

Aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kiefergesundheit
des Universitätsklinikums Würzburg
Klinik für Kieferorthopädie
Direktorin: Professor Dr. med. dent. A. Stellzig-Eisenhauer

**Vergleichende Analyse melodischer Eigenschaften von frühen Komfortlauten bei
gesunden und hochgradig hörgeschädigten Säuglingen**

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Daria Maria Blum
aus Würzburg

Würzburg, März 2020

Referentin: Prof. Dr. rer. nat. Kathleen Wermke

Koreferentin: Prof. Dr. med. Wafaa Shehata-Dieler

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung:

14.08.2020

Die Promovendin ist Zahnärztin.

Für Momo

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr	5
2.1 Pränatales Hörvermögen.....	5
2.2 Postnatale audio-vokale Entwicklung	7
2.3 Auswirkungen einer Hörminderung auf die vorsprachliche Entwicklung	12
3 Grundlagen zum auditiven System	16
3.1 Anatomische und physiologische Grundlagen	16
3.2 Formen der Schwerhörigkeit und Verfahren der Früherkennung	21
4 Material und Methoden	26
4.1 Studiendesign des übergeordneten Gesamtprojekts und Einordnung der Arbeit	26
4.2 Probandenkollektiv	29
4.3 Datenbasis	33
4.4 Datenanalyse	38
4.4.1 Segmentierung der Rohdaten.....	41
4.4.2 Annotation der Lautserien	42
4.4.3 Extraktion der Einzelsignale	43
4.5 Qualitative und quantitative Analyse.....	43
4.5.1 Vorbereitung der extrahierten Einzelsignale	44
4.5.2 Klassifikation der Melodiestructur	44
4.5.3 Kategorisierung vorsprachlicher und früher sprachlicher Vokalisationen.....	46
4.5.3.1 Vokalisationstypen und Artikulationskategorien	47
4.5.3.2 Charakterisierung der untersuchten Vokalisationsart	50
4.6 Deskriptive Voranalyse.....	55
4.7 Statistische Analyse und Messgrößen.....	59
5 Ergebnisse	63
5.1 Quantitative Analyse der Melodiestructur	63
5.1.1 Auftrittshäufigkeit der Melodiestructurkategorien	63
5.1.2 Melodiekomplexitätsindex	66

5.2	Quantitative Analyse melodischer Frequenzeigenschaften.....	68
5.2.1	Mittlere Grundfrequenz.....	69
5.2.2	Standardabweichung, Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz	74
5.2.3	Grundfrequenzhub (FM-Amplitude)	80
5.3	Betrachtung ausgewählter Messgrößen auf Kindebene	83
5.3.1	Mittlere Grundfrequenz.....	83
5.3.2	Grundfrequenzhub	85
5.4	Referenzmodellbasierte Analyse	87
6	Diskussion.....	92
6.1	Strukturelle Melodieeigenschaften bei hörgeschädigten und gesunden Säuglingen – genetische Determination oder auditiver Lerneffekt?	92
6.2	Quantitative Melodieeigenschaften als möglicher Indikator einer Hörbehinderung bei Säuglingen	94
6.2.1	Ist die mittlere Grundfrequenz bei hörbehinderten Säuglingen tatsächlich höher?	94
6.2.2	Standardabweichung, Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz	97
6.2.3	Grundfrequenzhub (FM-Amplitude)	98
6.3	Methodische Limitationen und Vorschläge für die weiteren Analysen im Rahmen der Kohortenstudie.....	100
7	Zusammenfassung	102
8	Literaturverzeichnis	105

Danksagung

Lebenslauf

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anatomische und funktionelle Entwicklungsvorgänge des pränatalen auditiven Systems, erweiterte und modifizierte Abbildung nach Lasky und Williams (2005, S. e144).....	7
Abbildung 2:	Stadien der vorsprachlichen Entwicklung und Einordnung der analysierten Vokalisationsart	10
Abbildung 3:	Aufbau des Ohrs, Geo-Science-International (2018).....	17
Abbildung 4:	Studiendesign und Probandengruppen vorliegender Arbeit	30
Abbildung 5:	PRAAT-Ausgabefenster.....	38
Abbildung 6:	Ablauf der computergestützten Analyseschritte zur Datenaufbereitung	40
Abbildung 7:	Melodie-/Intensitätsdiagramm eines Signals in CDAP und zugehöriges Frequenzspektrum des Signals (KAY-CSL)	41
Abbildung 8:	Darstellung der verschiedenen Vokantenformen.....	54
Abbildung 9:	Stilisierte Vokant mit Maßangaben für Hub, Maxima und Minima der Grundfrequenz sowie der Länge.....	55
Abbildung 10:	Streudiagramm zur Verteilung des geometrischen Mittelwerts in NH- und Referenzgruppe über die Gesamtheit der Vokanten	57
Abbildung 11:	Streudiagramm zur Verteilung des absoluten Hubs in NH- und Referenzgruppe über die Gesamtheit der Vokanten	57
Abbildung 12:	Kreisdiagramm über den prozentualen Anteil von separaten Vokanten und Vokanten mit Pseudokonsonanten über alle Gruppen.....	58
Abbildung 13:	Säulendiagramm zur Verteilung der Melodiebogenstrukturen über die Gesamtheit der Vokantenkategorien aller Probanden	64
Abbildung 14:	Boxplot zur Verteilung der MCI-Werte pro Gruppe (HI: n = 8, KG: n = 12)	67
Abbildung 15:	Boxplot zur Verteilung der MCI-Werte in zwei Altersbereichen.....	68
Abbildung 16:	Histogramm zur Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Vokanten	70
Abbildung 17:	Streudiagramm über die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Vokanten in der Kontrollgruppe.....	71
Abbildung 18:	Streudiagramm über die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Vokanten in der HI-Gruppe	71

Abbildung 19:	Streudiagramm über die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Aufnahmen mit aktivierter Hörhilfe des Probanden H7	72
Abbildung 20:	Boxplots zur Verteilung der mittleren Grundfrequenzwerte in den Gruppen HI und KG vor der 23. Woche ($\leq 154d$), die HI-Gruppe ist hier unversorgt sowie nach der 23. Woche ($> 154d$), die HI-Gruppe ist hier versorgt	73
Abbildung 21:	Streudiagramme zur Standardabweichung der Grundfrequenz über den untersuchten Altersbereich	75
Abbildung 22:	Histogramme zur Verteilung der Maximalwerte der Vokanten in beiden Gruppen a) KG und b) HI	76
Abbildung 23:	Histogramme zur Verteilung der Minimalwerte in den beiden untersuchten Gruppen	77
Abbildung 24:	Streudiagramme für die Grundfrequenzmaximal- und Minimalwerte.....	79
Abbildung 25:	Verteilung des absoluten Hubs innerhalb der Gruppen a) und b)	80
Abbildung 26:	Streudiagramm über den absoluten Hub der Vokanten der Kontrollgruppe im untersuchten Altersbereich.....	81
Abbildung 27:	Streudiagramm über den absoluten Hub der Vokanten der HI-Gruppe im gesamten untersuchten Altersbereich	81
Abbildung 28:	Verteilung der Werte des absoluten Hubs unter Berücksichtigung der 23-Wochen-Trennung	82
Abbildung 29:	Boxplot der Grundfrequenz auf Kindebene im Gruppenvergleich (gesamter Altersbereich).....	84
Abbildung 30:	Gruppiertes Boxplot auf Kindebene über die Entwicklung innerhalb der Gruppen in den definierten Altersbereichen vor bzw. nach der 23. Woche.....	85
Abbildung 31:	Boxplot über den absoluten Hub der Vokanten auf Kindebene im Gruppenvergleich (gesamter Altersbereich).....	86
Abbildung 32:	Gruppiertes Boxplot des absoluten Hubs auf Kindebene innerhalb der Gruppen in den definierten Altersbereichen vor bzw. nach der 23. Woche	87
Abbildung 33:	Streudiagramm der mittleren Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe	88
Abbildung 34:	Streudiagramm der Standardabweichung der Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe	89
Abbildung 35:	Streudiagramm der Maximalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe	90

Abbildung 36: Streudiagramm der Minimalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe	90
Abbildung 37: Streudiagramm des absoluten Hubs über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe.....	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Modellvergleich zu Stadien der vorsprachlichen Entwicklung, modifiziert nach, Clement (2004, S. 25)	10
Tabelle 2:	Graduierung der Schwerhörigkeit (World Health Organization, 1991), Einteilung nach Tonaudiogramm.....	23
Tabelle 3:	Klinische Daten zu Hörleistung und Versorgung der HI- Probanden	32
Tabelle 4:	Perinataldaten der Probanden	33
Tabelle 5:	Lautanzahl der Probanden (Gesamtzahl und Vokantenzahl)	35
Tabelle 6:	Altersverteilung des Datenmaterials innerhalb der finalen Kontrollgruppe	36
Tabelle 7:	Altersverteilung des Datenmaterials der HI-Gruppe unter Berücksichtigung der Versorgung mit Hörhilfe	37
Tabelle 8:	Schema zur Annotation der Lautserien	43
Tabelle 9:	Verteilung der gesamten Vokanten auf NH- und Referenzgruppe.....	56
Tabelle 10:	Verteilung der zwei Vokantenkategorien (V und V,C?) innerhalb der Probandengruppen	58
Tabelle 11:	Verteilung der Melodiebogenstruktur über alle Vokanten innerhalb der Probandengruppen.....	65
Tabelle 12:	Anteile von V und V-Kombi innerhalb der Gruppen.....	65
Tabelle 13:	Verteilung der Melodiebogenstruktur der Vokanten ohne V-Kombi	66
Tabelle 14:	Melodiekomplexitätsindex je Gruppe	66
Tabelle 15:	Melodiekomplexitätsindex in zwei Altersbereichen (vor bzw. nach der 23. Woche) je Gruppe.....	67
Tabelle 16:	Deskriptive Statistik des geometrischen Mittelwerts der Grundfrequenz aller Vokanten pro Gruppe	69
Tabelle 17:	Deskriptive Statistik der mittleren Grundfrequenz innerhalb der beiden Gruppen HI und KG vor der 23. Woche ($\leq 154d$), die HI-Gruppe ist hier unversorgt und nach der 23. Woche ($> 154d$), die HI-Gruppe ist hier versorgt.....	73
Tabelle 18:	Deskriptive Statistik der Standardabweichung der Grundfrequenzwerte der Vokanten	74
Tabelle 19:	Deskriptive Statistik der Maximalwerte der Vokanten.....	75

Tabelle 20:	Deskriptive Statistik der Maximalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten der Kontrollgruppe und der HI-Gruppe mit 23-Wochen-Trennung	76
Tabelle 21:	Deskriptive Statistik der Minimalwerte aller Vokanten	77
Tabelle 22:	Deskriptive Statistik der Minimalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten der Kontrollgruppe und der HI-Gruppe mit 23-Wochen-Trennung	78
Tabelle 23:	Deskriptive Statistik des absoluten Hubs der Vokanten in Kontroll- und HI-Gruppe über den gesamten Untersuchungszeitraum	80
Tabelle 24:	Deskriptive Statistik des absoluten Hubs in KG und HI-Gruppe unter Berücksichtigung der Trennung in die zwei definierten Altersbereiche.....	82
Tabelle 25:	Mittlere Grundfrequenz auf Kindebene im Gruppenvergleich über den gesamten Altersbereich	83
Tabelle 26:	Absoluter Hub der Vokanten auf Kindebene im Gruppenvergleich (über den gesamten Altersbereich)	86

Abkürzungsverzeichnis

ABR	Auditory brainstem response
AEP	Auditory evoked potentials
ASSR	Auditory steady-state responses
BERA	Brainstem evoked response audiometry/Hirnstammaudiometrie
C	Konsonantisches Silbenelement
CDAP	Cry-Data-Analysis Programm
CHC	Comprehensive Hearing Center der Universität Würzburg
CI	Cochlea-Implantat
d	Day/Alter in Tagen
DZH	Deutsches Zentralregister für kindliche Hörstörungen
f_0	Grundfrequenz
FF	Freifeldaudiometrie
HA	Hearing aid
HI	Hearing impaired
HNO	Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde
KG	Kontrollgruppe
LKGS	Lippen-Kiefer-Gaumen-Segelspalte
m	Männlich
Max	Maximum
MCI	Melodiekomplexitätsindex
Min	Minimum
N	Anzahl der Fälle
NHS	Neugeborenen-Hörscreening
OAE	Otoakustischen Emissionen
p.m.	Post menstruationem
SE	Standard error/Standardfehler
SSW	Schwangerschaftswoche
Std	Standardabweichung
V	Vokalisches Silbenelement
w	Weiblich
ZVES	Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen

1 Einleitung

„Alle Sprache ist Bezeichnung der Gedanken, und umgekehrt die vorzüglichste Art der Gedankenbezeichnung ist die durch Sprache, dieses größte Mittel, sich selbst und andere zu verstehen.“

- Immanuel Kant (1798)¹

Ohne Worte bleibt einem die Welt ein Stück weit verschlossen. Sprache ist das wohl wichtigste Kommunikationsmittel des Menschen. Eine unzureichend ausgebildete verbale Kommunikationsfähigkeit kann zu Problemen in unterschiedlichen Bereichen führen. Fast jeder Erwachsene kennt die Herausforderung, die das Erlernen einer neuen Sprache mit sich bringt. Je globaler und vernetzter die Gesellschaft wird, desto größere Bedeutung bekommt die Kenntnis unterschiedlicher Sprachen. Um miteinander in Kontakt treten zu können muss man „eine gemeinsame Sprache“ finden. Dies gilt nicht nur für die entwickelte Sprache Erwachsener, sondern auch für die vorsprachliche Vokalisation des Säuglings mit der Mutter.

Was später mühevoll erlernt werden muss und viel Übung erfordert, lernen Säuglinge scheinbar ganz nebenbei. Nur knapp ein Jahr nach der Geburt kann ein gesunder Säugling bereits die ersten Wörter sprechen und wenn er bi- oder multilingual aufwächst sogar in verschiedenen Sprachen (Cenoz & Genesee, 2001; Pettito et al., 2001; Stark, 1980). Unabhängig davon, ob Italienisch, Französisch, Mandarin oder Deutsch die zu erlernende Muttersprache ist, durchläuft jeder Säugling dabei bestimmte Entwicklungsphasen (Martin, 1981; Oller, 2000; Stark, 1980). Der Spracherwerb von Säuglingen beginnt mit einfachen Melodiestructuren und zeigt eine kontinuierliche unidirektionale Entwicklung hin zu komplexeren Strukturmustern. Diese liefern die Basis für die Bildung von Silben und Wörtern (z.B. Wermke & Mende, 2011). Um das angeborene Entwicklungsprogramm zum Erwerb gesprochener Sprache ungestört umzusetzen, muss ein Säugling hören können (Vihman, 1996; Wermke & Mende, 2011). Fehlt der Sprachinput von außen, beispielsweise aufgrund von Taubheit, treten bereits innerhalb des ersten Lebensjahres Besonderheiten in der vorsprachlichen Entwicklung auf. Dies kann eine Langzeitwirkung auf die spätere Sprach- und Kommunikationsfähigkeit haben (Clement,

¹ Originalzitat von Immanuel Kant (1798), Der Streit der Fakultäten, S. 192, digitale Version der Universität Duisburg, verfügbar unter <https://korpora.zim.uni-duisburg-essen.de/kant/aa07/Inhalt7.html>, zuletzt geprüft am 30.08.2019.

Koopmans-van Beinum & Pols, 1996; Oller & Eilers, 1988). Auffälligkeiten in der sozialen und kognitiven Entwicklung sowie in der Identitätsbildung sind nur einige der möglichen gravierenden langfristigen Konsequenzen (Fornefeld, 2004). Für die ungestörte Entwicklung der Sprachfähigkeit - darüber ist man sich heute einig - ist ein funktionierendes Hörsystem grundlegend.

Es ist allgemein anerkannt, dass die Ausbildung und Entwicklung des neuralen Systems sowie die Myelinisierung von Nerven auf Stimulation beruht (Clement, 2004). Laut D. R. Moore (2002) geht man heute davon aus, dass neuronale Stimulation besonders im frühen Lebensabschnitt für die Entwicklung essentiell ist und auditiver Input sogar während der gesamten Lebensspanne eine wichtige Bedeutung für die Funktion zentraler Strukturen hat. Wird der Hörnerv, bzw. die an der Verarbeitung akustischer Signale beteiligten Hirnstrukturen, in der vorsprachlichen Entwicklungsphase nicht ausreichend stimuliert, könnten Einbußen im Gehör bis hin zu Atrophie des auditiven Systems mögliche Folgen sein (Neville & Bavelier, 2006). Bei Vorliegen einer angeborenen Hörstörung ist deshalb eine frühzeitige Diagnose und Therapie unerlässlich (Dettman et al., 2016; Götte & Nicolai, 2019; Houston, Pisoni, Kirk, Ying & Miyamoto, 2003).

