteten Moll ebenso dissonant wie verminderte und übermäßige Akkorde. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte das Gedächtnis an das natürliche Hören bei postlingual ertaubten CI-Trägern bieten. Denn es wurde gezeigt, dass der Musikgenuss von zeitig ertaubten (bis zum spätestens 6. Lebensjahr), aber spät implantierten CI-Trägern höher als bei postlingual ertaubten CI-Trägern ist, die nur eine kurze Ertaubungsdauer bis zur Implantation aufwiesen (Fuller et al. 2019). Dabei bleibt offen, weshalb das Präferenzmuster im Vergleich zu NH-Erwachsenen nicht insgesamt abgeschwächt war, sondern der Moll-Akkord stattdessen ebenso dissonant wie verminderte und übermäßige Akkorde bewertet wurde.

Spitzer et al. (2019) untersuchten die vertikale musikalische Konsonanz zweier gleichzeitig erklingender Töne (Intervall). Dafür sollten einseitig ertaubte CI-Träger, die kontralateral nutzbares Gehör hatten, Intervalle anhand ihrer Konsonanz einordnen. Wenn sie ausschließlich mit ihrem NH-Ohr oder dem NH-Ohr plus CI hörten, bewerteten sie die Intervalle wie die NH-Kontrollgruppe. Die CI-Träger bewerteten dieselben Intervalle jedoch konstant schlechter und mit einem deutlich eingeschränkteren Bewertungsbereich der Skala, sobald sie sie nur über ihr CI dargeboten bekamen. Dieses Ergebnis weicht stark von den vorliegenden Daten ab. In Zusammenschau mit den hier vorliegenden Daten wird die von Tillmann et al. (2019) aufgestellte Vermutung unterstützt, dass CI-Träger musikalische Aspekte besser wahrnehmen können, wenn sie mithilfe von Akkorden dargeboten werden.

4.3 Experiment 3

In Experiment 3 wurde die horizontale Harmonie, also die zeitliche Folge von Akkorden betrachtet. Hier sollten die CI-Träger entscheiden, ob der jeweils dargebotene Schluss des Musikstücks gut (harmonisch erwarteter Kadenzschluss) oder schlecht (verminderter oder übermäßiger Akkord) klang. In einer vorangehenden Studie war bei erwachsenen CI-Trägern und NH-Erwachsenen eine starke Diskrepanz zwischen den beiden Gruppen bei dieser Aufgabe zu erkennen (Knobloch et al. 2018). Zwar bevorzugten CI-Nutzer ebenso den Dur-Akkord vor den anderen Typen, so wie die NH-Erwachsenen, dennoch beurteilten die CI-Träger die Kadenz mit nur zwei Ausnahmen auf Rateniveau. Die NH-Erwachsenen hingegen agierten annähernd perfekt. Dass zumindest zwei CI-Träger die Aufgabe mit einem $d' > 1$ bewältigen konnten, bedeutet aber auch, dass dafür das Signal in ausreichender Qualität zur Verfügung stand.

Hypothese (3) war für das vorliegende 3. Experiment zum einen, dass die CI-Träger die Kadenzbewertung bewältigen können, wenn sie die Akkorde in Experiment 1 unterscheiden können und in Experiment 2 den Dur-Akkord gegenüber den anderen Akkordtypen bevorzugen. Zum anderen wurde erwartet, dass die CI-Träger weniger zuverlässig als die NH-Kontrollgruppe antworten. Tatsächlich agierten die CI-Träger signifikant schlechter als die NH-Kontrollgruppe. Allerdings erreichte keiner der beteiligten CI-Träger ein Ergebnis oberhalb des Rateniveaus. Das steht in Kontrast zu Experiment 1 und 2, in denen sie Akkorde ausreichend sicher diskriminieren konnten und das gleiche Präferenzmuster in gleicher Ausprägung wie die NH-Probanden zeigten, womit wesentliche Voraussetzungen für die Erkennung einer korrekten Kadenz zu bestehen schienen. Die Diskrepanz zwischen Akkordpräferenz und Kadenzbewertung findet sich auch bei Knobloch et al. (2018).

Eine mögliche Erklärung für den unerwarteten Ausgang des Experimentes ist, dass die Akkordfolgen relativ betrachtet zu schnell für die CI-Träger bzw. deren Kodierungsstrategien waren und daher eine Überlappung der Stimulationen und eine unsaubere Übertragung resultierten, die keine sichere Diskrimination und Wahrnehmung der einzelnen Akkorde mehr erlaubte. In Experiment 1 und 2 wurden die Stimuli mit einem Abstand von 2 s präsentiert. Die Akkorde in den präsentierten Liedern grenzten hingegen direkt aneinander. Allerdings fanden Roy et al. (2014), dass in der Harmonie-Aufgabe der MCCI-Testbatterie (siehe Kapitel 1.7) CI-Träger Harmoniefortschreitungen aus Akkord-Tripeln vergleichbar gut unterscheiden konnten wie die NH-Probanden.

Die leichte Antworttendenz der CI-Träger zugunsten der Antwort „gut“ selbst bei veränderten Kadenzschlüssen unterstützt zudem die Annahme, dass CI-Träger ein verändertes Harmonieempfinden im Vergleich zu NH haben. Diese Tendenz spiegelt die Ergebnisse von Caldwell et al. (2016) wider. In ihrer Studie ließen sie NH und CI-Träger Melodien mit Akkordbegleitung bezüglich ihres Dissonanzgrades bewerten. Dabei zeigten die NH-Probanden das erwartete Antwortmuster, bei dem musikalischen Regeln folgend dissonantere Versionen tatsächlich als dissonanter bewertet wurden. Die CI-Träger bewerteten jedoch alle Versionen als gleich angenehm. Die Autoren vermuteten, dass die Unterschiede in der Begleitung so gering waren, dass diese, wie auch die darüber übertragene Dissonanz, von den CI-Trägern gar nicht wahrgenommen werden konnten, da die Stimuli in dieselben Frequenzbänder gefallen sind. Dagegen zeigt die vorliegende Studie, dass die Mehrheit der CI-Träger dazu in der Lage war, sogar kleine Unterschiede zwischen den Akkorden wahrzunehmen und zudem bestimmte Akkordtypen bevorzugten. Daher lässt sich die Interpretation der Daten von Caldwell et al. (2016) für die hier verwendeten einzelnen Akkorde nicht reproduzieren.

All diese scheinbaren Widersprüche lassen sich zumindest teilweise mit den Erkenntnissen von Tillmann et al. (2019) erklären. In ihrer Studie sollten CI-Träger angeben, ob die synthetisch gesungenen Akkordfolgen jeweils auf „di“ oder auf „du“ endeten. Dabei wurde die Reaktionsgeschwindigkeit gemessen. Die entsprechenden Stimuli waren Akkordfolgen, die entweder eine klassische Kadenz darstellten oder anstelle auf der Tonika auf der Subdominanten endeten. Eine langsamere Reaktion ist bei einem störenden, d.h. musikalisch weniger passenden Akkord zu erwarten; eine schnellere Reaktion dementsprechend, wenn das Signal vertraut und angenehm ist. Die Daten von NH-Probanden zeigten den erwarteten Ausgang mit einer höheren Reaktionsgeschwindigkeit bei der Darbietung einer klassischen Kadenz. Die CI-Träger hingegen antworteten schneller, wenn das Klangbeispiel auf der Subdominanten endete. In den Beispielen mit der veränderten Akkordabfolge kamen Töne der Subdominanten bereits in den anderen Akkorden der jeweiligen Folge vor. Das Ergebnis interpretieren die Autoren so, dass CI-Träger bei der sukzessiven Darbietung von Akkorden nicht auf erlerntes Harmoniewissen zurückgreifen, sondern auf ihre sensorische Wahrnehmung, insbesondere das sensorische Priming. Denn sie empfanden offenbar die vertrauten wiederkehrenden Töne, aus denen die Subdominante aufgebaut war, als weniger störend als die den musikalischen Regeln folgende Tonika.

4.4 Alterseffekte

Viele Aspekte des Musikerlebens sind erworben. Daher wurde untersucht, ob die erhobenen Ergebnisse vom Alter beziehungsweise der Hörerfahrung abhängen. Für Experiment 1 wurde die Hypothese (4) aufgestellt, dass zwischen Hörerfahrung und der erbrachten Diskriminationsleistung einzelner Akkorde ein positiver Zusammenhang besteht. Für die CI-Träger konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden. In der NH-Kontrollgruppe ist allenfalls ein positiver Trend zu sehen, der nur schwache Lerneffekte anzeigt. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Entwicklung der Diskriminationsfähigkeit für einzelne Akkorde bei den NH-Kindern um das 6. Lebensjahr bereits weitgehend abgeschlossen ist und in der untersuchten Altersgruppe nicht mehr deutlich zunimmt. Bei den CI-Trägern hingegen könnte diese Entwicklung aufgrund der Phase der Taubheit sowie der Hörsituation mit dem CI verzögert und daher noch im Gange sein. Schließlich holen die mit CI versorgten Kinder hinsichtlich ihrer sprachlichen Fähigkeiten erst mit etwa 4 bis 5 Jahren zu ihren NH Altersgenossen auf (Nicholas und Geers 2007). Eine Verzögerung der Entwicklung komplexerer hörbezogener Fähigkeiten erscheint daher plausibel.

Für Experiment 2 wurde die Hypothese (5) aufgestellt, dass sich mit zunehmender Hörerfahrung das Präferenzmuster der Akkordtypen immer deutlicher ausprägt. Dieser Zusammenhang zeigte sich nur für die NH-Probanden. Die Altersabhängigkeit unterstützt die Hypothese, dass Akkordempfindung in der Vertikalen nicht allein auf sensorische Faktoren zurückzuführen ist, sondern dass auch erlernte Harmonie eine große Rolle dabei spielt (Terhardt 1984; Tramo 2001). Für die CI-Träger ist die Altersabhängigkeit der Ausprägtheit des Präferenzmusters nicht signifikant. Ein Trend zu einer stärkeren Ausprägung ist jedoch zu erkennen. Da die jüngsten Probanden von CI- und NH-Gruppe auf einem ähnlich niedrigen Niveau der Steigung der Trendlinie starten, könnte die schwache Altersabhängigkeit darauf hindeuten, dass sich die CI-Träger in dieser Hinsicht langsamer entwickeln und dementsprechend der Entwicklungsprozess in der untersuchten Altersgruppe noch nicht abgeschlossen ist. Eine Folgestudie, die auch prälingual ertaubte CI-Träger über 18 Jahre einschließt, könnte diese Frage klären.

Die Hypothese (6) für Experiment 3 lautete, dass mit zunehmendem Alter auch die Fähigkeit, Kadenzen korrekt zu identifizieren, zunimmt. Dieser Nachweis konnte nur für die NH-Probanden erbracht werden (siehe Abbildung 14). Dabei sind die beiden Probanden mit der schlechtesten Leistung die jüngsten Teilnehmer. Die fehlende Altersabhängigkeit bei CI-Trägern erklärt sich dadurch, dass sämtliche Probanden auf dem Rateniveau agierten. Einen

Alterseffekt, der dem der NH-Probanden ähnelt, sieht man in einer Studie von Corrigall und Trainor (2014). Dort wurden Kadenz und Melodien in vier unterschiedlichen Bedingungen dargeboten: in der den westlichen musikalischen Regeln folgenden Originalversion, in einer um 1 HTS nach oben oder nach unten verschobenen Version (atonale Bedingung), in einer Version mit einem um 1 HTS veränderten Schlussakkord (unerwartete Tonart) und in einer Version mit einer Subdominanten anstelle einer Tonika als Schlussakkord (unerwartete Harmonie). Den 4- und 5-jährigen Probanden wurde immer die Originalversion im Vergleich zu einer veränderten Version dargeboten und sie sollten spielerisch entscheiden, welche Version die schönere sei. 4-Jährige schienen nicht sensibel gegenüber der Verletzung von Tonartzugehörigkeit sowie Harmonie zu sein. 5-Jährige waren teilweise sensibel gegenüber Tonartzugehörigkeit, aber ebenfalls nicht gegenüber Harmonieverletzung. In einem zweiten Experiment leiteten die Autoren ein Elektroenzephalogramm ab und fanden, dass 4-Jährige sehr wohl die Verletzung von Tonart und Harmonie registrieren. Offenbar scheinen sie diese Wahrnehmung aber noch nicht bewusst anwenden zu können. 6-Jährige zeigten längere Reaktionszeiten, wenn Kadenz auf der unerwarteten Subdominanten endeten und kürzere Reaktionszeiten, wenn die Kadenz auf der musikalisch zu erwartenden Tonika endeten (Schellenberg et al. 2005). Im Vergleich zur vorigen Studie lässt dies einen großen Entwicklungsschritt in diesem Altersbereich erkennen, da Kinder im Alter von 6 Jahren Kadenz mindestens implizit korrekt einschätzen können. Die Zeit zwischen dem 4. und 6. Lebensjahr ist offensichtlich eine Schlüsselperiode in der kindlichen Entwicklung von Harmoniewahrnehmung, welche um das 7. Lebensjahr gewöhnlich abgeschlossen ist. Die vorliegenden Daten sind damit konsistent (siehe Abbildung 14): Mit 7 Jahren wird im Allgemeinen ein $d' > 3$ erreicht. Ob prälingual ertaubte CI-Träger mit genügend Training und fortschreitendem Alter ebenfalls eine verbesserte Performance zeigen, bleibt offen. Daher empfiehlt sich die Durchführung einer entsprechenden Folgestudie.