Dies bestätigen auch aktuelle Studien, bei denen die Hörfähigkeit hochgradig sensorineural hörbehinderter Säuglinge frühzeitig durch Cochlea Implantation ermöglicht wurde (Colletti et al., 2005; Connor, Craig, Raudenbush, Heavner & Zwolan, 2006; Fagan, 2014, 2015; Kishon-Rabin, Taitelbaum-Swead, Ezrati-Vinacour & Hildesheimer, 2005). Laut einer Studie von Fagan (2014) befinden sich therapierte Säuglinge innerhalb von 4 Monaten quantitativ auf dem gleichen Vokalisationslevel der vorsprachlichen Entwicklung wie gesunde gleichaltrige Säuglinge. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass nicht nur das Hören von Umgebungssprache relevant ist, sondern vor allem auch das Hören von sich selbst. Die Vokalisation der Säuglinge im vorsprachlichen Alter könnte demnach besonders durch das Hören der eigenen Lautproduktion motiviert sein (Fagan, 2014). Daher geht man mittlerweile davon aus, dass eine möglichst frühzeitige Intervention hörgeschädigter Säuglinge, insbesondere durch Hörgeräte und Cochlea Implantate, für das Erlernen gesprochener Sprache von zentraler Bedeutung ist.

Neben einer Reihe weiterer Einflussfaktoren während der vorsprachlichen Entwicklungsphase ist der Aspekt des Hörens daher Gegenstand internationaler Forschung. Bezüglich der Bedeutung für die individuelle sprachliche Entwicklung sind noch immer viele Fragen offen, wie beispielsweise:

- Ab wann genau imitieren Säuglinge Elemente der Sprache, die sie hören und welche Elemente sind das?
- In welcher Weise wirkt sich eine hochgradig sensorineurale Hörminderung auf die Lautproduktion von wenige Monate alten Säuglingen aus?

Auch die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Thema des Höreinflusses auf die vorsprachliche Lautproduktion. Insbesondere die Fragestellung, inwieweit sich eine hochgradige Hörminderung auf die Lautproduktion in der frühen Phase der Sprachentwicklung auswirkt, hat maßgeblich zur Motivation für das dieser Arbeit zugrunde liegende Projekt beigetragen (Kapitel 4.1).

Bereits intrauterin und in der frühen postnatalen Phase sind auditive Erfahrungen des Säuglings Teil der vorsprachlichen Entwicklung (Dehaene-Lambertz et al., 2010; Gratier & Devouche, 2011; Mampe, Friederici, Christophe & Wermke, 2009; Wermke, Pachtner et al., 2013). Studien legen nahe, dass frühe auditive Erfahrungen mit der Umgebungssprache beim Neugeborenen spezifische prosodische Muster im Gehirn etablieren könnten. Diese Muster beeinflussen möglicherweise später richtungsweisend den Erwerb der Muttersprache (Kuhl, 2004). Basierend auf diesen Erkenntnissen wird davon ausgegangen, dass eine adäquate Hörleistung eine grundlegende Voraussetzung für den ungestörten Reifungsprozess der vorsprachlichen Entwicklung ist. Die bisher angewandte Untersuchungstechnik zur Detektion von Schwerhörigkeit bei Neugeborenen mit dem BERAphon® weist eine hohe Sensitivität zur Identifikation von Schwerhörigkeit im mittleren Frequenzbereich auf, ist aber zur Bestimmung einer eventuell vorhandenen tieffrequenten Resthörigkeit weniger geeignet (Cebulla, Hofmann & Shehata-Dieler, 2014; Götte & Nicolai, 2019). Eine wichtige Voraussetzung des BERA-Verfahrens ist zudem, dass sich das Kleinkind in ruhiger Lage befindet und nicht weint. Neugeborene und Säuglinge sollten bei diesem Testverfahren idealerweise schlafen, was zum Teil relativ aufwendige Rahmenbedingungen erfordert (Götte & Nicolai, 2019). Die Entwicklung einer ergänzenden Methode zur individualisierten Charakterisierung einer potenziellen Hörminderung bei Säuglingen ist daher klinisch erstrebenswert.

Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu untersuchen, ob sich die ersten Komfortvokalisationen in der frühen Gurr- und Babbelphase der vorsprachlichen Entwicklung bei Säuglingen mit hochgradiger sensorineuraler Hörstörung von denen normalhörender Säuglinge unterscheiden. Es sollte geprüft werden, inwiefern sich die Rückkopplung

zwischen Hörfähigkeit und Lautproduktion von Säuglingen in der vorsprachlichen Entwicklung auswirkt. Sofern zwischen gesunden und hörgeschädigten Babys im Alter von 2 bis 6 Monaten signifikante Unterschiede der Lauteigenschaften gefunden werden, würde dies die Annahme angeborener, fixierter Laute widerlegen (Oller, 2000; Stark, 1980). Um dies zu untersuchen wurde eine häufig vorkommende, einfache Vokalisationsart des frühen Lautrepertoires der Komfortvokalisation gewählt. Bei der Vokalisationsart handelt es sich um die sogenannten Vokanten, welche in Kapitel 4.5.3.2 definiert und ausführlich beschrieben werden. Die potenzielle Auswirkung einer hochgradigen sensorineuralen Hörstörung auf die Grundfrequenzeigenschaften sowie die Melodiestructur dieser Lautart war Gegenstand der quantitativen Analyse vorliegender Arbeit. Parallel wurden in einer anderen Dissertation im Rahmen des Gesamtprojekts die zeitlichen Eigenschaften analysiert (Clad, Dissertation in Vorbereitung). Für die Auswahl einer geeigneten Vokalisationsart war eine umfassende Vorarbeit notwendig, sodass im Rahmen der Arbeit rund 20.000 Einzelsignale analysiert wurden. Eine ausführliche Beschreibung zum Ablauf der einzelnen Analyseschritte sowie der Auswahl der Probanden findet sich in Kapitel 4. Da diese Dissertation Teil eines größeren Gesamtprojekts ist (siehe Kapitel 4.1), dient die Untersuchung vornehmlich einer ersten Hypothesengenerierung. Sofern sich bereits bei dieser simplen Vokalisationsart Differenzen zeigen, könnte dies richtungsweisend für weitere projektspezifische Fragestellungen sein.

Die vorliegende Analyse basiert auf den folgenden Fragestellungen:

1. Ist die Entwicklung der Melodiestructur von einfach zu komplex in den ersten Lebensmonaten von der Hörleistung und somit von der auditiven Rückkopplung abhängig?
2. Unterscheidet sich die mittlere Grundfrequenz (Tonlage) der Vokanten normalhörender und kongenital hochgradig hörgeschädigter Säuglinge?
3. Gibt es durch eine hochgradige Hörstörung bei Säuglingen Veränderungen in der Frequenzmodulationsamplitude (Hub) von Vokanten?

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

2.1 Pränatales Hörvermögen

Das Wissen um die Hörfähigkeit von Föten im Mutterleib ist vergleichsweise neu. Noch bis Ende des 19. Jahrhunderts war die Meinung vorherrschend, dass Säuglinge annähernd taub geboren werden (Uffelmann, 1890).² Angesichts des Befunds, dass bereits um die 22. Schwangerschaftswoche das Hörorgan weitestgehend ausgebildet ist, hat sich diese Ansicht inzwischen geändert. Heute geht man davon aus, dass der Fötus im letzten Trimester in der Lage ist zu hören (Birnholz & Benacerraf, 1983; Lasky & Williams, 2005; Wendler, Seidner & Eysholdt, 2015).

Die anatomischen Grundlagen für die spätere akustische Wahrnehmung werden mit der Anlage des Hörorgans in der 6. SSW geschaffen. Innerhalb der folgenden Monate bilden sich die Strukturen des Hörsystems weiter aus. Bereits mit circa 18 Wochen ist die Cochlea weitestgehend entwickelt (Wirth, Ptok & Schönweiler, 2000). Zu Beginn des letzten Schwangerschaftstrimesters zeigen sich zunehmend Reifungsprozesse der zentralen Strukturen des Hörsystems. Um die 38. SSW ist das Hörorgan vollständig ausgereift und die Hörzellen reagieren elektrophysiologisch wie beim erwachsenen Menschen (J. K. Moore & Linthicum, 2007).

Die perzeptive Hörleistung von Föten wurde mittlerweile in verschiedenen Studien untersucht (Birnholz & Benacerraf, 1983; Hepper & Shahidullah, 1994; Jenni & Largo, 2015). Anhand von Aufzeichnungen der Herzaktion (EKG) und neurologischen Messungen (EEG) konnten Jenni und Largo (2015) nachweisen, dass Föten auf akustische Stimuli mit einer Änderung von Herzfrequenz und Hirnaktivität reagieren. Laute Geräusche führten zu vermehrter Bewegung der Föten sowie einem Anstieg der Herzfrequenz, wohingegen Musik und der Klang der menschlichen Stimme eine Abnahme von Herzfrequenz und motorischer Aktivität bewirkten (Jenni & Largo, 2015). Im Jahr 1983 wiesen Birnholz und Benacerraf in der 25 SSW (p.m.) die ersten eindeutigen Reaktionen auf vibroakustische Stimulation im Bereich von 110 dB nach. Ab der 28. SSW ist der sogenannte Auropalpebralreflex zuverlässig vorhanden (Birnholz & Benacerraf, 1983). Dieser wird durch einen plötzlichen, starken akustischen Reiz ausgelöst und bewirkt ein Augenzwinkern mit Zusammenziehen der Augenbrauen. In der 27. SSW reagierten laut einer

² Zitiert nach Brezinka, Lechner und Stephan (1997).

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Studie von Hepper und Shahidullah (1994) bereits 96% der Föten auf 250- und 500-Hz Töne. Höhere Frequenzen im Bereich von 1.000 bis 2.000 Hz konnten erst in der 33. und 35. SSW bei allen Föten nachgewiesen werden. Auch neue Studien bestätigen diese Ergebnisse. J. K. Moore und Linthicum (2007) konnten bereits zu Beginn des dritten Trimesters die Hirnstammaktivität von Föten anhand erster behavioraler Reaktionen auf akustische Reize nachweisen.

Während der Schwangerschaft befindet sich das ungeborene Kind im Uterus in der mit Amnionflüssigkeit gefüllten Fruchtblase. Zudem ist der Fötus intrauterin durch die Organfunktionen der Mutter stetig einem gewissen „Geräuschpegel“ ausgesetzt (Benzaquen, Gagnon, Hunse & Foreman, 1990). Abgedämpft durch das Fruchtwasser kann der Fötus dennoch durch Knochenleitung Umgebungsgeräusche und Sprache wahrnehmen. Einen besonderen Stellenwert nimmt dabei die Stimme der Mutter ein, da sie nicht wie andere extrauterine, akustische Stimuli gedämpft wird (Spitzer, 2014). De-Casper und Spence (1986) postulierten, dass insbesondere die Prosodie, also melodisch-rhythmische Merkmale, eine wichtige Rolle spielen könnten. In einer Studie von Kisilevsky und Hains (2011) zum Einfluss von Umgebungsgeräuschen auf die Entwicklung sensorischer Fähigkeiten von Föten wurde untersucht, ab welchem Alter Sprechen und Sprache die auditive Verarbeitung beeinflussen. Hierbei wurde gezeigt, dass in der 32. bis 34. SSW bereits 46% der Föten die Stimme der Mutter von anderen unterscheiden können. Gemessen wurde hierzu die Herzfrequenzreaktion der Föten. Eine relativ lange Latenzzeit und eine anhaltende Dauer der Herzfrequenzreaktion lassen zudem darauf schließen, dass die auditive Verarbeitung zur Bildung neuronaler Netze führen könnte (Kisilevsky & Hains, 2011). Abbildung 1 stellt die wichtigsten anatomischen und funktionellen Entwicklungsvorgänge des pränatalen auditiven Systems von der 10. bis zur 40. SSW nochmals übersichtlich dar. Die Idee für diese Darstellung stammt von Lasky und Williams (2005), die eine vereinfachte Form dieser Art im Zeitrahmen von der 20. bis zur 40. SSW aufzeigten.

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

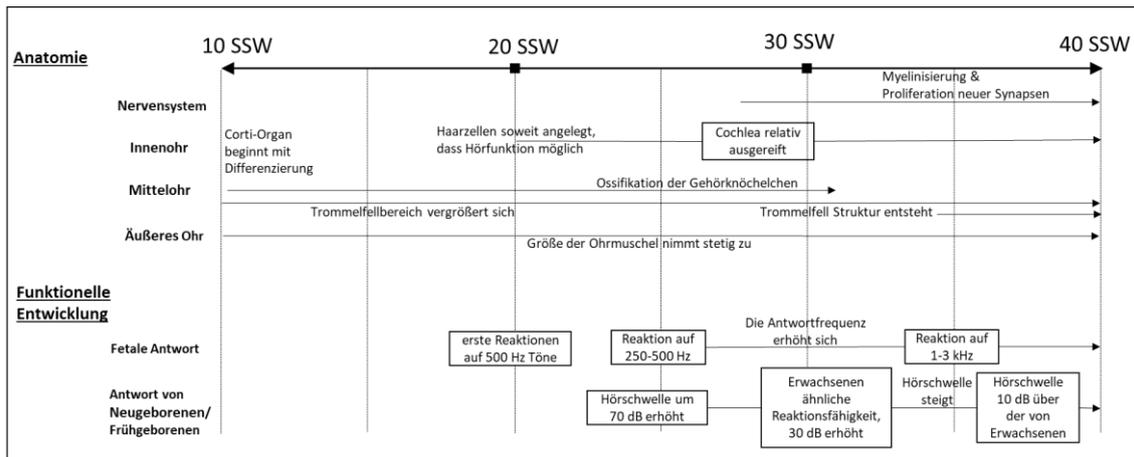


Abbildung 1: Anatomische und funktionelle Entwicklungsvorgänge des pränatalen auditiven Systems, erweiterte und modifizierte Abbildung nach Lasky und Williams (2005, S. e144)

Im weiteren Sinne beginnt somit schon intrauterin die perzeptive Sprachentwicklung und es wird die Grundlage für die spätere produktive Phase geschaffen. Gesunde, normalhörende Neugeborene haben damit im Vergleich zu Neugeborenen mit einer angeborenen hochgradigen Hörstörung bereits einen beachtlichen Lernvorsprung durch ihre intrauterinen auditiven Erfahrungen. Im Folgenden wird auf die audio-vokale Entwicklung nach der Geburt eingegangen.

2.2 Postnatale audio-vokale Entwicklung

Die Entwicklung von Sprache und Gehör sind eng miteinander verbunden. Kommt es zu einer schweren Beeinträchtigung im auditiven Bereich hat dies unweigerlich Auswirkungen auf den Spracherwerb. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, geht man heute davon aus, dass bereits pränatale auditive Erfahrungen einen Einfluss auf die Lautproduktion und Vokalisationsleistung von Säuglingen haben. Umgekehrt führen nicht erkannte und rechtzeitig therapierte Störungen der Hörleistung langfristig zu Sprachproblemen (Kiese-Himmel & Ohlwein, 2002; Witt, Landgraf & Pau, 2003).

Bereits direkt nach der Geburt ist das Hörorgan eines gesunden Neugeborenen voll funktionsfähig und der Säugling nimmt den Schall ungedämpft wahr. Das Neugeborene reagiert auf überschwellige akustische Reize mit einer Veränderung der Atmung und Innehalten der Körperbewegung (Niebuhr-Siebert, Schrey-Dern & Springer, 2011; Wirth et al., 2000).

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Cheour-Luhtanen et al. (1996) zeigten, dass Frühgeborene, die 30-35 Wochen nach der Konzeption auf die Welt kommen, bereits in diesem Alter eine Diskriminationsfähigkeit von unterschiedlichen Vokalen aufweisen.

Die Diskriminationsfähigkeit von Tonhöhen und Tonkonturen ist auch die Erklärung dafür, dass der Säugling postnatal die Stimme der Mutter erkennt und bevorzugt (DeCasper & Fifer, 1980). Und nicht nur die Stimme der Mutter – auch die pränatal gehörte Muttersprache können sie von anderen Sprachen unterscheiden. Dies konnten Sprachforscher anhand der intentionalen Saugrattenmodifikation der Säuglinge feststellen (Moon, Lagercrantz & Kuhl, 2013). Darüber hinaus kann der Säugling bereits wenige Tage nach der Geburt prosodische Elemente der Muttersprache in den eigenen Lauten spiegeln (Mampe et al., 2009; Wermke, Pachtner et al., 2013; Wermke et al., 2016).

Um die audio-vokalen Funktionen weiter auszubilden sind vor allem die ersten Lebenswochen nach der Geburt eine entscheidende Lernphase für das zentrale Hörsystem. In dieser sensiblen Phase besitzt der Säugling die Fähigkeit, die Laute der menschlichen Sprache sowie die unterschiedlichen Frequenzen wahrzunehmen. Das Neugeborene lernt zudem den Schall auf bestimmte prosodische Merkmale hin zu analysieren, sodass sich das zentralnervöse System ausbilden kann (Klinke, Kral & Hartmann, 2001). Im 3. bis 4. Lebensmonat beginnen normalhörende Säuglinge durch Kopf- und Augenbewegung nach einer Schallquelle zu suchen (Wirth et al., 2000). Mit zunehmendem Alter wird die Hörfähigkeit des Säuglings immer differenzierter. Sowohl das Richtungshören bildet sich kontinuierlich weiter aus als auch das Verständnis für die Bedeutung bekannter Wörter. Erst mit 5 bis 10 Lebensjahren ist das gesamte Hörsystem voll ausgereift und in seiner Funktionsfähigkeit mit dem eines Erwachsenen vergleichbar (Diller et al., 2003; Wendlandt, 2011).

Parallel zur Ausbildung der auditiven Funktion findet die vokale Entwicklung der Säuglinge statt. In der Literatur besteht weitgehende Übereinstimmung, dass jeder Säugling hierbei bestimmte Sprachproduktionsstadien durchläuft (Oller, 1980; Stark, 1980). Dennoch ist nach wie vor wenig darüber bekannt, welche Faktoren in welcher Weise Veränderungen der Vokalisationseigenschaften bei Säuglingen bewirken. Für den regelrechten Ablauf der Sprachentwicklung sind vermutlich verschiedene interne und externe Einflussfaktoren von Bedeutung. Ein elementarer, struktureller Faktor ist unbestritten die postnatale Reifung des Vokaltrakts, die durch rasante Entwicklungssprünge gekennzeichnet ist. Durch Gestalt- und Formänderungen des Vokaltrakts werden Unterschiede im Resonanzverhalten erzeugt, welche sich durch Rückkopplung auf die laryngeale

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Lautproduktion der Säuglinge auswirken. Verglichen mit dem Vokaltrakt eines Erwachsenen, erweist sich der eines Säuglings als deutlich kürzer. Zudem hat ein Säugling einen eher geraden als rechtwinklig gebeugten Oropharynx, eine relativ große, rückliegende Zunge, eine hohe Larynx Position sowie eine dadurch bedingte Annäherung von Epiglottis und Velum (Kent & Murray, 1982; Kuhl & Meltzoff, 1996). Innerhalb des ersten Lebensjahres kommt es zu anatomischen Umstrukturierungen, die Einfluss auf die Vokalisation der Säuglinge haben. Als typisches Beispiel soll hier die Absenkung des Larynx genannt werden. Diese erfolgt mit circa vier bis sechs Monaten und bewirkt die Trennung von Velum und Epiglottis. In diesem Zeitraum findet in der Regel auch ein wichtiger Schritt in der vorsprachlichen Entwicklung statt. Der Säugling beginnt weniger nasale Laute zu produzieren (Kent & Murray, 1982). Neben den anatomischen und diese begleitenden physiologischen Veränderungen spielt die auditive Erfahrung mit der Umgebungssprache im ersten Lebensjahr zunehmend eine zentrale Rolle. Kuhl und Meltzoff (1996) verwendeten in diesem Zusammenhang den Begriff des „Vocal learning“. Dieser beschreibt den Lernprozess von Säuglingen die Sprachlaute der Umgebung zu imitieren (Kuhl & Meltzoff, 1996). Um die zunehmende Relevanz dieses Prozesses im Verlauf der vorsprachlichen Entwicklung besser zu verstehen, wird im Folgenden der Forschungsstand zur vokalen Entwicklung im ersten Lebensjahr dargestellt.

In der Literatur gibt es bereits seit mehr als 100 Jahren Modelle, die die regelhaft ablaufenden Phasen in der vorsprachlichen Entwicklung im ersten Lebensjahr beschreiben. Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde von Major (1906) ein Modell mit insgesamt 9 Stadien definiert, welches den heutigen Ansichten noch immer nahekommt. Mit zu den bekanntesten Modellen der vokalen Entwicklung zählen heute die Modelle von Oller (2000), Stark (1980) und von Koopmans-van Beinum und Van der Stelt (1986). Es handelt sich bei allen Modellen um eine sehr formale Einteilung, die im Wesentlichen auf in diesem Alter typischerweise geäußerten Lauten basiert. Sie zeigen eine prinzipielle Entwicklungsreihe bzw. Phasenabfolge. Innerhalb der Modelle finden sich dadurch viele Übereinstimmungen. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die jeweiligen Stadien der drei bekanntesten vokalen Entwicklungsmodelle.

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Tabelle 1: Modellvergleich zu Stadien der vorsprachlichen Entwicklung, modifiziert nach, Clement (2004, S. 25)

Stadien der vorsprachlichen Entwicklung	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3	Stadium 4	Stadium 5
Stark (1980)	Reflexive Sounds	Cooing and laughter	Vocal Play	Reduplicated babbling	Non-reduplicated babbling & first words
Oller (1980)	Phonation-stage	Gooing/ primitive articulation-stage	Expansion-stage	Canonical-stage	Variegated babble and first words
Koopmanns/ Van der Stelt (1986)	Uninterrupted phonation	Interrupted phonation	One articulatory movement	Variegated phonation	Babbling and first words

Angelehnt an das Modell von Stark (1980) und Nathani, Ertmer und Stark (2006) kann man grob fünf Phasen unterscheiden, welche sich teilweise überschneiden. An dieser Einteilung (Abbildung 2) orientiert sich auch die vorliegende Arbeit. Für die abschließende quantitative Analyse wurde die spezifische Vokalisationsart der Vokanten gewählt. Diese ist besonders im „Cooing“-Stadium Bestandteil des Lautrepertoires von Säuglingen, aber sie wird auch in allen Entwicklungsphasen repräsentiert (siehe Kapitel 4.5.3.2).

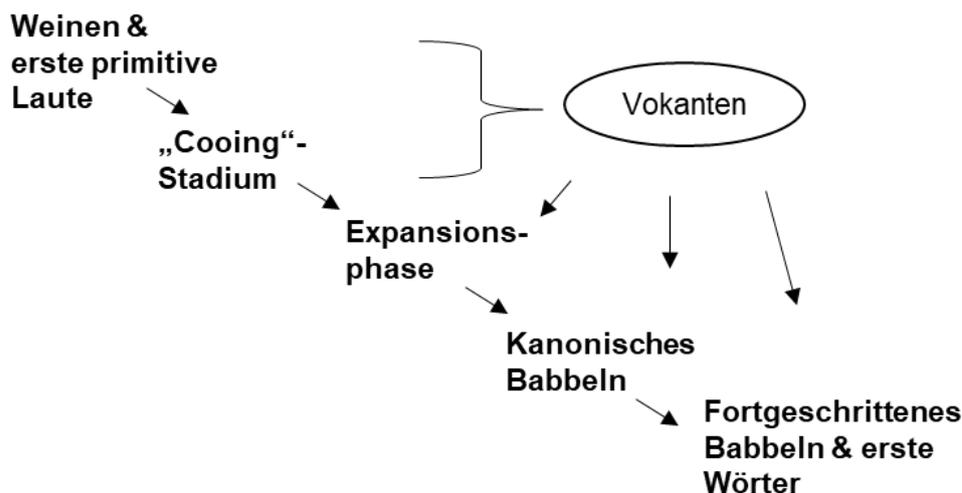


Abbildung 2: Stadien der vorsprachlichen Entwicklung und Einordnung der analysierten Vokalisationsart

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Das erste Stadium in der vorsprachlichen Entwicklung wird in den alten Modellen häufig als „**reflexive Phase**“ bezeichnet, die sich von Geburt bis circa zum 2. Lebensmonat erstreckt. In dieser Phase treten vorwiegend Weinlaute sowie vegetative Laute und „fuzzing“ (siehe Kapitel 4.4.2) auf. Aber auch die ersten „Protophone“, die laut Oller (2000) als Vorstufe der späteren sprachlichen Entwicklung dienen, sind hier bereits zu erkennen. Dabei handelt es sich um sogenannte „Quasivokale“ bzw. Halbvokale (Oller, 1980; Stark, 1980).³ Der Begriff „reflexive Phase“ ist inzwischen veraltet und stammt aus der Zeit, in der man annahm, Säuglingsweinen sei unflexibel und zeige wenig Variation.

Während der 2. Entwicklungsphase, die oft als „**Cooing**“-**Stadium** bezeichnet wird, kommen neben den Vokanten die ersten konsonantartigen Laute, die sogenannten „Closants“ vor. Dieses Stadium betrifft in etwa den Zeitraum vom 1. bis zum 4. Lebensmonat. Die konsonantartigen Gurr-laute werden im hinteren Bereich des Vokaltrakts gebildet, vermutlich durch die Bewegung des Zungenrückens gegen den weichen Gaumen. Cooing kann durch direkten Blickkontakt in Interaktionssituationen zwischen Eltern und Säugling ausgelöst werden. Dies wurde auch im Design des der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Projekts ausgenutzt (Kapitel 4.1). Zu den „Closants“ werden auch Lippenvibration („Raspberrie“) und Schnalzlauten („Clicks“) gezählt. Neben glottalen Stopps kommen in diesem Stadium zudem erste artikulatorische Elemente in Form von primitiven Closant-Vokanten-Kombinationen vor (Martin, 1981; Nathani et al., 2006; Stark, 1980). Insgesamt überwiegen bis zum 8. Lebensmonat die Vokanten im Verhältnis zu den Closants. Mit einem relativen Verhältnis von 4,5:1 im Alter von 0-2 Monaten und 2,8:1 mit 4-8 Monaten wird ihre abnehmende Tendenz mit zunehmendem Alter deutlich (Chen & Irwin, 1946; Kent & Murray, 1982).

In der **Expansionsphase**, welche auch als „**Vocal play**“ bezeichnet wird, treten eine Reihe von neuen Lauttypen in Erscheinung. In dieser Phase im Alter von 3 bis 8 Monaten scheinen Säuglinge noch intensiver als vorher mit der Stimmerzeugung zu experimentieren. Dadurch entstehen beispielsweise hochfrequente Quieker, „Squeals“. Die Säuglinge produzieren in diesem Altersbereich auch marginales Babbeln als Vorstufe zum späteren kanonischen Babbeln. Hierbei handelt es sich um langsam artikulierte, primitive Silben, die aus vokalartigen und konsonant-ähnlichen Elementen gebildet werden. Auch Intensität und Tonhöhe werden hierbei stark variiert (Nathani et al., 2006; Oller, 2000;

³ Nach Major (1906) werden vokalartige Laute auch als „vocants“ bezeichnet. Die Vokanten sind Gegenstand der Analyse vorliegender Arbeit hierauf wird in Kapitel 4.5.3.2 genauer eingegangen.

Stark, 1980). Säuglinge dieser Altersklasse bilden zudem vereinzelt erstmals „reife“ Vokale, die den Vokalen von Erwachsenen sehr nahe kommen (Nathani et al., 2006).

Während der 4. Entwicklungsphase, dem **Kanonischen Babbeln**, das üblicherweise in der zweiten Hälfte des ersten Lebensjahres auftritt (5.-10. Monat), treten im Lautrepertoire des Säuglings echte Silben aus Kombinationen von Konsonanten (C) und Vokalen (V) auf. Nathani et al. (2006) bezeichnen dieses Stadium deshalb auch als **Basic Canonical Syllables Level** (grundlegendes kanonisches Silben-Level). Die Silben werden hierbei in Wiederholungen aneinandergereiht, CVCVCV [mamama]. Kanonisches Babbeln unterscheidet sich von marginalem Babbeln laut Buder, Warlaumont und Oller (2013) durch die zeitliche Komponente mit einer Überleitungszeit <120 ms zwischen Konsonant- und Vokalkern innerhalb einer Silbe. Diese Entwicklungsphase nimmt in der Literatur einen besonderen Stellenwert ein, da sie vergleichsweise eindeutig selbst für ungeübte Beobachter perzeptiv-auditorisch erkennbar ist (Nathani et al., 2006).

Im Alter zwischen 9-12 Monaten beginnen die meisten Säuglinge mit dem sogenannten **fortgeschrittenen Babbeln (Advanced Forms)**. Bei diesem werden unterschiedliche Konsonant-Vokal-Einheiten gebildet [ma-ba], [ma-na]. Es entstehen sogenannte Protowörter [nane], welche für das Baby bereits eine Bedeutung haben. Zunehmend werden auch die ersten richtigen Wörter [(Ba)nane] Bestandteil des Lautrepertoires (Buder et al., 2013; Nathani et al., 2006).

2.3 Auswirkungen einer Hörminderung auf die vorsprachliche Entwicklung

In Bezug auf die vorhergehenden Kapitel kann man annehmen, dass ein ausgeprägtes auditorisches Defizit bei Säuglingen die Vokalisationseigenschaften beeinflusst. Der folgende Abschnitt fasst den Forschungsstand zur Auswirkung von Hörminderung auf die vorsprachliche Entwicklung zusammen.

Forschungsergebnisse zur vorsprachlichen Entwicklung von Säuglingen haben wiederholt gezeigt, dass ein verspätetes Einsetzen von kanonischem Babbeln einen Hinweis auf eine verzögerte vorsprachliche Entwicklung liefert (Buder et al., 2013; Eilers & Oller, 1994). Säuglinge mit hochgradigem Hörverlust zeigen eine solche verspätete Entwicklung (Clement, 2004; Hapsburg & Davis, 2006; Koopmans-van Beinum, Clement & van den Dikkenberg-Pot, 2001; Oller & Eilers, 1988). Zwar ist laut einer Studie von Scheiner, Hammerschmidt, Jürgens und Zwirner (2004) das Lautrepertoire von „emotionalen Lauten“ bei Hörbehinderten und gesunden Säuglingen im Alter zwischen einem und 17

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Monaten nahezu identisch, jedoch trat Babbeln erst mit deutlicher Verzögerung auf. Zu diesem Ergebnis kamen auch schon Oller, Eilers, Bull und Carney (1985; 1988) und Eilers und Oller (1994). Auch eine deutsche Pilotstudie von Wermke, Shehata-Dieler et al. (2013) mit drei kongenital hochgradig hörbehinderten Säuglingen, deutet tendenziell auf eine Verzögerung der Entwicklungsphase des kanonischen Babbelns hin. In einer Studie von Shehata-Dieler und Wermke (2018) zeigte sich zudem, dass durch CI-Versorgung eines hochgradig hörbehinderten Zwillingspaars die Entwicklungsstadien in einem zweiten schnelleren Durchgang erneut durchlaufen werden. Erst ab dem Zeitpunkt der CI-Aktivierung besteht die Möglichkeit durch auditive Erfahrungen dazuzulernen.

Zum Einfluss von Hörbehinderung auf die mittlere Grundfrequenz liegen divergente Studienergebnisse vor. Während in den ersten Monaten zwar zum Teil von Unterschieden in der mittleren Grundfrequenz berichtet wird, sind laut aktueller Studien deutliche Unterschiede erst mit zunehmendem Alter nachzuweisen. Hierzu ist anzumerken, dass insgesamt für den Altersbereich vor 6 Monaten nur wenig Datenmaterial zur Auswirkung von Hörbehinderung, insbesondere auf die mittlere Grundfrequenz, vorhanden ist. Zudem weisen viele der Studien bei genauer Betrachtung gewisse methodische Defizite und Limitationen⁴ auf, was ebenfalls auf Einschränkungen der Erkenntnisse hinweisen könnte. Clement et al. (1996) und Clement, Koopmans-van Beinum und van den Dikkenberg-Pot (1998) untersuchten beispielsweise den Einfluss von Hörbehinderung auf die Vokalisationsleistung von Säuglingen im ersten Lebensjahr. Analysiert wurden Vokalisationen von Säuglingen im Alter zwischen 2,5 und 18 Monaten mit einem schweren bis hochgradigen Hörverlust. Hierbei wiesen die hörgeschädigten Probanden bei Mittelung über den gesamten Untersuchungszeitraum tendenziell eine erhöhte mittlere Grundfrequenz auf. Allerdings schien dieser Effekt vornehmlich auf höheren Werten ab 6,5 Monaten zu beruhen. Erst ab 9,5 Monaten wurden diese Unterschiede signifikant (Clement et al., 1996; Clement et al., 1998). Clement, Koopmans-van Beinum und den Os (1994) postulierten, dass die mittlere Grundfrequenz in den ersten Monaten vorwiegend durch anatomisch-physiologische Einflüsse bestimmt wird und auditorische Erfahrungen erst nach den ersten 10 Monaten zunehmend Bedeutung erlangen. Vereinzelt wurde jedoch auch schon von einem früheren Einfluss auf die Frequenzeigenschaften durch Hörbeeinträchtigung berichtet (Iyer & Oller, 2008). Studien in denen die

⁴ Limitationen ergeben sich zum Teil aus der Heterogenität der untersuchten Altersbereiche von gesunden und hörgeschädigten Säuglingen. Zudem findet häufig der Versorgungsstatus mit Hörhilfe nicht hinreichend Berücksichtigung oder es werden pädaudiologische Befunde nicht vollständig berichtet. Insgesamt beruhen viele Studien auf einer relativ kleinen Datenbasis.