4.5 Fragebogen

Der Fragebogen wurde vorgelegt, um die erhobenen Ergebnisse der Verhaltensexperimente besser einschätzen zu können und um zu überprüfen, ob die NH-Probanden dem Auswahlkriterium, höchstens so viel musikalische Erfahrung wie die CI-Träger zu haben, entsprechen. Dabei wurde abgefragt, wie viel regelmäßige Musikerfahrung innerhalb und außerhalb der Schule besteht, wie groß das Interesse an musikalischen Tätigkeiten ist und wie angenehm und deutlich die CI-Träger Musik über den Mikrofoneingang ihres CIs empfinden. Wie bereits unter Kapitel 3.4 erwähnt, wurden die beiden Zusatzfragen für die CI-Träger von der Auswertung ausgeschlossen, da die meisten Probanden angaben, den Klang von Musik angenehm, aber undeutlich zu finden. Dies erscheint widersprüchlich und ist vermutlich auf die gegenläufigen Bewertungsskalen beider Aufgaben zurückzuführen. Es kann daher nicht sichergestellt werden, dass diese Fragen in der geforderten Weise beantwortet wurden. Bei einer erneuten Anwendung des Fragebogens ist daher darauf zu achten, ob die Probanden die Aufgaben korrekt verstanden haben, oder aber vor Anwendung die Skalen gleich auszurichten. Sollten die CI-Träger dennoch auf die gleiche Weise antworten, wirft dies neue Fragen auf. Dann ist zu untersuchen, welche Aspekte von Musik sie angenehm, bzw. unangenehm, finden und was das Empfinden der übertragenen Musik als „undeutlich“ hervorruft.

Bei Betrachten der deskriptiven Auswertung ist bemerkenswert, dass drei der elf CI-Träger angeben, „manchmal“ und acht sogar „gern und viel“ Musik zu hören. Weiterhin geben lediglich drei CI-Träger an, noch nie ein Instrument ausprobiert zu haben. Von den übrigen spielen vier aktuell ein Instrument. Dies zeigt ein prinzipielles Interesse und Freude an Musik. Es ist aber aufgrund mehrerer Einflussfaktoren möglich, dass diese Zahlen nicht repräsentativ für prälingual ertaubte Kinder und Jugendliche mit CI sind. Zum einen ist die Stichprobe von eher geringer Größe, zum anderen waren eventuell Kinder und Jugendliche, die von vornherein mehr Spaß an Musik haben eher bereit, an solch einer Studie teilzunehmen. Andererseits haben Kinder mit CI auch ein mit NH-Kindern vergleichbares Interesse für Musik, dass umso größer ist, je früher die Kinder das Hören mit CI begonnen haben (Trehub et al. 2009; Mitani et al. 2007). Vereinbar mit den Ergebnissen des Fragebogens ist auch, dass CI-Träger im 3. Experiment die Tendenz hatten, die Klangbeispiele als eher positiv zu bewerten. Bei einem generellen Missfallen von Musik wäre die gegenteilige Tendenz zu erwarten gewesen. Für die NH-Probanden hat der Fragebogen die Erfüllung der Auswahlkriterien der Studie insofern bestätigt, als es keinen Unterschied in der Erfahrung auf dem Gebiet der Musik zwischen den beiden Gruppen gibt.

4.6 Allgemeine Einflussfaktoren

Es ist anzunehmen, dass die unterschiedlichen Implantate und Kodierungsstrategien einen Einfluss auf die Wahrnehmung von Musik haben. Je nach Hersteller und Modell variiert die Anzahl der Elektroden und damit die Breite der Frequenzbänder. Bei der CI-Anpassung werden zudem die oberen und unteren Grenzfrequenzen individuell eingestellt, um einen möglichst großen Frequenzbereich angenehm zu übertragen. Dabei müssen bei einigen Patienten einzelne Elektroden aufgrund von unangenehmen Empfindungen abgeschaltet werden oder fallen bei einigen Patienten aufgrund technischer Defekte oder mangelnder Ankopplung an den Hörnerven aus. Auch die anatomischen und operativen Gegebenheiten sorgen für Unterschiede in der intracochleären Lage des Implantats und damit seiner Funktionalität. Es ist bekannt, dass die durchschnittliche Insertionstiefe gerade einmal $1\frac{1}{4}$ Windungen beträgt, sodass Frequenzen unterhalb von etwa 500 Hz nicht mehr am frequenzspezifischen Ort auf der Basilarmembran stimuliert werden können (Landsberger et al. 2014).

Des Weiteren gibt es bei einigen Herstellern technische Besonderheiten. Advanced Bionics verwendet beispielsweise bislang als einziger Hersteller sogenannte virtuelle Kanäle. Ebenso hat sich bisher nur MED-EL auf die Übertragung der Feinstruktur im tieftonalen Bereich spezialisiert. All diese und noch weitere Umstände führen unweigerlich zu interindividuell unterschiedlichen Voraussetzungen in der Signalverarbeitung, -übertragung und -wahrnehmung (Limb und Roy 2014; Kießling et al. 2018, S. 167 – 213). Die kleine Probandengruppe der Studie mit zudem sehr heterogenen CI-Eigenschaften lässt allerdings keine sinnvollen Aussagen zu den einzelnen Faktoren zu. Dafür wird die Durchführung weiterer auf diese Untersuchung aufbauende Studien empfohlen. Beispielsweise könnten CI-Träger Klangbeispiele nach ihrem Konsonanzgrad bewerten wobei bei mehreren Durchläufen jeweils eine andere Elektrode ausgeschaltet werden könnte. Dabei könnte erkennbar werden, welchen Einfluss einzelne Elektroden auf die musikalische Wahrnehmung haben. Ebenso lässt sich untersuchen, ob und wie sich mit verschobenen Grenzfrequenzen der Übertragung die Wahrnehmung ändert. Dafür wäre allerdings ein experimenteller Prozessor erforderlich oder die Neuprogrammierung für jede erforderliche Veränderung. Das ist nicht nur aufwendig, sondern sorgt für eine ungewohnte Stimulation beim Patienten. Da das Hören mit CI einem langwierigen Rehabilitations- und Lernprozess unterliegt ist fraglich, ob die gewonnenen Ergebnisse sinnvoll verwertbar wären.

Zu diskutieren sind des Weiteren Einflüsse wie die Parameter der Musik (Timbre, Lautstärke, Tempo, Komplexität etc.) und die Umgebung. In der vorliegenden Studie wurden die CI-

Einstellungen der Probanden bewusst beibehalten und die Signale im Freifeld über einen freistehenden Lautsprecher wiedergegeben. Außerdem durften die Probanden die Wiedergabelautstärke individuell durch den Versuchsleiter auf ein angenehmes Niveau verändern lassen. Durch diese Maßnahmen sollte eine möglichst realistische Hörumgebung für die Probanden geschaffen werden.

Nicht zu vergessen sind zudem die allgemeine kognitive Leistungsfähigkeit, der Ertaubungsgrund, der Ertaubungszeitpunkt, die Zeitspanne bis zur Inbetriebnahme des CIs, der Verlauf des Rehabilitationsprozesses, das soziale Umfeld und weitere nicht technische Parameter (Gfeller et al. 2000; van Besouw et al. 2011). Wie unter 4.2 erwähnt, wurde für zeitig ertaubte, aber spät implantierte CI-Träger ein signifikant höherer Musikgenuss als postlingual ertaubte CI-Träger mit nur kurzer Ertaubungsdauer bis zur Implantation gefunden (Fuller et al. 2019). In der Fähigkeit, Melodiekonturen zu identifizieren, unterschieden sich die beiden Gruppen jedoch nicht (ebd.). Dieses Ergebnis zeigt an, dass das vor der Ertaubung erworbene musikalische Gedächtnis tatsächlich maßgeblich den Musikgenuss negativ beeinflussen kann. Auf zumindest einen Teil der musikalischen Leistungsfähigkeit hat es allerdings einen eher geringen Einfluss. Das wird deutlich, wenn die vorliegenden Daten mit denen von Knobloch et al. (2018) verglichen werden. Die hier untersuchten prälingual ertaubten CI-Träger zeigten zwar im Vergleich zu den postlingual ertaubten CI-Trägern das musikalisch erwartete Präferenzmuster der Akkordtypen, jedoch war unter den prälingual ertaubten CI-Trägern kein einziger, der Kadenzschlüsse wie NH-Probanden einordnete. Bei Knobloch et al. (2018) konnte diese Aufgabe hingegen von zumindest zwei CI-Trägern ausreichend sicher bewältigt werden. Daher ist zu überlegen, ob das akustisch erworbene musikalische Gedächtnis für derartige Anforderungen im Gegensatz zur Grundannahme der vorliegenden Studie einen positiven Einflussfaktor darstellt.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde die Wahrnehmung musikalischer Harmonien an zwei Gruppen untersucht. Die erste Gruppe bestand aus prälingual beidseits vollständig ertaubten Kindern im Alter von 7 bis 18 Jahren, welche spätestens bis zur Vollendung des dritten Lebensjahres die Erstanpassung mindestens eines CIs erhielten. Die Kontrollgruppe bestand aus NH Kindern ohne außerschulische musikalische Ausbildung im Alter von 5 bis 18 Jahren, die entsprechend dem Höralter der CI-Träger passend ausgewählt wurden.

Es wurden drei Experimente zur Wahrnehmung von isolierten Akkorden und solchen im harmonischen Zusammenhang in einem Freifeldaufbau über einen Lautsprecher durchgeführt. Experiment 1 untersuchte, ob die Probanden dazu in der Lage sind, isolierte Akkorde zu differenzieren. CI-Träger antworteten oberhalb des Rateniveaus, aber weniger exakt als die NH-Probanden. Für die CI-Träger, nicht aber für die NH-Probanden, wurde ein positiver Zusammenhang zwischen dem Sensitivitätsindex und dem Höralter gefunden. Experiment 2 diente dazu, ein Präferenzmuster unterschiedlicher Akkordtypen herauszufinden. Sowohl die CI-Träger als auch die NH-Probanden zeigten das gleiche, musikalisch erwartete Muster in ähnlicher Ausprägung mit Bevorzugung des Dur- und des Moll-Akkords. Für die NH-Probanden fand sich zudem eine Abhängigkeit zwischen Höralter und Ausprägung des Musters. Experiment 3 betrachtete, ob die Probanden Dur-Akkorde, die eine Kadenz nach westlichen musikalischen Regeln abschließen auch als abschließend wahrnehmen. Die CI-Träger agierten dabei sämtlich auf dem Rateniveau, während die NH-Probanden nahezu perfekt antworteten. Für die NH-Probanden wurde zudem eine starke Altersabhängigkeit gefunden.

Die Studie bestätigt die Ergebnisse von Knobloch et al. (2018), wonach CI-Träger Harmonien einzeln, aber nicht im musikalischen Kontext, wie NH wahrnehmen. Die Fähigkeit zur Kadenzbewertung nach musikalischen Regeln scheint also weniger von vorhandener akustischer Hörerfahrung als vielmehr prinzipiell vom Hören mit CIs abzuhängen. Zusätzlich wurde in der vorliegenden Studie die Diskriminationsfähigkeit unterschiedlicher Akkorde für CI-Träger nachgewiesen.

Zusammengefasst haben CI-Träger besondere Schwierigkeiten mit der Wahrnehmung von komplexen Parametern der Musik wie Konsonanz. Ob ein gezieltes Training zu anderen Ergebnissen führen würde bleibt offen.