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Grundfrequenzwerte von Weinlauten hochgradig hörbehinderter Kinder zwischen 4 und 10 Jahren analysiert wurden, wiesen hingegen durchgehend signifikant höhere Grundfrequenzwerte auf (Jones, 1971; Ryalls et al., 1993).

Sowohl in einer auditiv-perzeptiven Studie zum Vokalisationstyp „Weinen“ von Möller und Schönweiler (1999), als auch in einer Untersuchung zu „emotionalen Lauten“ und „Babbeln“ von Scheiner et al. (2004) zeigten sich keine Differenzen hinsichtlich der mittleren Grundfrequenz. Dafür wurden in beiden Studien Unterschiede in anderen artikulatorisch-phonatorischen Bereichen wie beispielsweise dem Einsetzen von kanonischem Babbeln sowie der Länge und Komplexität von Melodien beobachtet. Die Aussagekraft der Ergebnisse der Studien ist aufgrund methodischer Limitationen jedoch eingeschränkt.⁵

Weitere Unterschiede in der Entwicklung von hochgradig hörbehinderten Säuglingen fanden sich zudem in der Anzahl der Lautäußerungen (Clement et al., 1998; Spencer, 1993), in der Länge der Vokalisationen (Clement et al., 1996) sowie im Lautrepertoire und der Melodiestructur (Clement et al., 1998; Kent, Osberger, Netsell & Hustedde, 1987; Stoel-Gammon & Otomo, 1986; Stoel-Gammon, 1988).

Diese Resultate bestätigen die Annahme, dass auditive Rückkopplung für phonatorisch-artikulatorische Koordination durchaus auch schon im vorsprachlichen Alter von Bedeutung ist.

Die in der Literatur häufig vertretene Ansicht, dass sich eine Hörleistungsstörung erst nach dem 6. Lebensmonat in der Vokalisation bemerkbar macht, lässt vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.1 und 2.2 dargestellten Befunde einige Fragen aufkommen. Es wäre zu prüfen warum nicht bereits Cooing sowie die darauffolgende präkanonische Phase durch auditorische Erfahrungen beeinflusst werden sollten. Denn wie bereits anhand mehrerer Studien belegt werden konnte, haben unterschiedlichste Umgebungsfaktoren schon frühzeitig Einfluss auf die vorsprachliche Entwicklung (DeCasper & Fifer, 1980; Mampe et al., 2009; Prochnow, 2013; Wermke, Pachtner et al., 2013; Wermke et al., 2016). Zudem wurde in verschiedenen longitudinalen Analysen gesunder Säuglinge gezeigt, dass die Erzeugung von sprachähnlichen Tönen bzw. ersten Wörtern nur auf

⁵ In der Studie von Scheiner, Hammerschmidt, Jürgens und Zwirner (2004) ergeben sich deutliche Unterschiede im Untersuchungszeitraum der Vergleichsgruppen, was zu einer Vernachlässigung der altersbedingten Entwicklungseffekte führen kann. Zudem fanden pädaudiologische Befunde sowie das Tragen von Hörhilfen unzureichend Berücksichtigung. Auch in der Studie von Möller und Schönweiler (1999) wurden durch eine hohe Heterogenität des Hör-, Alters- und Versorgungsstatus viele Faktoren unzureichend berücksichtigt.

2 Einfluss des Hörens auf die Sprachentwicklung von Säuglingen im ersten Lebensjahr

Basis einer vorherigen systematischen Melodieentwicklung erfolgen kann. Diese wird durch das stufenweise Erlernen von Weinen, Gurren und vorkanonischem Plappern verwirklicht (Wermke & Mende, 2006, 2011). Die aufeinander aufbauende Entwicklung setzt nicht zuletzt auch eine adäquate auditorische Fähigkeit voraus.

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen zum auditiven System erläutert. Zunächst werden die Anatomie und Funktionsweise des Hörsystems dargestellt. Dies dient nachfolgend dem besseren Verständnis der unterschiedlichen Formen von Schwerhörigkeit sowie der aktuell angewandten Diagnostikmethoden bei Neugeborenen. Diese Informationen besitzen insofern Relevanz, als die Hintergründe der Analyse hierdurch besser verstanden werden können. Zum einen wurden die Probanden großteilig anhand des Ergebnisses des sogenannten Neugeborenen-Hörscreenings ausgewählt und eingeteilt. Zum anderen wurden für die Gruppe der hörbehinderten Probanden nur Säuglinge mit hochgradiger Schallempfindungsschwerhörigkeit beidseits ausgewählt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten (Kapitel 3.2).

3 Grundlagen zum auditiven System

Obwohl ein funktionstüchtiges auditives System einen zentralen Stellenwert im unbehinderten Spracherwerb einnimmt, galt bis ca. 1950 die Prämisse, ein Kind mit Hörstörung erst sehr spät mit Hörhilfe zu versorgen. Hintergrund war die Annahme, das Kind so vor der vermeintlichen Unzulänglichkeit der eigenen Sprachfähigkeit zu bewahren (Ptok, 2004, 2011).

Aufgrund des aktuellen Stands der Forschung und der Fortschritte im medizintechnischen Sektor, insbesondere auch im Bereich der Hörgeräte und Cochlea Implantate, wird diese Ansicht heute nicht mehr geteilt. Vielmehr gilt es eine Hörschädigung möglichst frühzeitig zu erkennen und zu therapieren, um späteren Problemen in Persönlichkeits- und Sprachentwicklung vorzubeugen (Colletti et al., 2005; Connor et al., 2006; Hammes et al., 2002).

Um die verschiedenen Formen der Hörstörung hinreichend zu verstehen und anschließend auf die Verfahren zur Früherkennung besser eingehen zu können, wird an dieser Stelle die Anatomie und Physiologie des auditorischen Systems kurz erläutert.

3.1 Anatomische und physiologische Grundlagen

Das Hörorgan wird funktionell in zwei Abschnitte gegliedert, den peripheren und den zentralen Bereich. Innerhalb des peripheren Hörorgans lassen sich anatomisch nochmals drei Abschnitte unterteilen, die auch physiologisch unterschiedliche Funktionen erfüllen. Es setzt sich von außen nach innen zusammen aus dem **äußeren Ohr** (Auris externa), dem **Mittelohr** (Auris media) und dem **Innenohr** (Auris interna) (Probst, Grevers, Iro & Rosanowski, 2008).

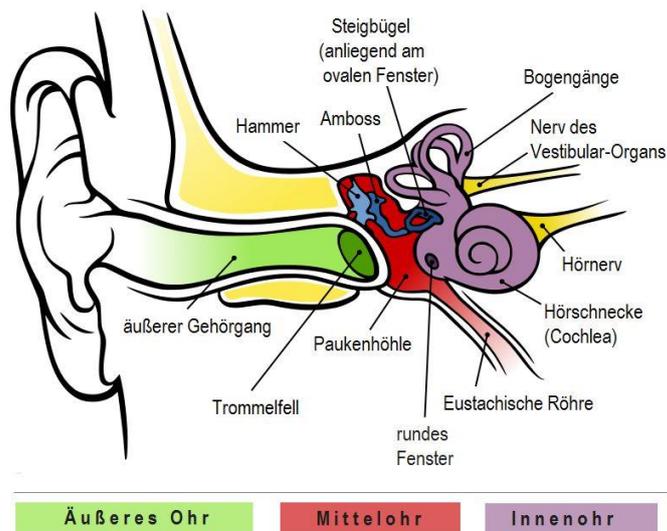


Abbildung 3: Aufbau des Ohrs, Geo-Science-International (2018)⁶

Das **äußere Ohr** umfasst die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang und schließt mit dem Trommelfell ab.

Die Ohrmuschel beinhaltet als formendes Element eine Knorpelplatte und bildet so nach außen einen Schalltrichter. Hierdurch werden die ankommenden Schallwellen gebündelt. Der sich nach innen anschließende S-förmig verlaufende äußere Gehörgang besteht aus einem knorpeligen und einem knöchernen Anteil. Besonders im äußeren, knorpeligen Anteil liegen reichlich Talg- und Zeruminaldrüsen, die insbesondere dem Schutz gegen externe Reize und Austrocknung dienen. Gelangt Wasser in den Gehörgang, kann es durch den Aufquellungsprozess vorübergehend zu einer passageren Schwerhörigkeit kommen (siehe Schallleitungsstörung Kapitel 3.2). Ohrmuschel und Gehörgang dienen vornehmlich der Aufnahme und Weiterleitung der Schallwellen auf das Trommelfell. Das Trommelfell bildet die Grenze zwischen äußerem Gehörgang und der Paukenhöhle und trennt so das äußere Ohr vom Mittelohr ab. Es handelt sich hierbei um eine rundovale Membran, die nach innen trichterförmig zum Nabel (Umbo) eingezogen ist. Durch die ankommenden Schallwellen wird das Trommelfell in Schwingung versetzt, die es auf die Gehörknöchelchen im Mittelohr überträgt (Boenninghaus & Lenarz, 2005; Schünke, Schulte & Schumacher, 2018).

Das **Mittelohr**, das sich zwischen Außen- und Innenohr befindet, besteht aus einem luftgefüllten Raum im Felsenbein, welcher mit einer dünnen Schleimhaut überzogen ist. Es umfasst die Paukenhöhle (Cavitas tympani) mit den Gehörknöchelchen (Ossicula

⁶ Die Lizenz zur Abbildung 3 lautet CC BY-SA 4.0.

auditus) und steht ventral über die Ohrtrumpete (Tuba auditiva, syn.: Eustachische Röhre) mit dem Pharynx in Verbindung (Schünke et al., 2018).

Diese Verbindung zum Rachen bewirkt eine konstante Belüftung des Mittelohrs und schafft so einen Druckausgleich bei Schwankungen des äußeren Luftdrucks. Nach dorsal besteht eine Verbindung zu den Zellen des Mastoids (Cellulae mastoideae), wodurch Keime aus dem Rachenraum bis zum Mastoid vordringen können. Besonders Kinder leiden häufig an Mittelohrentzündungen aufgrund einer relativ kurzen und breitlumigen Tuba auditiva. Auch bei Säuglingen mit Spalten sind Dysfunktionen im Bereich der Tuba auditiva durch die veränderten anatomischen Verhältnisse von wichtiger klinischer Bedeutung. Vielfach ist eine Parazentese erforderlich, um eine resultierende Hörstörung zu beheben und eine regelrechte Sprachentwicklung zu gewährleisten (Götte & Nicolai, 2019). In der Cavitas tympani liegt die Gehörknöchelchenkette bestehend aus Hammer (Malleus), Amboss (Incus) und Steigbügel (Stapedes). Die Gehörknöchelchen übertragen die Schwingung des Trommelfells auf das ovale Fenster (Fenestra vestibuli), der Grenze zum Innenohr. Aufgrund der Schwingung der Membran des ovalen Fensters wird die Perilymphe im Innenohr in Bewegung versetzt. Durch die gelenkige Verbindung zwischen Trommelfell und ovalem Fenster können die Gehörknöchelchen zudem eine Verstärkung des Schallsignals bewirken. Diese Funktion wird durch zwei Muskeln, den M. tensor tympani und den M. stapedius, gewährleistet. Beiden Muskeln kommt eine wichtige regulatorische Aufgabe bei der Schallübertragung zu. Kommt es zu einer Verknöcherung im Bereich der Gehörknöchelchen (Otosklerose) kann dies ebenfalls zu Schallleitungsschwerhörigkeit führen, siehe Kapitel 3.2 (Benninghoff, Drenckhahn & Waschke, 2014; Schünke et al., 2018).

Dem Mittelohr wird somit eine Reihe bedeutender Funktionen zuteil. Neben der Schallleitung (Übertragung der Schallwellen von Luft auf das wässrige Medium Perilymphe), dem Druckausgleich und einer Schutz- und Dämpfungsfunktion, ist die Schalldrucktransformation (Impedanzanpassung) eine maßgebliche Aufgabe. Während der Luftwiderstand gering ist, ist der Widerstand der Perilymphe relativ hoch. So würde ein Großteil der ankommenden Schallwellen ohne Verstärkung (Impedanzwandlung) am ovalen Fenster reflektiert werden. Der Hauptmechanismus hierbei ist das unterschiedliche Größenverhältnis von Trommelfell und ovalem Fenster. Durch den Größenunterschied der beiden Flächen sowie der Hebelwirkung der Gehörknöchelchen findet insgesamt eine 22-fache Verstärkung statt. Kommt es zu einer Störung in der Schalldrucktransformation,

ist ein Hörverlust von circa 20 dB die Folge (Benninghoff et al., 2014; Huppelsberg & Walter, 2013; Probst et al., 2008).

Das **Innenohr** liegt im Felsenbein (Pars petrosa ossis temporalis) und besteht aus einem knöchernen Hohlraumsystem, dem knöchernen Labyrinth (Labyrinthus osseus) mit dem darin befindlichen häutigen Labyrinth (Labyrinthus membranaceus). Es erfüllt zwei verschiedene Funktionen und lässt sich entsprechend in zwei funktionale Abschnitte unterteilen. Es enthält das Hörorgan und das Gleichgewichtsorgan. Das Gleichgewichtsorgan (Vestibularorgan) wird aus dem vestibulären Labyrinth mit drei aufeinander senkrecht stehenden Bogengängen sowie dem Vestibulum mit Sacculus und Utriculus gebildet (Gürkov, 2019; Schünke et al., 2018).

Das Hörorgan besteht aus dem kochleären Labyrinth mit dem darin liegenden häutigen Anteil. Aufgrund des spiralförmigen Verlaufs wird es als Gehörschnecke (Cochlea) bezeichnet. Das knöcherne Labyrinth ist mit Perilymphe gefüllt, welche in ihrer Zusammensetzung der extrazellulären Flüssigkeit sehr nahekommt. Das darin liegende häutige Labyrinth enthält Endolymphe, eine Flüssigkeit, die in ihrer Ionenkonzentration mit dem Zellinneren vergleichbar ist. Der Schneckenkanal weist ca. 2,5-Windungen auf. Im Zentrum befindet sich die knöcherne Schneckenwindung (Modiolus). Unterteilt durch das häutige Labyrinth zeigt diese im Querschnitt drei Kompartimente, die Scala vestibuli, die Scala tympani und die dazwischen liegende Scala media (Ductus cochlearis). Scala vestibuli und Scala tympani sind mit der natriumreichen Perilymphe gefüllt und kommunizieren über die Schneckenwindung (Helicotrema) miteinander. Die Scala vestibuli beginnt am ovalen Fenster, die Scala tympani endet am runden Fenster. Die mit Endolymphe gefüllte Scala media endet an der Spitze blind und ist über die Reißner Membran von der Scala vestibuli, durch die Basilarmembran von der Scala tympani, getrennt. Gebildet wird die Endolymphe in der Stria vascularis, eine Wandschicht der Scala media. Durch Kaliumkanäle und Ionenpumpen wird ein endocochleares Potential von etwa +80 bis 90 mV gegenüber der extrazellulären Flüssigkeit aufrechterhalten, welches physiologisch eine wichtige Bedeutung besitzt. Auf der Basilarmembran befindet sich das eigentliche auditorische Sinnesorgan, das Corti-Organ. Es besteht aus Sinnes- und Stützzellen und wird über den Hörnerv mit dem Hirnstamm verbunden. Die Sinneszellen des Corti-Organ, die für die Schallwahrnehmung verantwortlich sind, werden Haarzellen genannt und sind in Reihen angeordnet. Die Haarzellen besitzen apikal Stereozilien, die über Tip-Links miteinander in Verbindung stehen. Die Zilien der äußeren Haarzellen reichen in die zellfreie, gallertige Tektorialmembran, wohingegen die der inneren Haarzellen frei in

die Endolymphe ragen. Über den Steigbügel werden die Schwingungen des Mittelohrs auf das ovale Fenster übertragen. Die Auslenkung der Membran des ovalen Fensters führt zu einer Volumenverschiebung im flüssigkeitsgefüllten System des Innenohrs. Es wird eine wellenförmige Bewegung der Basilarmembran erzeugt, die sich von der Schneckenbasis in Richtung Schneckenspitze ausbreitet. Die Basilarmembran wird von der Basis zu Spitze kontinuierlich breiter, was eine wichtige Bedeutung für die Frequenzanalyse des Gehörs hat. Die Amplitude der Auslenkung der Basilarmembran wird durch die Schwingungsfrequenz und die Breite der Membran bestimmt. Es gibt für jede Tonfrequenz einen Ort auf der Basilarmembran an dem die maximale Amplitude erzeugt und registriert wird (Tonotopie). Hohe Frequenzen haben ihr Maximum an schmalen, tiefe Frequenzen an breiten Abschnitten entlang der Basilarmembran (Huppelsberg & Walter, 2013; Schünke et al., 2018; Silbernagl & Despopoulos, 2012).