6 Literaturverzeichnis

1. Besouw R.M. van, Grasmeyer M.L., Hamilton M.E., Baumann S.E.: Music activities and responses of young cochlear recipients. *Int. J. Audiol.* 50 (5): 340 – 348 (2011)
2. Bowling D.L., Purves D.: A biological rationale for musical consonance. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112 (36): 11155 – 11160 (2015)
3. Brockmeier S.J.: Münchner Musik Fragebogen. Version 05/2008. Zur Verfügung gestellt von MED-EL GmbH
4. Brockmeier S.J., Fitzgerald D., Searle O., Fitzgerald H., Grasmeyer M., Hilbig S., Vermiere K., Peterreins M., Heydner S., Arnold W.: The MuSIC perception test: A novel battery for testing music perception of cochlear implant users. *Cochlear Implants Int.* 12 (1): 10 – 20 (2011)
5. Caldwell M.T., Jiradejvong P., Limb C.J.: Impaired Perception of Sensory Consonance and Dissonance in Cochlear Implant Users. *Otol. Neurotol.* 37 (3): 229 – 234 (2016)
6. Cheng X., Liu Y., Shu Y., Tao D.-D., Wang B., Yuan Y., Galvin J.J. 3rd, Fu Q.-J., Chen B.: Music Training Can Improve Music and Speech Perception in Pediatric Mandarin-Speaking Cochlear Implant Users. *Trends Hear.* 22: 1 – 12 (2018)
7. Clercq C.M.P. le, Labuschagne L.J.E., Franken M.J.P., Baatenburg de Jong R.J., Luijk M.P.C.M., Jansen P.W., Schroeff M.P. van der: Association of Slight to Mild Hearing Loss With Behavioral Problems and School Performance in Children. *JAMA Otolaryngol. Head Neck Surg.* 146 (2): 113 – 120 (2020)
8. Corrigan K.A., Trainor L.J.: Enculturation to musical pitch structure in young children: evidence from behavioral and electrophysiological methods. *Dev. Sci.* 17 (1): 142 – 158 (2014)
9. Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie E.V., Bonn: S2k-Leitlinie: Langfassung Cochlea-Implantat Versorgung und zentral-auditorische Implantate. Version 05/2012. Abgerufen am 23.01.2020, von <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/017-071.html>
10. Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie: S2k-Leitlinie: Periphere Hörstörungen im Kindesalter: Langfassung. Version 09/2013. Abgerufen am 21.01.2020, von <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/049-010.html>
11. Drennan W.R., Rubinstein J.T.: Music perception in cochlear implant users and its relationship with psychophysical capabilities. *J. Rehabil. Res. Dev.* 45 (5): 779 – 789 (2008)
12. Drennan W.R., Won J.H., Nie K., Jameyson E., Rubinstein, J.T.: Sensitivity of psychophysical measures to signal processor modifications in cochlear implant users. *Hear. Res.* 262 (1 – 2): 1 – 8 (2010)
13. Fuller C., Başkent D., Free R.: Early Deafened, Late Implanted Cochlear Implant Users Appreciate Music More Than and Identify Music as Well as Postlingual Users. *Front. Neurosci.* 13: Article 1050 (2019)
14. GBD 2016 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators: Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 328 diseases and injuries for 195 countries, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet* 390 (10100): 1211 – 1259 (2017)

15. Gelfand S.A.: Hearing: an introduction to psychological and physiological acoustics. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel 1998
16. Gfeller K., Christ A., Knutson J.F., Witt S., Murray K.T., Richard S.T.: Musical Backgrounds, Listening Habits, and Aesthetic Enjoyment of Adult Cochlear Implant Recipients. *J. Am. Acad. Audiol.* 11 (7): 390 – 406 (2000)
17. Gfeller K., Lansing C.R.: Melodic, Rhythmic, and Timbral Perception of Adult Cochlear Implant Users. *J. Speech Hear. Res.* 34 (4): 916 – 920 (1991)
18. Giannantonio S., Polonenko M.J., Papsin B.C., Paludetti G., Gordon K.A.: Experience Changes How Emotion in Music Is Judged: Evidence from Children Listening with Bilateral Cochlear Implants, Bimodal Devices, and Normal Hearing. *PLoS One.* 10 (8): e0136685 (2015)
19. Gregory A.H., Worrall L., Sarge A.: The Development of Emotional Responses to Music in Young Children. *Motiv. Emot.* 20 (4): 341 – 348 (1996)
20. Hall W.C.: What you don't know can hurt you: The risk of language deprivation by impairing sign language development in deaf children. *Matern. Child Health J.* 21 (5): 961 – 965 (2017)
21. Hallam S.: The power of music: Its impact on the intellectual, social and personal development of children and young people. *Int. J. Music Educ.* 28 (3): 269 – 289 (2010)
22. Hochmair I., Hochmair E., Nopp P., Waller M., Jolly C.: Deep electrode insertion and sound coding in cochlear implants. *Hear. Res.* 322: 14 – 23 (2015)
23. Hopyan T., Peretz I., Chan L.P., Papsin B.C., Gordon K.A.: Children using cochlear implants capitalize on acoustical hearing for music perception. *Front. Psychol.* 3: Article 425 (2012)
24. Kang R., Nimmons G.L., Drennan W., Longnion J., Ruffin C., Nie K., Won J.H., Worman T., Yueh B., Rubinstein J.: Development and Validation of the University of Washington Clinical Assessment of Music Perception Test. *Ear Hear.* 30 (4): 411 – 418 (2009)
25. Kießling J., Kollmeier B., Baumann U.: Versorgung mit Hörgeräten und Hörimplantaten. Georg Thieme Verlag KG. Stuttgart 2018
26. Knobloch M., Verhey J.L., Ziese M., Nitschmann M., Arens C., Böckmann-Barthel M.: Musical Harmony in Electric Hearing. *Music Percept.* 36 (1): 40 – 52 (2018)
27. Knobloch S., Vorderer P., Zillmann D.: Der Einfluß des Musikgeschmacks auf die Wahrnehmung möglicher Freunde im Jugendalter. *Z. Sozialpsychol.* 31: 18 – 30 (2000)
28. Kong Y.-Y., Cruz R., Jones J.A., Zeng F.-G.: Music perception with temporal cues in acoustic and electric hearing. *Ear Hear.* 25 (2): 173 – 185 (2004)
29. Landsberger D.M., Mertens G., Kleine Punte A., Van De Heyning P.: Perceptual changes in place of stimulation with long cochlear implant electrode arrays. *J. Acoust. Soc. Am.* 135 (2): EL 75 – 81 (2014)
30. Lenarz T., Boenninghaus H.-G.: Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg 2012
31. Limb C.J., Roy A.T.: Technological, biological, and acoustical constraints to music perception in cochlear implant users. *Hear. Res.* 308: 13 – 26 (2014)