Im Bereich des Maximums der Wanderwelle werden durch die Verschiebung der Tektorialmembran und der Basilarmembran gegeneinander die Zilien der äußeren Haarzellen am stärksten abgelenkt. Durch die Abscherung der Zilien öffnen und schließen sich dehnungsempfindliche Kationenkanäle, wodurch Kalium aus der Endolymphe ein- oder ausströmen kann und so Potentiale in den Haarzellen erzeugt. De- und Hyperpolarisationen führen zu oszillierenden Längenänderungen der Haarzellen, welche die Wanderwelle verstärken. Durch diese cochleäre Verstärkung werden auch die Zilien der inneren Haarzellen abgeschernt und es kommt ebenfalls zu einer Depolarisation. Es entstehen zwischen dem positiv geladenen Endolymphraum (+80 mV) und dem negativen Membranpotential von -70 mV der Haarzellen Differenzen von circa 150 mV. Hierdurch fließen K^+ -Ionen in die Haarzellen und diese werden depolarisiert, es folgt ein Ca^{2+} -Einstrom. Die Rezeptorpotentiale der inneren Haarzellen führen schließlich zu einer Transmitterausschüttung von Glutamat an der basalen Synapse, wodurch Aktionspotentiale an der subsynaptischen Membran erzeugt werden. Diese cochleären Aktionspotentiale werden über Nervenfasern des Nervus cochlearis an das Gehirn weitergeleitet. Hier werden die in Form von elektrischen Impulsen vorliegenden Informationen verarbeitet. Die äußeren Haarzellen erzeugen zusätzliche akustische Energie, die über die Flüssigkeiten des Innenohrs und das Mittelohr in den Gehörgang gelangt. Diese Schallabstrahlung wird als otoakustische Emission bezeichnet und ist messbar, siehe die Ausführung zum Neugeborenen-Hörscreening in Kapitel 3.2 (Huppelsberg & Walter, 2007; Silbernagl & Despopoulos, 2012).

Das Ohr eines jungen Menschen kann Schallwellen in einem Frequenzbereich von 16 bis 20.000 Hertz wahrnehmen. Schallwellen, deren Frequenzen darüber liegen, werden als Ultraschall, darunter liegende Frequenzen als Infraschall bezeichnet. Am empfindlichsten ist das Hörorgan für Frequenzen zwischen 2.000 und 4.000 Hertz. Das Hauptsprachfeld liegt im Frequenzbereich von 250 bis 4.000 Hertz, somit ist dieser Bereich für die menschliche Sprache besonders wichtig (Huppelsberg & Walter, 2013).

3.2 Formen der Schwerhörigkeit und Verfahren der Früherkennung

Schwerhörigkeit stellt mit rund 450 Millionen Betroffenen weltweit die häufigste Sinnesbeeinträchtigung bei Menschen dar (World Health Organization, 2019). Allein in Deutschland geht man von 10 bis 13 Millionen Menschen mit behandlungsbedürftiger Schwerhörigkeit aus. Besonders bei Kindern ist eine möglichst frühzeitige Diagnose und Therapie im Hinblick auf die gesamte Entwicklung von großer Bedeutung. Die Inzidenz einer angeborenen permanenten bilateralen Schwerhörigkeit weist laut Schätzungen des DZH⁷ in Deutschland eine Prävalenz von 1,2 pro 1.000 Neugeborenen auf (Gross, Finch-Krämer & Spormann-Lagodzinski, 2000; Sohn & Jörgenshaus, 2001). Die Häufigkeit der angeborenen, frühkindlich- sensorineuralen hochgradigen Hörminderung oder Taubheit wird gemäß einer Veröffentlichung der WHO von 2009 weltweit mit 0,5 bis 5 von 1.000 Säuglingen angegeben. Insbesondere eine dadurch induzierte verzögerte Entwicklung der Sprache sowie der kognitiven Fähigkeiten kann weitreichende Folgen haben (World Health Organization, 2010).

Anhand verschiedener Kriterien gibt es unterschiedliche Klassifikationsmöglichkeiten zur Einteilung der Hörstörungen. Die WHO definiert nach dem Grad der Schwerhörigkeit vier Stufen, welche durch Tonaudiometrie bestimmt werden (Tabelle 2). Im medizinischen Bereich wird sowohl die Unterteilung nach dem Schweregrad (WHO) als auch die Unterteilung nach der ursächlichen Lokalisation verwendet. Hierbei wird zumeist in Schallleitungsstörung und Schallempfindungsstörung unterteilt. Zum Teil wird auch noch die Schallverarbeitungsstörung differenziert.

⁷ Deutsches Zentralregister für kindliche Hörstörungen.

Schallleitungsschwerhörigkeit

Die Schallleitungsschwerhörigkeit resultiert aus einer behinderten Schallzuleitung zum Innenohr. Hierbei wird die Aufnahme im Bereich des äußeren Ohrs oder die Weiterleitung des Schalls im Mittelohr gehemmt, bzw. blockiert. Die Schallleitungsschwerhörigkeit kann allein keine vollständige Taubheit verursachen, die Hörminderung beträgt je nach Ausprägung und Ursache zwischen 30 und 70 dB. Als Ursache kommt beispielsweise eine Fehlbildung der äußeren Höranlage, eine Verlegung des äußeren Gehörgangs durch Fremdkörper oder Zeruminalpfropf und chronische Entzündungen des Mittelohrs in Frage (Götte & Nicolai, 2019; Gürkov, 2019). Anhand der zeitlichen Komponente lässt sich die Schallleitungsstörung noch weiter in passagere und permanente Schallleitungsstörung unterteilen. Eine passagere Schallleitungsschwerhörigkeit entsteht oftmals bei Neugeborenen in den ersten Wochen nach der Geburt durch die Verlegung des äußeren Gehörgangs mit einem Zeruminalpfropf. Auch eine Belüftungsstörung des Mittelohrs ist bei Säuglingen und Kleinkindern ein häufig beobachtetes Phänomen. Durch die engen anatomischen Verhältnisse besteht eine erhöhte Infektanfälligkeit, Bakterien können leichter aus dem Pharynxbereich in das Mittelohr gelangen. Anhaltende Blockaden der Tuba auditiva können einen mukoserösen Paukenerguss verursachen, der unbehandelt zu Hörminderung führt. Durch Fehlbildungen im Bereich des Gaumens und der Tuba auditiva, wie es beispielsweise bei Kindern mit Trisomie 21 oder Lippen-Kiefer-Gaumenspalten der Fall ist, ist die Inzidenz deutlich erhöht (Götte & Nicolai, 2019; Seifert et al., 2005). Eine permanente Schallleitungsschwerhörigkeit entsteht beispielsweise durch chronische Entzündungen des Mittelohrs (Otitis media). Sowohl chronische Knocheneiterung (Cholesteatom) als auch chronische Schleimhauteiterung können zu einem enzymatischen Abbau oder einer Fixation des Trommelfells führen. Weiterhin kann es zu einer Versteifung der Gehörknöchelchenkette (Otosklerose) kommen (Hüttenbrink, 1994; Zahnert, 2011). Im Säuglingsalter und der frühen Kindheit tritt vorwiegend die passagere Schallleitungsschwerhörigkeit als Folge eines Paukenergusses auf (Fiellau-Nikolajsen, 1983; Zahnert, 2011).

Schallempfindungs- und Schallverarbeitungsschwerhörigkeit

Bei der Schallempfindungsschwerhörigkeit handelt es sich um eine Funktionsstörung im Bereich des Innenohrs, die mit einem Hörverlust einhergeht. Es kommen sowohl cochleäre Störungen wie beispielsweise Läsionen im Bereich der Haarzellen oder der Basilarmembran, als auch, im Falle einer Schallverarbeitungsstörung, retrocochleäre

Störungen im Bereich der Axone oder zentraler Strukturen in Betracht (neurale bzw. zentrale Schwerhörigkeit). Liegt sowohl eine Störung im Bereich der Cochlea als auch im Bereich des Hörnervs vor, wird häufig der Begriff der sensorineuralen Schwerhörigkeit verwendet (Zahnert, 2011). Mögliche Ursachen sind prä-, peri- und postnatale Infektionen (Röteln, Meningitis, Masern etc.) sowie ototoxische Medikamente während der Schwangerschaft. Ferner können genetische Gründe, Verletzungen, Neoplasien und eine Reihe weiterer Faktoren eine Rolle spielen. Auch die durch Lärm verursachte Schwerhörigkeit sowie das altersbedingte Auftreten von Schwerhörigkeit (Presbyakusis) sind häufige Gründe für eine Hörminderung (Götte & Nicolai, 2019; Gürkov, 2019). Je nach Quelle sind zwischen 20 und 50 Prozent der Schallempfindungsstörungen im frühen Kindesalter genetisch bedingt (Brosch & Delb, 2013).

Als Referenzwerte für den Grad der Hörminderung dienen dieser Arbeit die Angaben der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, 1991)⁸. Demnach liegt bei einer Hörschwelle von ≤ 25 dB keine Schwerhörigkeit vor, bei 26-40 dB eine geringgradige Hörminderung, bei 41-60 dB eine mittelgradige Hörminderung und bei einer Hörschwelle von 61-80 dB eine hochgradige Hörminderung vor. Als Ertaubung bezeichnet man eine Hörschwelle ≥ 81 dB. Die Angaben in Dezibel entsprechen hierbei dem mittleren Hörverlust im Tonaudiogramm. Dazu wird der Mittelwert des Hörverlusts bei 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz und 4.000 Hz als Reintonmittelwert (Pure Tone Average, PTA) im Tonaudiogramm berechnet.

Tabelle 2: Graduierung der Schwerhörigkeit (World Health Organization, 1991), Einteilung nach Tonaudiogramm

WHO Grad	Grad der Schwerhörigkeit	Mittlerer Hörverlust im Tonaudiogramm
0	keine Schwerhörigkeit	≤ 25 dB
1	leichte/geringgradige Schwerhörigkeit	26-40 dB
2	mittelgradige Schwerhörigkeit	41-60 dB
3	hochgradige Schwerhörigkeit	61-80 dB
4	an Taubheit grenzende Schwerhörigkeit/ Ertaubung	≥ 81 dB

⁸ Siehe hierzu auch aktuelle Homepage der WHO von 2019 (https://www.who.int/pbd/deafness/hearing_impairment_grades/en/).

Je nach Geburtsland und Geburtsklinik in dem ein Säugling heute zur Welt gebracht wird, unterscheiden sich die Diagnostikverfahren zur Früherkennung von Hörstörungen. In Deutschland sieht der Beschluss des Bundesausschusses der Kinderrichtlinien vom 19. Juni 2008 ein Neugeborenen-Hörscreening für alle Säuglinge vor. Zudem ist eine Früherkennungsuntersuchung für Hörstörungen bei Neugeborenen im Rahmen der allgemeinen Früherkennungsmaßnahmen in den ersten 6 Lebensjahren angedacht. Die Richtlinien sind seit dem 1. Januar 2009 in Kraft getreten (Bundesministerium für Gesundheit, 2008). Üblicherweise findet in den ersten drei Lebenstagen nach der Geburt das Neugeborenen-Hörscreening (NHS-1) statt, dem bei Auffälligkeiten das NHS-2 im Alter von 2,5-3 Monaten angeschlossen wird (Bundesministerium für Gesundheit, 2019; Schönweiler & Schmidt, 2009).

Um Kinder mit einer Hörstörung bzw. potenziell gefährdete Säuglinge möglichst frühzeitig zu erkennen, gibt es unterschiedliche Diagnostikverfahren. Man unterscheidet subjektive (psychoakustische) und objektive (physiologische) Hörprüfungen. Besonders den objektiven Verfahren kommt in der Diagnostik von Säuglingen eine hohe Relevanz zu, da hier keine aktive Mitarbeit des Patienten benötigt wird. Zu den zwei international anerkannten objektiven Testverfahren für das Screening gehören die **Otoakustischen Emissionen (OAE)** und die **frühen akustisch evozierten Potenziale (FAEP)**. Die Messung der FAEP wird als Hirnstammaudiometrie, **BERA** (brainstem evoked response audiometry) bzw. **ABR** (auditory brainstem response) bezeichnet. Zusätzlich kann in Fragebögen Information über die Reaktionen von Säuglingen auf akustische Ereignisse bei den Betreuungspersonen erfragt oder das Verhalten der Babys auf Geräuschexposition geprüft werden (Götte & Nicolai, 2019; World Health Organization, 2010). Im Folgenden wird die Hirnstammaudiometrie als eines der beiden genannten Testverfahren kurz vorgestellt, für weitere Messmethoden wird auf die Literatur zur audiologischen Diagnostik verwiesen.

Hierfür wird zunächst das der Hirnstammaudiometrie zugrunde liegende Verfahren der elektrischen Reaktionsaudiometrie (ERA) kurz erläutert. Bei der elektrischen Reaktionsaudiometrie wird die Hörfähigkeit anhand von akustisch evozierten Potentialen (AEP) überprüft. Hierbei werden durch einen akustischen Reiz ausgelöste bioelektrische Signale, die entlang der Hörbahn entstehen, mittels Elektroden abgeleitet. Diese Potentialänderungen werden im Elektroenzephalogramm (EEG) gemessen und als Wellen aufgezeichnet. Man unterscheidet anhand der Latenzzeit nach dem Stimulus in frühe, mittlere und späte evozierte Potentiale. Für die Messung kommen unterschiedliche

Verfahren zum Einsatz. In der Pädaudiologie ist insbesondere die nicht invasive Messung der frühen Hirnstammpotentiale von Bedeutung (Wendler et al., 2015).

Die Hirnstammaudiometrie wird als BERA (brainstem evoked response audiometry) bezeichnet. In einem Intervall von circa 30 ms werden mittels „Klick“-Stimulation hierbei Potentiale erzeugt und abgeleitet. Diese frühen akustisch evozierten Potentiale treten zwischen 1 und 8 ms nach dem akustischen Stimulus auf. Eine Messung erfordert bis zu 2.000 Messdurchgänge. Begonnen wird die Messung mit höheren Schallpegeln, welche zunehmend herabgesetzt werden. Die Hirnstammpotentialkurve besteht aus mehreren Wellen, von welchen insbesondere die Welle V als wichtiger Diagnostikmarker gilt. Diese ist in der Regel bei Stimuli knapp über der Hörschwelle erkennbar. Sobald diese Welle ausgelöst wird, gilt der auslösende Schallpegel als Richtwert für die Hörschwelle (+/- 20 dB) in diesem Frequenzbereich. Zudem ist die Zeit zwischen den Wellen von Bedeutung, da sie Auskunft über den Reifungszustand der Hörbahn gibt. Zur Messung sollte der Säugling ruhig liegen oder schlafen, da die Messtechnik sehr sensitiv ist. BERA ist vor allem zur Diagnostik von Schwerhörigkeit im mittleren Frequenzbereich geeignet (1-4 kHz). Zur Bestimmung einer Schallleitungsschwerhörigkeit sowie einer eventuell vorhandenen tieffrequenten Resthörigkeit eignet sich diese Methode weniger (Götte & Nicolai, 2019). Für das Hörscreening wird in der Regel das AABR (Automated Auditory Brainstem Response) als Ergänzung zum OAE angewandt. Während bei der OAE audiotische Neuropathien aufgrund einer normalen Haarzellfunktion zumeist unentdeckt bleiben, können diese durch die Ableitung früher AEP erfasst werden (Shehata-Dieler et al., 2000).

In der Universitätsklinik Würzburg findet seit 1997 ein spezifisches Hörscreening bei Neugeborenen statt. Für das Neugeborenen-Hörscreening hat sich hier insbesondere die Messung mit dem BERAPHON®, einem speziellen Kopfhörer zur Ableitung von frühen AEP sowie einem zweistufigen Screening-Modell bewährt. Die Effektivität des Programms konnte anhand von zwei Studien belegt werden (Cebulla & Shehata-Dieler, 2012; Shehata-Dieler et al., 2002).

4 Material und Methoden

4.1 Studiendesign des übergeordneten Gesamtprojekts und Einordnung der Arbeit

Ein Großteil des der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Lautmaterials stammt aus der aktuellen Kohortenstudie zur Analyse von Komfortlauten bei Säuglingen zum Zeitpunkt des Neugeborenen-Hörscreenings-2. Die Datenerhebung für diese Studie begann 2018 nach Prüfung der Vorgehensweise durch die Ethikkommission der Universität Würzburg. Das Projekt mit dem Ethikvotum 308/17me wird unter Einhaltung der Kriterien der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Zusätzlich gingen in die vorliegende Arbeit, wie weiter unten begründet, anonymisierte Daten aus dem Archiv des Zentrums für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES) der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg in die Analyse ein.

Das Gesamtprojekt wurde als Kohortenstudie mit einmaligem Untersuchungstermin konzipiert. Ziel der Kohortenstudie ist es zu untersuchen, ob eine hochgradig sensorineurale Hörstörung bereits in der frühen Phase der vorsprachlichen Entwicklung Auswirkung auf die Lautproduktion von Säuglingen zeigt. Durch den interdisziplinären Ansatz und die Zusammenarbeit von zwei Abteilungen des Universitätsklinikums Würzburg wird erstmals nicht nur die Hörleistung im Alter von 2 bis 6 Monaten erfasst, sondern werden parallel dazu auch Lautaufnahmen erstellt. Damit ist es möglich, das audio-vokale System gesamtheitlich zu betrachten.