32. Macmillan N.A., Creelman C.D.: Response Bias: Characteristics of Detection Theory, Threshold Theory, and „Nonparametric“ Indexes. *Psychol. Bull.* 107 (3): 401 – 413 (1990)
33. May-Mederake B.: Early intervention and assessment of speech and language development in young children with cochlear implants. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 76 (7): 939 – 946 (2012)
34. McDermott H.J.: Music Perception with Cochlear Implants: A Review. *Trends Amplif.* 8 (2): 49 – 82 (2004)
35. Mitani C., Nakata T., Trehub S.E., Kanda Y., Kumagami H., Takasaki K., Miyamoto I., Takahashi H.: Music Recognition, Music Listening, and Word Recognition by Deaf Children with Cochlear Implants. *Ear Hear.* 28 (2 Suppl.): 29S – 33S (2007)
36. Moore B.C.J.: An Introduction to the Psychology of Hearing. Academic Press. San Diego 2003
37. Nicholas J.G., Geers A.E.: Will They Catch Up? The Role of Age at Cochlear Implantation In the Spoken Language Development of Children with Severe - Profound Hearing Loss. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 50 (4): 1048 – 1062 (2007)
38. Nicholas J.G., Geers A.E.: Effects of Early Auditory Experience on the Spoken Language of Deaf Children at 3 Years of Age. *Ear Hear.* 27 (3): 286 – 298 (2006)
39. Olszewski C., Gfeller K., Froman R., Stordahl J., Tomblin B.: Familiar melody recognition by children and adults using cochlear implants and normal hearing children. *Cochlear Implants Int.* 6 (3): 123 – 140 (2005)
40. Olusanya B.O., Neumann K.J., Saunders J.E.: The global burden of disabling hearing impairment: a call to action. *Bull. World Health Organ.* 92 (5): 367 – 373 (2014)
41. Peretz I., Champod A.S., Hyde K.: Varieties of Musical Disorders – The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 999 (1): 58 – 75 (2003)
42. Politimou N., Bella S.D., Farrugia N., Franco F.: Born to Speak and Sing: Musical Predictors of Language Development in Pre-schoolers. *Front. Psychol.* 10: Article 948
43. Pretorius L.L., Hanekom J.J.: Free field frequency discrimination abilities of cochlear implant users. *Hear. Res.* 244 (1 – 2): 77 – 84 (2008)
44. Regnault P., Bigand E., Besson M.: 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 (2001)
45. Roberts L.A.: Consonance Judgements of Musical Chords by Musicians and Untrained Listeners. *Acta Acust. United Acust.* 62 (2): 163 – 171 (1986)
46. Rotteveel L.J.C., Snik A.F., Vermeulen A.M., Mylanus E.A.M.: Three-year follow-up of children with postmeningitic deafness and partial cochlear implant insertion. *Clin. Otolaryngol.* 30 (3): 242 – 248 (2005)
47. Roy A.T., Scattergood-Keeper L., Carver C., Jiradejvong P., Butler C., Limb C.J.: Evaluation of a Test Battery to Assess Perception of Music in Children With Cochlear Implants. *JAMA Otolaryngol. Head Neck Surg.* 140 (6): 540 – 547 (2014)
48. Saarikallio S., Erkkilä J.: The role of music in adolescents' mood regulation. *Psychol. Music* 35 (1): 88 – 109 (2007)

49. Schellenberg E.G., Bigand E., Poulin-Charronnat B., Garnier C., Stevens C.: Children's implicit knowledge of harmony in Western music. *Dev. Sci.* 8 (6): 551 – 566 (2005)
50. Schutte K.: MATLAB and MIDI. Hochgeladen 2012. Abgerufen am 12.11.2013, von <http://kenschutte.com/midi>
51. Scorpecci A., Zagari F., Mari G., Giannantonio S., D'Alatri L., Di Nardo W., Paludetti G.: Investigation on the music perception skills of Italian children with cochlear implants. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 76 (10): 1507 – 1514 (2012)
52. Spitzer E.R., Landsberger D.M., Friedmann D.R., Galvin J.J. 3rd: Pleasantness Ratings for Harmonic Intervals With Acoustic and Electric Hearing in Unilaterally Deaf Cochlear Implant Patients. *Front. Neurosci.* 13: Article 922 (2019)
53. Stabej K.K., Smid L., Gros A., Zargi M., Kosir A., Vatovec J.: The music perception abilities of prelingually deaf children with cochlear implants. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 76 (10): 1392 – 1400 (2012)
54. Stanislaw H., Todorov N.: Calculation of signal detection theory measures. *Behav. Res. Methods Instrum. Comput.* 31 (1): 137 – 149 (1999)
55. Steffens T., Lesinski-Schiedat A., Strutz J., Aschendorff A., Klenzner T., Rühl S., Voss B., Wesarg T., Laszig R., Lenarz T.: The benefits of sequential bilateral cochlear implantation for hearing-impaired children. *Acta Otolaryngol.* 128 (2): 164 – 176 (2008)
56. Stordahl J.: Song Recognition and Appraisal: A Comparison of Children Who Use Cochlear Implants and Normally Hearing Children. *J. Music Ther.* 39 (1): 2 – 19 (2002)
57. Terhardt E.: The Concept of Musical Consonance: A Link between Music and Psychoacoustics. *Music Percept.* 1 (3): 276 – 295 (1984)
58. Tillmann B., Poulin-Charronnat B., Gaudrain E., Akhoun I., Delbé C., Truy E., Collet L.: Implicit Processing of Pitch in Postlingually Deafened Cochlear Implant Users. *Front. Psychol.* 10: Article 1990 (2019)
59. Torppa R., Huotilainen M.: Why and how music can be used to rehabilitate and develop speech and language skills in hearing-impaired children. *Hear. Res.* 380: 108 – 122 (2019)
60. Trainor L.J., Tsang C.D., Cheung V.H.W.: Preference for Sensory Consonance in 2- and 4-Month-Old Infants. *Music Percept.* 20 (2): 187 – 194 (2002)
61. Tramo M.J., Cariani P.A., Delgutte B., Braida L.D.: Neurobiological Foundations for the Theory of Harmony in Western Tonal Music. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 930: 92 – 116 (2001)
62. Trehub S.E., Vongpaisal T., Nakata T.: Music in the Lives of Deaf Children with Cochlear Implants. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1169: 534 – 542 (2009)
63. Tufts J.B., Molis M.R., Leek M.R.: Perception of dissonance by people with normal hearing and sensorineural hearing loss. *J. Acoust. Soc. Am.* 118 (2): 955 – 967 (2005)
64. Vongpaisal T., Trehub S.E., Schellenberg E.G.: Song Recognition by Children and Adolescents With Cochlear Implants. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 49 (5): 1091 – 1103 (2006)
65. World Health Organization: Grades of hearing impairment. Hochgeladen am 21.11.2017. Abgerufen am 21.01.2020, von https://www.who.int/pbd/deafness/hearing_impairment_grades/en/
66. World Health Organization.: WHO | Estimates. Hochgeladen am 26.07.2018. Abgerufen am 20.01.2020, von <https://www.who.int/pbd/deafness/estimates/en/>

67. Zarate J.M., Ritson C.R., Poeppel D.: Pitch-interval discrimination and musical expertise: Is the semitone a perceptual boundary? *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (2): 984 – 993 (2012)
68. Zeitler D.M., Anwar A., Green J.E., Babb J.S., Friedmann D.R., Roland J.T. Jr., Waltzman S.B.: Cochlea implantation in prelingually deafened adolescents. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med.* 166 (1): 35 – 41 (2012)
69. Zeng F.-G.: Trends in Cochlear Implants. *Trends Amplif.* 8 (1): 1 – 34 (2004)

7 Danksagung

Die Danksagung ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Die Danksagung ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten

8 Ehrenerklärung

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

Wahrnehmung musikalischer Harmonien bei prälingual ertaubten Kindern und Jugendlichen mit Cochlea-Implantat

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

Magdeburg, den 06.03.2020

Victoria Zimmer

9 Darstellung des Bildungsweges

Die Darstellung des Bildungsweges ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Wissenschaftliche Leistungen