Als Probanden für die Kohorte wurden alle Säuglinge gewählt, die im Rahmen der U1 nach der Geburt beim Neugeborenen-Hörtest (NHS-Stufe 1) auffällig waren. Aufgenommen wurden sie bei der Nachuntersuchung (NHS-Stufe 2), zu dem die Patienten routinemäßig nochmals in die Klinik kommen (siehe Kapitel 3.2). Der Kontrolltermin findet in der Regel im Alter zwischen 10 und 12 Wochen statt. Im Verlauf des ersten Projektjahres konnten 101 Probanden rekrutiert, die Aufnahmen vorverarbeitet und ins Datensystem eingespeist werden. Davon wurden 44 Probanden als auffällig und 57 Probanden als unauffällig in der Kontrolluntersuchung des NHS-2 klassifiziert. Aufgrund unterschiedlicher Ausprägung der Hörleistungsstörung sowie weiteren Erkrankungen der Probanden ist der Datensatz heterogen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren sollte der Datensatz für eine differenzierte Betrachtung zunächst weiter selektiert werden.

Für das Projekt wurden ausschließlich Komfortlaute (non-cry vocalizations) analysiert, die im Rahmen des Kontrolltermins (NHS-2) durch ein Team von mehreren Doktoranden

am CHC/ZVES aufgenommen wurden. Die Tonaufnahmen erfolgten mit einem digitalen Aufnahmegerät der Firma Tascam, Modell DR-100, mit einem externen Earthwork Mikrophon TCD 20. Durch engen Kontakt zum CHC wurden die Doktoranden informiert, sobald Kontrolltermine von im NHS-1 auffälligen Säuglingen geplant waren. Bereits während der Wartezeit auf die Kontrollmessung des NHS-Stufe 2 klärte man die Eltern über das Projekt und die Vorgehensweise zur Erfassung der Lautproduktion ihrer Kinder auf. Bei Einwilligung zur Projektteilnahme erhielten sie spezifische Informations- und Fragebögen (Hörfragebogen Little Ears, SLI-Fragebogen). Die projektspezifische Aufzeichnung von Komfortlauten (Babbellauten) fand vornehmlich in der Schallkabine statt, nachdem die Eltern der Säuglinge die Einwilligungserklärung unterschrieben hatten. Zur Aufnahme befand sich der Säugling zumeist in Rückenlage oder auf dem Arm eines Elternteils und es wurde versucht, ihn durch Augenkontakt oder durch den Einsatz einer Attrappe (Kuscheltier mit deutlichen Gesichtszügen), zum Lautieren zu animieren. Nach einem Zeitfenster von 10 bis maximal 15 Minuten wurde die Aufnahme beendet sofern sie nicht vorher durch den Säugling „abgebrochen“ wurde. Als Abbruchsignale von Seiten des Säuglings wurden beispielsweise deutliche Blickkontaktvermeidung zum Untersucher und/oder Weinen gewertet.

Im Anschluss wurden die Tonaufnahmen nach dem im ZVES üblichen Routineverfahren durch die Autorin und weitere Doktoranden ausgelesen, pseudonymisiert, archiviert und mit Hilfe der open source Software PRAAT vorverarbeitet (Kapitel 4.4). Anschließend wurden die Signale nach sorgfältiger Selektion und Klassifikation durch ein Analyseteam quantitativ ausgewertet. Dabei konnten insbesondere melodische (prosodische) Eigenschaften, wie Lautlänge und Grundfrequenzeigenschaften, sowie weitere Merkmale (Resonanzeigenschaften) und das Vorkommen bestimmter artikulatorischer Elemente untersucht werden.

Das Analyseteam bestand zunächst aus einer dreiköpfigen Untersucherguppe, die sich aus der Autorin der Arbeit und zwei weiteren Doktoranden des CHC/ZVES des Universitätsklinikums Würzburg zusammensetzte. Das Team wurde vorher in einer Vorbereitungsphase im ZVES auf die Kategorisierung von Lauten, insbesondere Komfortvokalisation, geschult. In der Trainingsphase von 6 Wochen konnte sowohl anhand von beispielhaften Audiofiles als auch durch Kategorisierung von Übungsdateien die auditive Wahrnehmung trainiert und weiter ausgebildet werden, sodass eine hohe Übereinstimmung sowie Reproduzierbarkeit bei der Lautkategorisierung sichergestellt wurden. Auch andere Studien bestätigen eine gute Reproduktionsleistung vergleichbarer

Kategorisierung vorsprachlicher Laute durch ein geschultes Analyseteam (Nathani et al., 2006; Rvachew, Creighton, Feldman & Sauve, 2002). Sofern bei fraglichen Einzelfällen keine Einigung innerhalb des Teams zustande kam wurde der jeweilige Laut aus der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen. Der genaue Ablauf der einzelnen Schritte ist im Kapitel 4.4 Datenanalyse beschrieben. Die genannten Bearbeitungsschritte waren als Vorarbeit notwendig, um aus den ersten Projektaufnahmen ein geeignetes Datensample für die vorliegende quantitative Analyse selektieren zu können.

Die Datenstichprobe für diese Arbeit basiert auf den Lautaufnahmen der ersten konsekutiv rekrutierten Probanden der Kohortenstudie, die die Auswahlkriterien für die vorliegende Arbeit erfüllten.

1. **NH-Gruppe:** Ausgewählt wurden für diese „normalhörende“ Gruppe alle Säuglinge der Studie, die anhand der vorliegenden klinischen Daten, insbesondere im NHS-2, als unauffällig klassifiziert wurden.
2. **Hörgeschädigte Gruppe (HI):** Als hörgeschädigte Vergleichsgruppe wurden für diese Arbeit nur Säuglinge mit einer hochgradigen sensorineuralen Hörminderung beidseits gewählt.

Die Auswahl und die Zusammensetzung der Probandengruppen ist im Abschnitt 4.2 genauer erläutert. Zudem wurde der Datensatz durch anonymisiert vorliegende Aufnahmen eines Vorläuferprojekts zur Kohortenstudie ergänzt. Diese Aufnahmen stammen von Probanden der gleichen Altersstufen unter vergleichbaren Konditionen und umfassen sowohl sensorineural hochgradig hörgeschädigte (HI) als auch unauffällige Säuglinge (KG). Das Vorgehen wird in Kapitel 4.2 detailliert beschrieben.

Im Rahmen der Studie wurden auch einzelne Säuglinge mit orofazialen Spaltbildungen im NHS-1 auffällig. Bei dieser angeborenen Fehlbildung kommt es aufgrund der veränderten anatomischen Verhältnisse vermehrt zu auditorischen Defiziten (siehe Schallleitungsstörung Kapitel 3.1). Da die Früherkennung dieser Patientengruppe insbesondere auch im Bereich der Kieferorthopädie von Relevanz ist und die Autorin vorliegender Arbeit aus dem zahnmedizinischen Bereich stammt, wurden die ersten erfassten Probanden ebenfalls analysiert und kategorisiert (n = 6). Obwohl bereits bei dieser geringen Anzahl an Lauten Besonderheiten auffielen, war eine weitergehende deskriptive Analyse aufgrund der zu geringen Stichprobengröße jedoch nicht möglich. Um potenzielle Zusammenhänge quantitativ nachweisen zu können, ist eine erneute Untersuchung anhand einer größeren Stichprobe der Kohortenstudie notwendig.

4.2 Probandenkollektiv

Insgesamt wurden die Probanden für die vorliegende Arbeit in drei Gruppen unterteilt, die im Folgenden differenziert beschrieben werden. Das Datenmaterial besteht aus den pseudonymisierten, ersten Aufnahmen der Kohortenstudie sowie anonymisiert vorliegenden Aufnahmen des ZVES Archivs (vgl. Kapitel 4.1).

Die Säuglinge, die aus dem ersten Datensatz der Kohortenstudie stammen, waren alle im Hörtest (NHS-1) auffällig. Auf den Hörtest wird in Kapitel 3.2 Formen der Schwerhörigkeit und Verfahren der Früherkennung genauer eingegangen. Nach weiteren Testergebnissen und Diagnosen (NHS-2) wurden die Säuglinge nachfolgend verschiedenen Probandengruppen zugeordnet.

Der Ablauf der Kohortenstudie (grau unterlegt) sowie die Einordnung der hier untersuchten Probandengruppen (gelb) wird in Abbildung 4 zur Übersicht schematisch dargestellt und anschließend nochmals im Detail beschrieben.

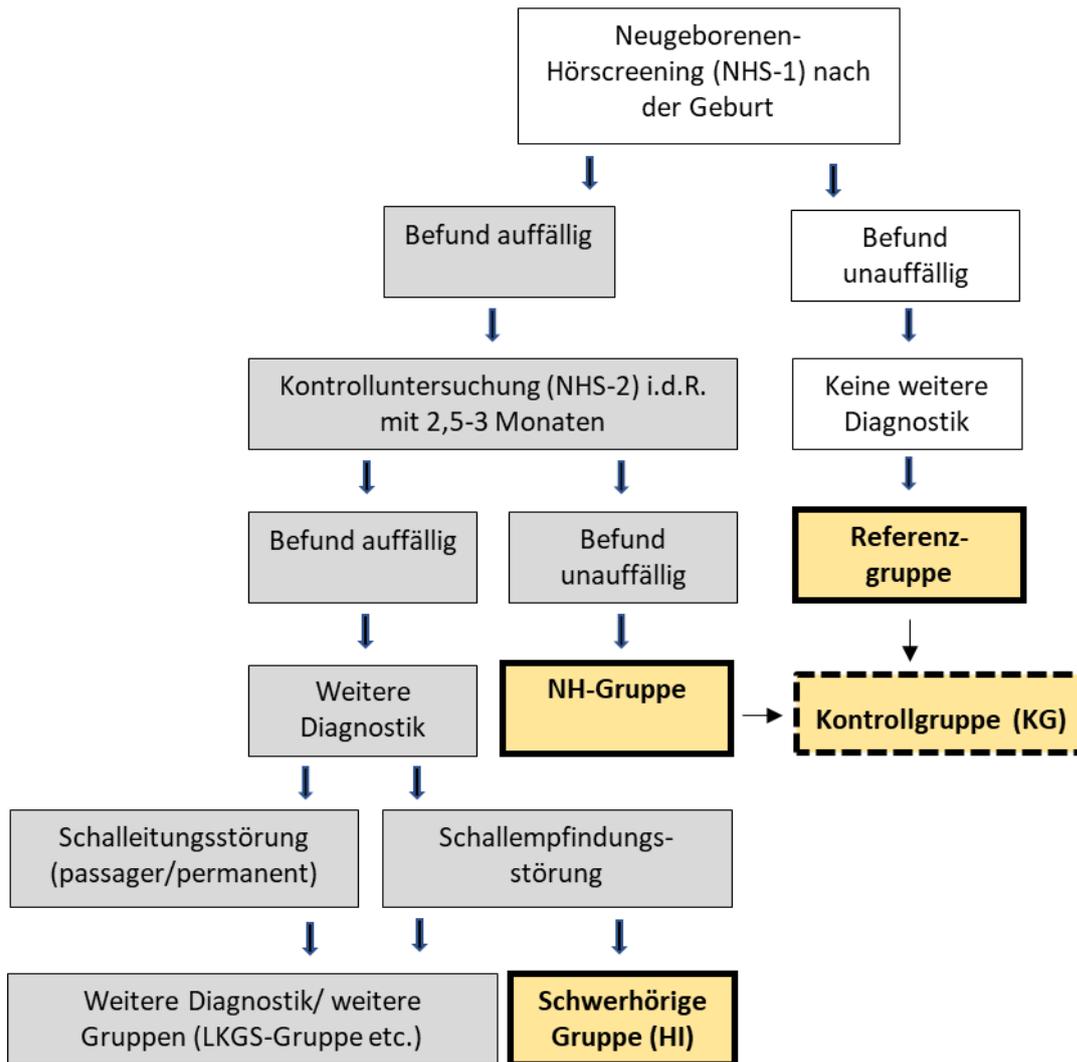


Abbildung 4: Studiendesign und Probandengruppen vorliegender Arbeit

NH-Gruppe

Die Gruppe der normalhörenden Säuglinge (NH-Gruppe) wurde aus den ersten 20 rekrutierten Probanden der Kohortenstudie gebildet. Von diesen mussten jedoch vier aufgrund der zu geringen Zahl an aufgezeichneten Lauten als Dropout gewertet werden. Des Weiteren fiel ein Proband durch die Lautdaten in der finalen Analyse auf, welche sich hinsichtlich der Grundfrequenzhöhe deutlich von den anderen unterschieden. Bei diesem konnte schließlich der klinischen Akte eine symptomatische neonatale Hypoglykämie entnommen werden, weshalb dieser Proband nachträglich ebenfalls aus der quantitativen Analyse ausgeschlossen wurde. In der Literatur werden bei hyperglykämischen Neugeborenen erhöhte Grundfrequenzwerte beschrieben (Koivisto, Wasz-Höckert, Michelsson & Sirvio, 1974). Die restlichen Säuglinge waren alle im ersten

Hörscreening nach der Geburt (NHS-1) auffällig, zeigten aber in der Nachsorgeuntersuchung keine Hörauffälligkeit und waren auch ansonsten unauffällig.

Referenzgruppe

Im Studiendesign der Kohortenstudie war nur eine einmalige Aufzeichnung der spontanen Komfortlautproduktion eines Säuglings vorgesehen. In der Fachliteratur wird zudem über keine vergleichbare Untersuchung berichtet. Aufgrund fehlender Referenzwerte für eine ungestörte vorsprachliche Entwicklung wurden die Längsschnittdaten unauffälliger Säuglinge für eine Referenzgruppe einbezogen. Diese Referenzgruppe bestand aus anonymisiert vorliegenden Längsschnittaufnahmen von drei gesunden Probanden eines Vorläuferprojekts des ZVES/CHC. Die Aufnahmen wurden durch eine Doktorandin am ZVES erhoben (Frank, Dissertation in Vorbereitung). Ausgewählt wurden aus Frank's Kollektiv drei Säuglinge, die im Untersuchungszeitraum der vorliegenden Arbeit, zwischen 60 und 180 Tagen, eine zeitlich dichte Aufnahmefrequenz und relativ große Lautanzahl aufwiesen.⁹ Durch die Aufnahme im Längsschnitt umfassen sie die vorsprachliche Entwicklung des gesamten Untersuchungszeitraums und konnten hier als Vergleichsmodell herangezogen werden.

Die Aufnahmen der NH-Gruppe und der Referenzgruppe wurden nach eingehender Prüfung der Vergleichbarkeit für einen Teil der späteren statistischen Analyse zu einer Gruppe zusammengefasst (vgl. Kapitel 4.6). Diese Gruppe erhielt die Bezeichnung **Kontrollgruppe (KG)**.

HI Gruppe

Für die Gruppe der hörgeschädigten Säuglinge wurden ausschließlich Probanden mit einer hochgradigen Schwerhörigkeit beidseits gewählt. In der Kohortenstudie gab es zum Zeitpunkt der Anfertigung der vorliegenden Arbeit fünf Probanden, die das Einschlusskriterium erfüllten. Bei zwei dieser Säuglinge wurde eine Ohrfehlbildung diagnostiziert. Ein Säugling mit Ohrfehlbildung wies zudem eine kardiovaskuläre Erkrankung sowie eine Erkrankung des ZNS auf. Alle anderen Probanden wiesen keine weiteren klinischen Auffälligkeiten auf. Um die Gruppe zu vergrößern wurden zusätzlich Aufnahmen von vier Säuglingen aus dem Archiv des ZVES aus dem genannten Vorläuferprojekt (vgl. 4.1) ausgewertet. Diese wurden in einer früheren Längsschnittanalyse aufgenommen, wodurch pro Proband eine vergleichsweise große Lautanzahl vorhanden war. Sofern im Zeitraum der Aufnahmeanfertigung bereits eine Versorgung durch eine Hörhilfe

⁹ Die Zustimmung für die Verwendung der Daten wurde eingeholt.

4 Material und Methoden

stattgefunden hatte, wurde dies, soweit möglich, in der späteren statistischen Analyse berücksichtigt. Tabelle 3 zeigt die Art und den Zeitpunkt der Versorgung sowie die Ergebnisse der Hörschwellenmessung aller Probanden der finalen HI-Gruppe.

Tabelle 3: Klinische Daten zu Hörleistung und Versorgung der HI-Probanden

Proband	Aufnahmedatum (Alter in Tagen)	Diagnose	Verlauf Versorgung mit Hörhilfen	Hörschwellenmessung (ABR, ASSR; FF)
H1 (m)	72,128	hochgradige SES bds.	HA fitting: (216) CI- Implantation: (431)	ABR: >100dB (NR) R/L (128) ASSR: >100dB (NR) R/L (128) FF (unaided): 90-100dB (164)
H2 (w)	88	hochgradige SES bds.	HA fitting: (207)	ABR: >100 (NR) R/L (88) FF (unaided): 100dB (164) ASSR: 500Hz-90dB R/L, >500Hz- 100dB R/L (165)
H3 (m)	111	hochgradige SES bds.	HA fitting: (146)	ABR: 100dB? R/L (141) ASSR: Kind aufgewacht keine Mes- sung erfolgt (141) FF (unaided): 95-100dB (141)
H4 (m)	79	hochgradige SES bds.	HA fitting: k.A.	FF (unaided): 500Hz-55dB, >1000Hz 65dB (79), 500-4000Hz- NR (136) ABR: 100dB R/L (138) ASSR: 500Hz-95dB R/L; >500Hz- 100dB R/L (138)
H5 (m)	108	hochgradige SES bds.	HA fitting: (133)	ABR: 70dB R/ 100dB L (68), 80- 90dB R/ NR L (108) ASSR: 500Hz-4000Hz- 95/100dB R/L (108), FF (unaided): 85-100 dB (185)
H6 (m)	100, 103, 117, 156, 160, 169	hochgradige SES bds.	HA fitting: (50) CI-Implantation: L (170), R (183)	FF (unaided): 500Hz-NR, >1000Hz- 100dB (101); ABR: NR R/L (138, 170) ASSR: 500Hz-80 R/L (170)
H7 (m)	85, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 98, 100, 102, 109, 112, 120, 14, 139, 156, 171, 173, 181	hochgradige SES bds.	HA fitting: (150) CI-Implantation: (229)	ABR: NR R, 100dB L (69) ASSR: 500Hz-95dB R/L; >1000Hz- 95dB/ NR (156) FF (unaided): 100dB (181)
H8 (w)	79, 99, 127, 141, 156, 171	hochgradige SES bds.	HA fitting: (125) CI-Implantation: (304)	ABR: NR R/L (89) ASSR: 500Hz- >80dB R/L, 1000Hz- >90dB R/L (127) FF (unaided): NR (156)
H9 (w)	79, 99, 127, 141, 156, 171	hochgradige SES bds.	HA fitting: (125) CI-Implantation: (304)	ABR: NR R/L (89) ASSR: 500 Hz- NR R/L, >1000Hz- NR R/L (127) FF (unaided): NR (156)

Legende: (m) männlich; (w) weiblich; (SES) Schallempfindungsstörung; (R) rechts; (L) links; (HA) hearing aid; (CI) Cochlea-Implantation; (ABR) auditory brainstem response [dB]; (ASSR) Auditory steady-state responses; (FF) Freifeldaudiometrie; (NR) No Reaction/ keine Antwort; **die Zahl in Klammern gibt das Alter des Probanden in Tagen an**

In Tabelle 4 sind die Perinataldaten der untersuchten Probanden berichtet. Diese Probandencharakteristika wurden in vorliegender Arbeit nicht statistisch ausgewertet, aber zur Vollständigkeit der Stichprobenbeschreibung aufgeführt.

Tabelle 4: Perinataldaten der Probanden

Gruppe	Proband	Geschlecht	Geburtsgewicht	Geburtslänge	SSW
HI	H1	m	3.100	48	40
	H2	w	3.960	51	41+3
	H3	m	4.455	56	39+4
	H4	m	3.810	50	41+2
	H5	m	4.060	52	39+2
	H6	m	3.420	53	40
	H7	m	3.630	53	37+3
	H8	w	2.315	46	34+5
	H9	w	2.310	47	34+5
NH	N1	w	3.120	51	41
	N2	w	3.680	54	k.A.
	N3	w	3.470	51	39+2
	N4	m	k.A.	k.A.	k.A.
	N5	w	3.195	50	39+5
	N6	m	4.180	53	38+5
	N7	m	3.140	51	41+0
	N8	m	3.910	51	38+6
	N9	m	4.050	51	40+3
	N10	w	3.420	51	38+3
	N11	m	2.800	50	37+5
	N12	m	4.610	54	40+0
	N13	w	2.850	50	37+1
	N14	m	3.645	53	39+6
	N15	m	3.090	50	40+4
Referenz	R1	w	3.180	49	38+3
	R2	w	3.075	49	39
	R3	m	2.790	46	38

Zeichenerklärung: SSW = Schwangerschaftswoche, m = männlich, w = weiblich, k.A. = keine Angaben

4.3 Datenbasis

Die Zusammensetzung der Probandengruppen wurde bereits ausführlich im Kapitel 4.2 erläutert. Tabelle 5 liefert einen Überblick über das aufbereitete Datenmaterial sowie das Alter der Säuglinge zum Aufnahmezeitpunkt. Es wurden von der Autorin im Rahmen der vorliegenden Arbeit insgesamt circa 20.000 Einzellaute ausgewertet, nach Vorselektion

lagen noch circa 6.500 Einzellaute zur Kategorisierung bereit. Von diesen wurden für die finale deskriptive Analyse nur die Vokanten (1.238 Laute) ausgewählt.

In die Vorverarbeitungsschritte wurden alle Laute, die nicht durch schlechte Aufnahmequalität, Störgeräusche, Rauschen oder eindeutige, andauernde Weisperioden auffielen, in den Aufarbeitungs- und Klassifikationsprozess miteinbezogen. Das Datensample wurde nachfolgend reduziert. In Kapitel 4.5.3 ist die Selektion und Charakterisierung der final ausgewählten Vokalisationstypen begründet. Für die genaue Betrachtung und Vermessung wurde später spezifisch die Vokalisationsart der „Vokanten“ (V) herausgearbeitet. Nur diese Vokalisationsart wurde anschließend auch quantitativ analysiert, weshalb die Anzahl der „V“ in Tabelle 5 bereits gesondert vermerkt wurde.

Tabelle 5: Lautanzahl der Probanden (Gesamtzahl und Vokantenzahl)

Gruppe	Proband	Anzahl Aufnahme- termine	Laute Gesamt	Vokanten
KG	N1	1	38	20
	N2	1	23	4
	N3	1	11	3
	N4	1	19	2
	N5	1	49	10
	N6	1	89	40
	N7	1	110	16
	N8	1	10	1
	N9	1	45	6
	N10	1	14	4
	N11	1	61	11
	N12	1	68	14
	N13	1	70	18
	N14	1	20	2
	N15	1	21	7
	R1	16	1.068	191
	R2	16	1.111	161
	R3	10	1.098	144
		∑ KG	57	3.925
HI	H1	2	120	23
	H2	1	33	32
	H3	1	139	39
	H4	1	167	116
	H5	1	48	1
	H6	6	361	41
	H7	21	537	108
	H8	6	670	159
	H9	6	466	65
		∑ HI	45	2.541
Gesamtsumme		102	6.466	1.238

Zur besseren Vergleichbarkeit des vorliegenden Lautmaterials innerhalb der NH- und Referenzgruppe sowie der Gruppe der hörgeschädigten Säuglinge (HI), wurden Tabellen zur Übersicht der Altersverteilung angefertigt (Tabelle 6 und Tabelle 7).

Tabelle 6: Altersverteilung des Datenmaterials innerhalb der finalen Kontrollgruppe

Die Kontrollgruppe setzt sich aus vormals zwei Probandengruppen zusammen (NH und Referenzgruppe). Die Zahlen stehen für das Alter in Tagen (d) zum Aufnahmezeitpunkt des jeweiligen Probanden.

Gruppe		Proband	Alter in Wochen																
			≤10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Kontrollgruppe	NH-Gruppe	N1							109										
		N2	63																
		N3								113									
		N4							107										
		N5								113									
		N6									125								
		N7							106										
		N8	60																
		N9										131							
		N10			82														
		N11													149				
		N12	65																
		N13											134						
		N14									120								
		N15						99											
Kontrollgruppe	Referenzgruppe	R1	65			87		104			120		134 139	141 142 146	148	154 155	162 163	171	180
		R2			80		94		105		121			142 143	149 150	154 156 157 159	161 164 167	173	
		R3			82		96		105			126		145	148	154 159	167		179

Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, setzt sich die HI-Gruppe sowohl aus Aufnahmematerial von Säuglingen mit Hörgeräten als auch ohne Versorgung, bzw. ohne aktivierte Hörgeräte, zusammen. Die Aufnahmen ohne Hörgeräteversorgung wurden durch Klammersetzung entsprechend gekennzeichnet.

Um eine möglichst differenzierte Betrachtung vorzunehmen wurde für die statistische Auswertung eine Unterteilung des Datenmaterials in zwei Altersbereiche vorgenommen (vor und ab der 23. Woche). Die Wahl des Kriteriums wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Tabelle 7: Altersverteilung des Datenmaterials der HI-Gruppe unter Berücksichtigung der Versorgung mit Hörhilfe

Die Zahlen geben das Alter in Tagen (d) an. Ist das Alter in Klammern angegeben, bedeutet dies hierbei unversorgt (ohne HH), ohne Klammern versorgt (mit HH). Unterstrichene Zahlen geben Aufnahmezeitpunkte an, bei denen sowohl Aufnahmen mit, als auch ohne Versorgung vorliegen.

Gruppe	Proband	Alter in Wochen																		
		≤10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
HI	H1	(72)					(128)													
	H2				(88)															
	H3	(111)																		
	H4			(79)																
	H5	(108)																		
	H6						100 (103)		(117)						156 160		169			
	H7			(85) (87) (88) <u>(89)</u> 90	91 (93) 94 (95)	98 100 102	109	112	120 124		139			156		171 173	181			
	H8			(79)			(99)				(127)		(141)	<u>(156)</u>		171				
	H9			(79)			(99)				(127)		(141)	<u>(156)</u>		171				

Das Abgrenzungskriterium der 23. Lebenswoche wurde gewählt, da erst ab der 23. Woche von einzelnen Probanden Lautaufnahmen mit Versorgung vorlagen. Lautaufnahmen mit Hörgeräteversorgung waren nur von einem Probanden über den gesamten Aufnahmezeitraum verfügbar (Proband H7). Um eine zu starke Gewichtung eines einzelnen Probanden in der Betrachtung von Alterseffekten auszuschließen, wurden die Laute dieses Säuglings vor der 23. Woche nicht in die Analyse miteinbezogen.

Der erste Bereich des Samplesplits bezieht sich somit auf den Zeitraum vor der 23. Woche ($\leq 154d$), welcher nur noch aus unversorgtem Lautmaterial besteht. Verglichen wird hier ebenfalls nur mit Aufnahmen der Kontrollgruppe in diesem Altersspektrum. Der zweite Bereich umfasst die Aufnahmen der Probanden ab der 23. Woche ($> 154d$). Hier wurden nur die Aufnahmen der versorgten HI-Säuglinge verwendet und mit der KG im äquivalenten Alter verglichen. Als Synonym für den Altersbereich $\leq 154d$ wurde „vor 23 Wochen“, für den Altersabschnitt $> 154d$ „nach 23 Wochen“ verwendet

Somit ergibt sich für die finale Analyse der einfachen Vokanten (1B und KL, siehe Kapitel 4.7) ein Datensatz mit einer Stichprobengröße von $n = 447$ für die HI-Gruppe und $n = 419$ für die KG-Gruppe.

4.4 Datenanalyse

Zum Erhalt eines für die Studie hinreichend homogenen finalen Datenkollektivs aus den zur Verfügung stehenden Aufnahmen, wurden die standardisierten Analysemethoden im SignalanalySELabor des ZVES genutzt. Diese wurden von der Autorin in aufeinander aufbauender Reihenfolge angewandt. Die Datenaufbereitung mithilfe der Analysesysteme, die von der Autorin erlernt, modifiziert und durchgeführt wurden, nahm einen beträchtlichen zeitlichen Anteil der Arbeit zur vorliegenden Dissertation in Anspruch (16 Monate in Vollzeit).

Zur Datenanalyse werden im ZVES vornehmlich zwei Programme verwendet, PRAAT und CDAP, die an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Bei PRAAT handelt es sich um ein open-source Programm zur phonetischen und akustischen Analyse, welches im ZVES bereits mehrfach verwendet wurde und sich zur Analyse vorsprachlicher Vokalisationen bewährt hat (Eiband, 2018; Kajtazovic, 2015; Pachtner, 2016; Prochnow, 2013). Dargestellt wurden hier die Soundfiles sowohl in einer Zeitbereichsdarstellung als auch parallel im Frequenz-Spektrogramm (siehe Abbildung 5).

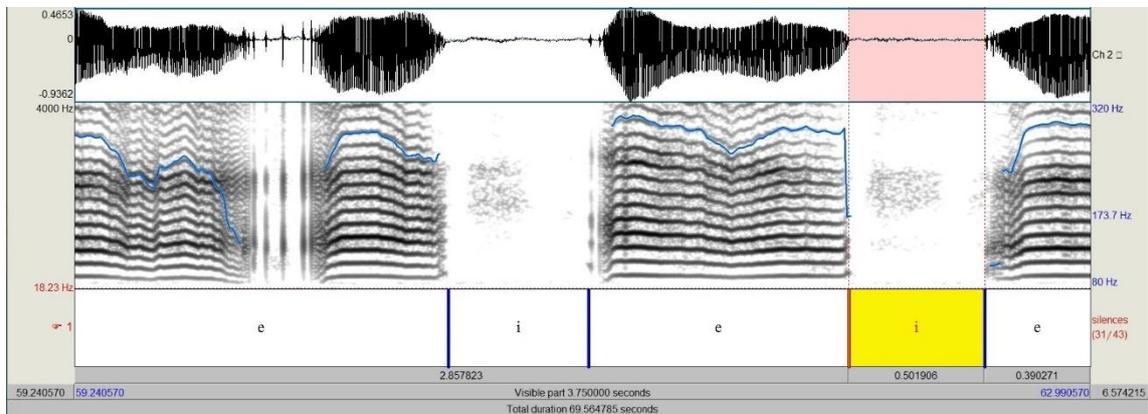


Abbildung 5: PRAAT-Ausgabefenster

Das Ausgabefenster zeigt im oberen Bereich die Zeitbereichsdarstellung, in der Mitte wird das Frequenzspektrum (0-4 kHz) dargestellt, darunter befindet sich das Tier zur Markierung von verschiedenen Abschnitten.

Die Veränderung der Grundfrequenz über die Zeit entspricht der Melodie (hier als blaue Linie erkennbar, mit dazugehöriger blauer Skala rechts).

Die Intensität (Energie) der jeweiligen Frequenzkomponenten wird im Spektrum durch unterschiedliche Graustufen dargestellt. Der breite dunkle Bereich, der mehrere Harmonische (ganzzahlige vielfache der Grundfrequenz) umfasst, bildet den Resonanzbereich des Vokaltrakts ab. Zur besseren Darstellung eignet sich hierfür allerdings das Breitband-Spektrogramm. Generell gilt, je energiereicher der jeweilige Frequenzbereich ist, desto dunkler erscheint er in der Grauskalierung.

Zusätzlich gibt es ein freies Feld (Tier 1) unterhalb der Frequenzdarstellung, wie auch in Abbildung 5 sichtbar, welches der Markierung und Bezeichnung des jeweiligen gewünschten Abschnitts zur weiteren Analyse dient. Hier wurden der Anfang und das Ende einer egressiven Vokalisation innerhalb der aufgezeichneten Sequenzen manuell gekennzeichnet. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt unter 4.4.1 und 4.4.2.

Für die Analyse der Originalaufnahmen wurden spezifische Algorithmen (Textskripte) in PRAAT verwendet, die von Eisenmann (Dissertation in Vorbereitung) geschrieben bzw. modifiziert und im ZVES-Babylabor implementiert wurden. Hierbei handelt es sich um Routinen, die einen Teil der Analyse automatisieren. Durch Abbildung 6 soll der Ablauf der Analyseschritte verdeutlicht werden. Die einzelnen Schritte sind in den Abschnitten 4.4.1 bis 4.4.3 im Detail erläutert.