Veröffentlichungen Zimmer V., Verhey J.L., Ziese M., Böckmann-Barthel M.: Harmony Perception in Prelingually Deaf, Juvenile Cochlear Implant Users. *Front. Neurosci.* 13: Article 466 (2019)

Vorträge Dörschel V., Ziese M., Verhey J.L., Böckmann-Barthel M.: Konsonanzempfinden prälingual ertaubter Kinder mit Cochlea-Implantat. Deutsche Gesellschaft für Audiologie, 19. Jahrestagung. (11.03.2016)

Magdeburg, 06.03.2020

Victoria Zimmer

10 Anlagen

Anlage 1

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Ethik-Kommission

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

und am Universitätsklinikum Magdeburg A.ö.R.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. med. C. Huth



Universitätsklinikum • Leipziger Straße 44 • D-39120 Magdeburg

Herrn Prof. Dr. rer. nat. J. L. Verhey
Univers.klinik f. Hals-, Nase-, Ohrenkrankheiten, Abt. Exp. Audiologie
Universitätsklinikum, Haus 9, 393a
Leipziger Str. 44
39120 Magdeburg

Tel.
(0391) 6714314
6714344

Fax
(0391) 6714354
67290185

eMail
norbert.beck@med.ovgu.de
ethikkommission@ovgu.de

Datum

22.01.2013

Unser Zeichen: 10/13

SFB/TRR 31 „Das aktive Gehör“

Teilprojekt B03: Psychoacoustical modelling of auditory perception in humans

Sehr geehrter Herr Prof. Verhey,
sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

die Ethik-Kommission der Otto-von-Guericke-Universität an der Medizinischen Fakultät und am Universitätsklinikum Magdeburg hat die übergebenen Unterlagen zur o. g. Studie überprüft, in der letzten Kommissionssitzung eingehend erörtert und ist zu der Auffassung gekommen, dass gegen die Durchführung keine ethischen Bedenken bestehen. Diese **zustimmende Bewertung** ergeht unter dem Vorbehalt gleichbleibender Gegebenheiten.

Die Verantwortlichkeit des jeweiligen Prüfwissenschaftlers / behandelnden Prüfarztes bleibt in vollem Umfang erhalten und wird durch diese Entscheidung nicht berührt. Alle zivil- oder haftungsrechtlichen Folgen, die sich ergeben könnten, verbleiben uneingeschränkt beim Projektleiter und seinen Mitarbeitern.

Beim Monitoring sind die Bestimmungen des Bundes- und Landesdatenschutzgesetzes sowie die sich aus der ärztlichen Schweigepflicht ergebenden Einschränkungen zu beachten, was eine Aushändigung kompletter Patientenakten zum Monitoring ausschließt. Ein Monitoring personen- und studienbezogener Daten wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Um die Übersendung von studienbezogenen Jahresberichten / Abschlussberichten / Publikationen wird unter Nennung unserer Registraturnummer gebeten.

Mit freundlichen Grüßen


(i. A. Dr. med. Norbert Beck, Geschäftsführer)
Prof. Dr. med. C. Huth
Vorsitzender der Ethik-Kommission

Ethik-Kommission
der Otto-von-Guericke-Universität an der Medizinischen Fakultät
und am Universitätsklinikum Magdeburg A.ö.R.
Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. med. C. Huth

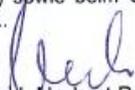
Anlage zum Votum der Studie 10/13 vom 22.01.2013

Zum Zeitpunkt der Bewertung der vorstehenden Studie waren folgende Damen und Herren Mitglied der Ethik-Kommission der Otto-von-Guericke-Universität an der Medizinischen Fakultät und am Universitätsklinikum Magdeburg:

Herr Prof. Dr. med. Norbert Bannert	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Pädiater
Frau Prof. Dr. phil. Eva Brinkschulte	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Bereich Geschichte, Ethik und Theorie der Medizin
Herr Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen	Fakultät für Elektrotechnik und Informations- technik, Institut für Automatisierungstechnik
Herr Prof. Dr. med. Christof Huth	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Universitätsklinik für Herz- und Thoraxchirurgie
Frau Assessorin Ute Klienten	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Stabsstelle Recht
Herr OA Dr. med. Werner Kuchheuser	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Institut für Rechtsmedizin
Herr Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Läuter	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Mathematiker, Biometriker
Herr Prof. Dr. med. Frank Peter Meyer	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Klinischer Pharmakologe
Herr Prof. Dr. med. Jens Schreiber	Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Universitätsklinik für Kardiologie, Angiologie und Pneumologie, Fachbereich Pneumologie
Herr Prof. Dr.-Ing. Klaus Tönnies	Fakultät für Informatik, Institut für Simulation und Graphik, AG Bildverarbeitung/Bildverstehen

Mitglieder der Ethik-Kommission, die in eine Studie eingebunden sind, haben für die Votierung der betreffenden Studie kein Stimmrecht.

Die Ethik-Kommission der Otto-von-Guericke-Universität an der Medizinischen Fakultät und am Universitätsklinikum Magdeburg ist unter Beachtung entsprechender internationaler Richtlinien (ICH, GCP) und nationaler Richtlinien (AMG, GCP-V, MPG, MPKPV) tätig, nach Landesrecht (Hochschulmedizingesetz des Landes Sachsen-Anhalt § 1 Abs. 4, Verordnung über Ethik-Kommissionen zur Bewertung klinischer Prüfungen von Arzneimitteln - Ethik-Kom-VO LSA - i. d. akt. Fassung) legitimiert. Weiterhin besteht eine Registrierung der Ethik-Kommission beim Bundesamt für Strahlenschutz nach § 28g Röntgenverordnung (EK-043/R) und § 92 Strahlenschutzverordnung (EK-046/S) sowie beim Office for Human Research Protections, reg. no. IRB00006099, Rockville, MD, U.S.A..


Dr. med. Norbert Beck
Geschäftsführer der Ethik-Kommission

Anlage 2

Fragebogen zur Studie: Wahrnehmung musikalischer Harmonien bei Kindern mit Cochlea-Implantat

Name:	Datum der Untersuchung:
Geburtsdatum:	Datum der (ersten) Erstanpassung:
Ausgefüllt von:	<input type="checkbox"/> selbst <input type="checkbox"/> Eltern

Bitte trag / tragen Sie die jeweilige Dauer ein:

1. Wie viele Halbjahre – einschließlich des jetzigen – hattest Du / hatte Ihr Kind Musikunterricht in der Schule? <i>(0 : falls gar nicht)</i>	
2. Wieviele Halbjahre – einschließlich des jetzigen – hattest Du / hatte Ihr Kind Instrumentalunterricht außerhalb der Schule? <i>(0 : falls gar nicht)</i>	
3. Singst Du / singt Ihr Kind im Chor? Wieviele Halbjahre schon – einschließlich des jetzigen? <i>(0 : falls gar nicht)</i>	

Treffen die folgenden Fragen zu?

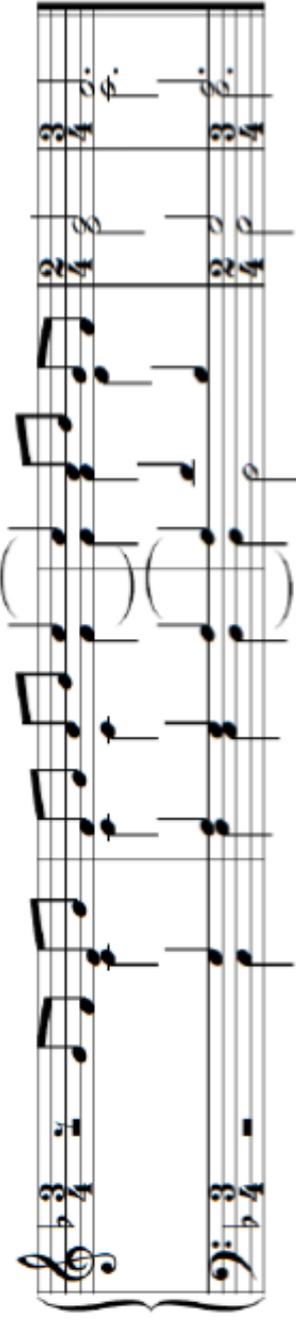
Bitte gib / geben Sie jeweils eine Ziffer zwischen 0 und 3 an:

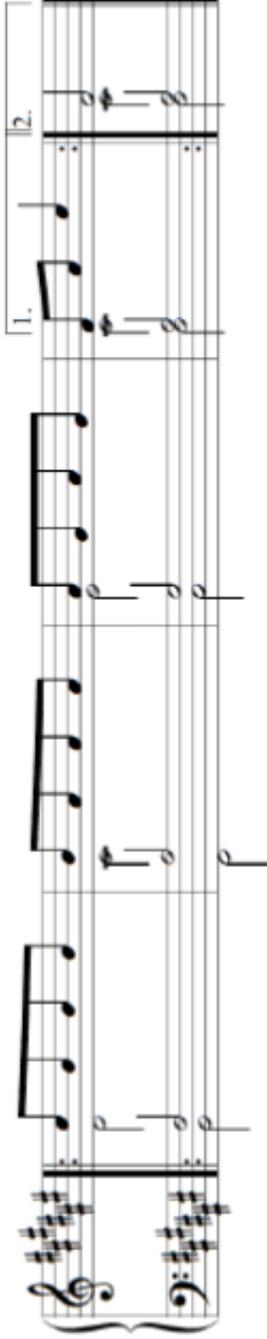
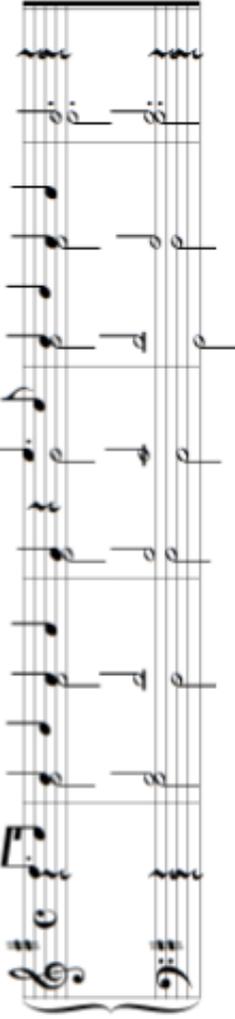
4. Spielst du / spielt Ihr Kind ein Instrument? <i>gar nicht: 0 / mal ausprobiert: 1 / ein bisschen: 2 / gern und viel: 3</i>	
5. Singst Du / singt Ihr Kind gern? <i>gar nicht: 0 / 1 / 2 / 3: gern und viel</i>	
6. Hörst Du / hört Ihr Kind gern Musik? <i>gar nicht: 0 / 1 / 2 / 3: gern und viel</i>	
7. Wie empfindest Du den Klang von Musik mit Deinem Cochlea-Implantat (über den Mikrofoneingang)? a) <i>angenehm: 0 / 1 / 2 / 3: unangenehm:</i> b) <i>undeutlich: 0 / 1 / 2 / 3: deutlich</i>	a) b)

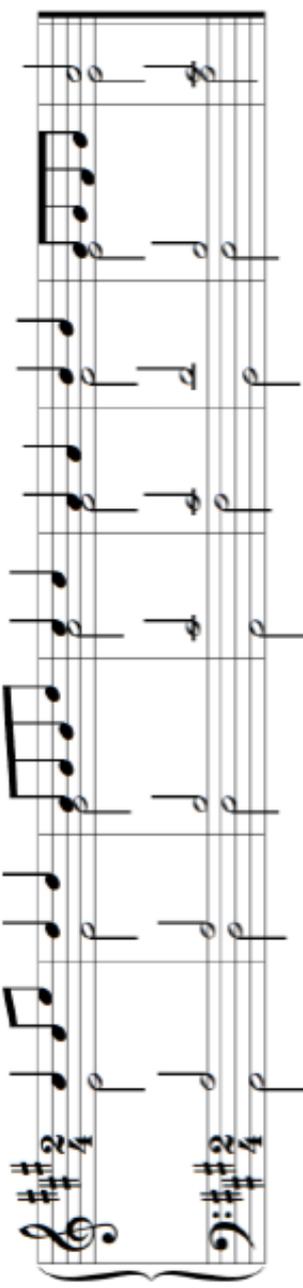
Verfasser: Dr. M. Böckmann-Barthel,
HNO-Universitätsklinik Magdeburg, Abt. Experimentelle Audiologie 2014

Anlage 3

Titel mit Partitur	Tonart
<p>Guten Abend, gut' Nacht</p> 	D-Dur
<p>Schneeflöckchen, Weißröckchen</p> 	Es-Dur

Titel mit Partitur	Tonart
<p data-bbox="284 1568 316 1832">Spannenlanger Hansel</p> 	E-Dur
<p data-bbox="857 1496 888 1832">Sandmann, lieber Sandmann</p> 	F-Dur

Titel mit Partitur	Tonart
<p data-bbox="284 1435 316 1827">Fuchs, du hast die Gans gestohlen</p> 	Fis-Dur
<p data-bbox="857 1518 888 1827">In der Weihnachtsbäckerei</p> 	G-Dur

<p>Titel mit Partitur</p>	<p>Tonart</p>
<p>Happy Birthday</p> 	<p>As-Dur</p>
<p>Grün, grün, grün sind alle meine Kleider</p> 	<p>A-Dur</p>