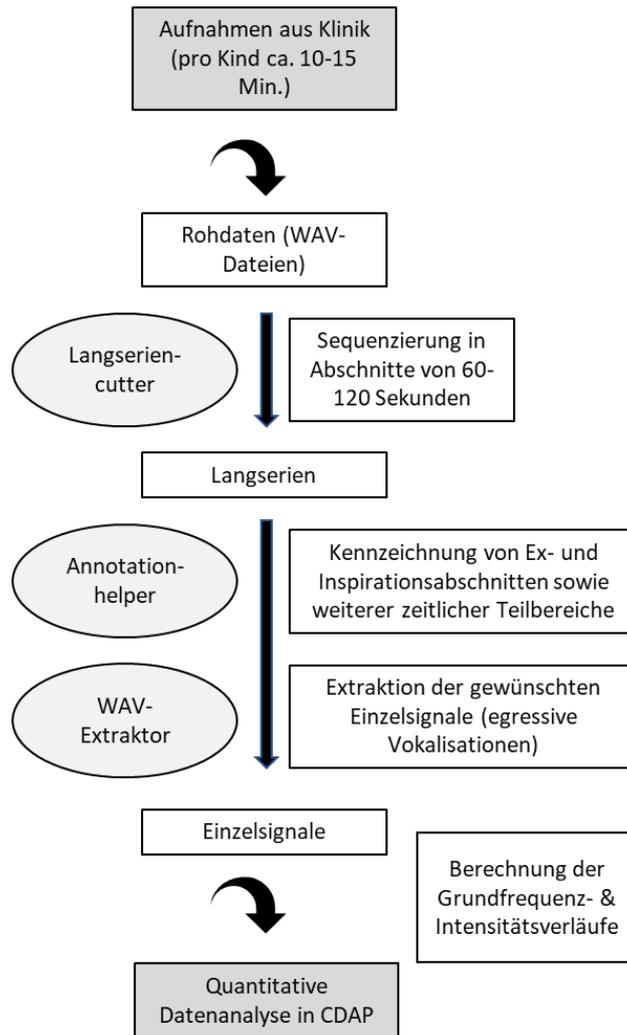


Abbildung 6: Ablauf der computergestützten Analyseschritte zur Datenaufbereitung

Auf Basis der berechneten Grundfrequenz- und Intensitätskonturen der Einzelsignale konnte anschließend mit dem zur Analyse von Säuglingslauten entwickelten Cry-Data-Analysis Programm (CDAP, Firma pw-project) am ZVES weitere Analysen durchgeführt werden. Ein Einzelsignal entspricht dabei einer Phonation während einer Expirationsphase. In CDAP werden der Verlauf der Grundfrequenzkontur und die Intensitätskurve über die Zeit für die Einzelsignale anhand eines Melodie-Intensitäts-Diagramms dargestellt (Abbildung 7). Mithilfe von CDAP können Frequenz-, Intensitäts- und Zeitachse manuell an ein Signal angepasst werden. Auf der linken Ordinate des Melodie-Intensitäts-Diagramms wird der Frequenzbereich aufgetragen. Dieser kann sowohl in einer linearen als auch in einer logarithmischen Darstellung angezeigt werden. Die Intensität des Signals wird auf der rechten Ordinate in der Einheit Dezibel [dB] angegeben. Auf der Abszisse ist die Zeitdauer des Signals in Sekunden dargestellt.

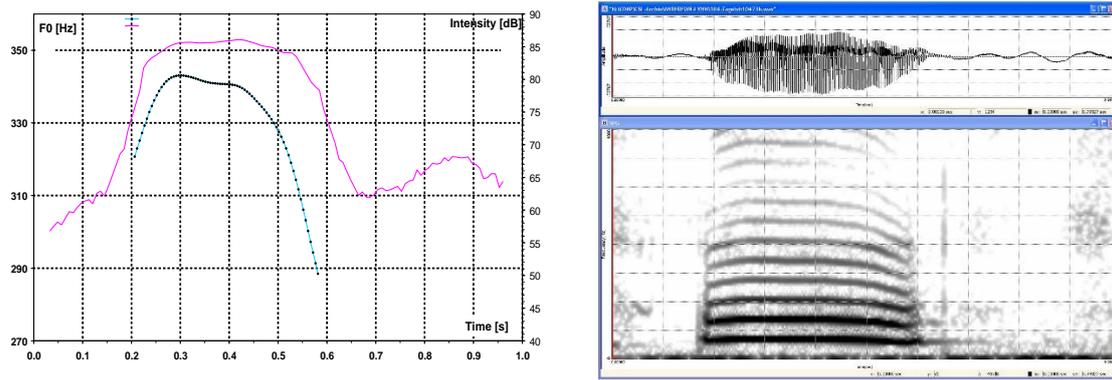


Abbildung 7: Melodie-/Intensitätsdiagramm eines Signals in CDAP und zugehöriges Frequenzspektrum des Signals (KAY-CSL)

Links ist das Melodie-Intensitätsdiagramm in der linearen Darstellung aufgezeigt, die blaue Linie bildet die Grundfrequenzkontur, die violette Linie den Intensitätsverlauf ab. Die rechte Abbildung zeigt die Frequenz- und Zeit-Darstellung des gleichen Lautes. Im oberen Fenster ist die Amplitude gegen die Zeit im Oszillogramm dargestellt, im unteren Fenster ist das dazugehörige Schmalband-Spektrogramm zu sehen.

Innerhalb des CDAP-Programms gibt es verschiedene Module, die zur weiteren Analyse jeweils spezifisch Verwendung fanden. Zur Analyse wurde hier vor allem das Modul EFA (Energie-/Frequenzamplitude) genutzt. Des Weiteren wurde das Modul Alben verwendet, welches eine Übersicht über die gesamten vorliegenden Vokalisationen zu einem Probanden in Form von Schmalband-Spektrogrammen liefert.

Im Folgenden werden die von der Autorin durchgeführten einzelnen Arbeitsschritte des Datenverarbeitungs- und Analyseprozesses in chronologischer Abfolge dargestellt und erläutert.

4.4.1 Segmentierung der Rohdaten

Die im CHC von den Säuglingen aufgenommen Lautsequenzen lagen nach Einlesen der SD-Karte in Form von pseudonymisierten WAV-Dateien als Rohdaten vor. Diese wurden in PRAAT in sinnvolle, handhabbare, kürzere Sequenzen von circa 60 bis maximal 120 Sekunden geschnitten. Wie Abbildung 6 in Kapitel 4 zeigt, wurde unterstützend ein zur Sequenzierung der Lautsequenzen geschriebenes Textskript, der Langserien-cutter, verwendet.

Zeitgleich wurde die Anzahl der Langserien pro Originalaufnahme sowie eine kurze Dokumentation über darin vorkommende akustische Ereignisse in einem zu jedem Probanden angelegten handschriftlichen Digitalisierungsprotokoll vermerkt. Begründet war dieses Vorgehen mit einer besseren Übersicht und möglichen Rückkontrolle, sofern

während der Analyse oder zu einem späteren Zeitpunkt Fragestellungen zum Kontext der Lautproduktion einzelner Vokalisationen auftreten würden. Bereits bei diesem ersten Bearbeitungsschritt fand, zusätzlich zur zeitlichen Sequenzierung, eine manuelle Vorselektion des Lautmaterials statt. Durch auditive Prüfung wurden Passagen, die keine zu analysierenden Laute enthielten (beispielsweise Passagen mit Hintergrundgeräuschen oder ohne jegliche Babylaute), differenzierend zu relevanten Lautäußerungen der Säuglinge gekennzeichnet. Der Langseriencutter extrahierte im Anschluss automatisch die als relevant gekennzeichneten Passagen und speicherte diese in einem Ordnersystem ab.

4.4.2 Annotation der Lautserien

Nachfolgend wurden die Langserien mit dem Annotation-helper, einem weiteren für diese Zwecke für PRAAT geschriebenen Skript, weiterbearbeitet (Eisenmann, Dissertation in Vorbereitung). Hier fand eine genaue Klassifizierung nach vorher definierten, wiederkehrenden Strukturen in den Lautäußerungen von Säuglingen statt. Das Programm selbst schlägt anhand der Intensität des Zeitsignals bereits eine Klassifizierung zwischen Expirationsphasen (Phasen mit Lautäußerung) und Inspirationsphasen vor.

Anschließend wurde sowohl durch visuelle als auch auditive Rückkontrolle mittels Kopfhörer eine Überprüfung der automatischen Annotation vorgenommen. Gegebenenfalls wurden nachträglich manuelle Korrekturen durch Cursorverschiebung vorgenommen. Die Klassifizierung der unterschiedlich zu kennzeichnenden Lautäußerungen basiert vornehmlich auf langjährigen Erfahrungen am ZVES. Zudem wurde für dieses Projekt unter Berücksichtigung der Altersklasse und dem Stand der vorsprachlichen Entwicklung eine spezifische Vorgehensweise bei der Annotation angewandt. Durch einen engen Austausch zwischen dem Entwickler der genannten Skripte, Michael Eisenmann, und dem Bearbeitungsteam, konnte eine weitere Anpassung und Optimierung der neuen PRAAT-Programme stattfinden.

Bei der Annotation wurde zwischen folgenden Abkürzungen unterschieden:

Tabelle 8: Schema zur Annotation der Lautserien

e	Expirationsphase, Phase mit hörbarer Phonation (Einzelsignale)
i	Inspirationsphase
a	Atemfolgen, längere Passagen in denen nur Atmung zu hören ist
f	„fuzzing“, Folgen von sehr kurzen Phonationen (Diskomfortlaut)
in	Interaktionsserien, eine Kontaktperson interagiert akustisch mit dem Säugling
kp	Kontaktperson, Kennzeichnung der Äußerung einer Kontaktperson separat, bei folgenden, längeren Passagen des Säuglings
nv	„nicht verwendbar“, bei Störgeräuschen, Ansagen, Unterhaltung von Personen im Hintergrund, Kontaktperson ohne unmittelbar folgende Vokale des Säuglings

Trotz des großen Umfangs und der Komplexität der zu differenzierenden Merkmale, konnte durch wiederholte Kontrolle und Rücksprache im Analyseteam eine einheitliche und reproduzierbare Einteilung sichergestellt werden. Diese Einteilung wird auch für die Bearbeitung weiterer Untersuchungen im Rahmen der Kohortenstudie verwendet.

4.4.3 Extraktion der Einzelsignale

Die annotierten Sequenzen (PRAAT-Textgrids), hier alle Einzelsignale (e), wurden mit dem sogenannten WAV-Extraktor extrahiert. Nachfolgend wurden die Audiofiles (WAV-Files) zusammen mit den automatisch in PRAAT berechneten Grundfrequenz- und Intensitätsverläufen an das Analyseprogramm CDAP zur weiteren Bearbeitung übergeben.

4.5 Qualitative und quantitative Analyse

Mithilfe des am ZVES entwickelten und routinemäßig seit Jahren zur vorsprachlichen Datenanalyse eingesetzten CDAP-Programms wurden die zuvor selektierten Einzelsignale weiterbearbeitet. Basierend auf vorangegangener automatisierter Berechnung von Grundfrequenz und Intensität mit Hilfe von PRAAT konnten die Analyseergebnisse zur nachfolgenden Kategorisierung und quantitativen Analyse in CDAP zusammengeführt werden. Die grafische Darstellung erfolgt hierzu in Form von Schmalband-Spektrogrammen. Eine ergänzende Prüfung im Breitband-Spektrogramm wurde ebenfalls angewandt. Am ZVES wird für die automatische Berechnung und grafische Darstellung der Spektren das CSL-4500 System von Kay verwendet.

4.5.1 Vorbereitung der extrahierten Einzelsignale

Im ersten Schritt wurde bei allen Einzelsignalen die automatisch berechnete Grundfrequenz (f_0) unter Verwendung der Frequenzspektren geprüft und gegebenenfalls nachträglich manuell mithilfe von PRAAT neu berechnet. Um dies zu erleichtern wurde in CDAP ein Vermerk unter dem Button PRAAT-Kontrolle vorgenommen und der neue Suchbereich notiert. Bevor eine weitere Bearbeitung in CDAP stattfinden konnte, musste der Grundfrequenzverlauf in PRAAT durch geeignete Variation des voreingestellten Standardbereichs neu berechnet werden. Durch die Optionen „Glätten“ und „Löschen“ können in CDAP gegebenenfalls vorhandene, lokale Artefakte der Grundfrequenzkontur entfernt werden. Anschließend wurde mit der Option „Filtern“ durch einen im CDAP-Programm integrierten Binomial-Filter (ca. 40 Hz Tiefpassfilterung) eine Filterung des Grundfrequenzverlaufs vorgenommen. Dieser wurde hierbei einheitlich auf 36 Iterationen eingestellt.

4.5.2 Klassifikation der Melodiestructur

In der Strukturanalyse wurden die unterschiedlichen melodischen Konturmerkmale bestimmt. Unter Verwendung spektraler Eigenschaften sowie des Verlaufs der Grundfrequenz (Melodie) und der Intensität der einzelnen Vokalisationen wurden diese im Modul EFA (Energie-/Frequenzamplitude) des CDAP-Programms kategorisiert. Durch Abspielen des Audiosignals fand zusätzlich eine perzeptive Kontrolle statt. Anhand der Melodie-/Intensitätsdiagramme wurde sowohl die Anzahl der Melodiebögen als auch die Anzahl vorhandener Segmentierungen im Melodieverlauf vermessen, klassifiziert und vermerkt. Das Klassifikationssystem hierfür beruht auf der von Wermke (2002) erarbeiteten und am ZVES modifizierten und erweiterten Kategorisierung vorsprachlicher und früher sprachlicher Laute. Im Folgenden werden die Klassifikationskriterien zur melodischen und spektralen Analyse erläutert.

Bei der Melodiestructur unterscheidet man zunächst zwischen einfachen, einbogigen und komplexen Melodien, welche aus mehreren Bögen bestehen.

Einfachbogen (1B)

Bei einfachen Bögen handelt es sich um Einzelsignale, die länger als 300ms sind und deren Melodie nur aus einer auf- und/oder absteigenden Flanke besteht. Laute unter 300ms wurden als Kurzlaut (KL) klassifiziert. Für die vorliegende Arbeit sind alle Kurzlaute unter 180ms nicht in die statistische Analyse eingegangen, da diese häufig unter die Kategorie der vegetativen Begleitgeräusche fielen. Ein Einzelsignal ist definiert als

eine Vokalisation, die während einer Expirationsphase ohne eine dazwischen liegende Inspiration entsteht. Die Amplitude eines Bogens muss dabei über mehr als zwei Halbtöne reichen (Hubkriterium). Das verwendete Hubkriterium wurde an die Sprachentwicklungsphase der Komfortvokalisation angepasst.

An- und Endlaut

Zusätzlich kann der Hauptbogen noch Elemente am Anfang oder Ende aufweisen (Ein- und Ausschwingvorgänge). Sofern diese Elemente kürzer als 150ms sind, wurden sie als Anlaut, bzw. Endlaut in der Analysemaske vermerkt. Sie wurden später separat vermessen und können bei allen im Folgenden beschriebenen Strukturen auftreten.

Doppel- und Mehrfachbögen (2B & MB)

Sofern die Melodie eines Einzellautes aus mehr als einem auf-/absteigenden Einzelbogen besteht, handelt es sich um eine komplexe Melodie und die Bogenanzahl wurde separat in die CDAP Maske zur Strukturanalyse eingetragen. Jeder Bogen muss dabei eine Länge von mehr als 150ms und einen Frequenzhub von mindestens zwei Halbtonschritten aufweisen. Diese Melodien können, wie bereits beschrieben, ebenfalls An- oder Endlaute aufweisen.

Segmentierung (S)

Bei komplexen Melodien können auch Segmentierungen zwischen den Bögen auftreten. Zu erkennen sind sie an zeitlich variablen Pausen zwischen Melodiebögen, in denen keine Inspiration erfolgt. Eine Segmentierung entsteht durch einen glottalen Schwingungsstopp, in dem die Schwingung der Stimmlippen sehr langsam wird und für kurze Zeit aussetzt. Die entstehenden Segmentierungspausen wurden danach in vollständige und unvollständige Pausen differenziert. Eine Segmentierung ist vollständig, wenn im Spektrogramm ein sichtbarer weißer Bereich auftritt und man auch auditiv in dieser Zone keine Lautproduktion wahrnehmen kann. Ist im Bereich noch ein phonatorisches Rauschen oder Pressen (Pulsregister) vorhanden, handelt es sich um eine unvollständige Segmentierung. Die Intensitätskurve muss in einer solchen Pause einen Intensitätsabfall von mindestens 10dB aufweisen, um sie als Segmentierung zu klassifizieren. Auch mehrere Segmentierungen (MS) innerhalb einer Lautproduktion sind möglich und wurden im Rahmen der Analyse gesondert vermerkt.

Sonderfälle sind die **komplexen Segmentierungen**, bei denen es eine Pause gibt und die Struktur auf einer Seite der Segmentierung aus mehr als einem Bogen besteht. Die

sogenannte **Hustensegmentierung**, bei der durch einen stoßartigen Kurzlaut eine Pause entsteht, wurde ebenfalls gesondert vermerkt. Zudem gibt es die Möglichkeit, dass auditiv eine Segmentierung wahrgenommen wird, die allerdings nicht als solche im Spektrogramm in Erscheinung tritt. Dies wurde unter **Segmentierungsansatz** vermerkt und als unsegmentierte Bogenstruktur klassifiziert.

Zusammenfassend können die erläuterten Melodiestrukturtypen in zwei Kategorien untergliedert werden. Man unterscheidet die einfachen Strukturklassen (ES), zu welchen Einfachbögen (1B) und Kurzlaute (KL) gezählt werden sowie komplexe Strukturklassen (KS). Zu diesen gehören alle Doppel- und Mehrfachbögen (2B, MB) und die unterschiedlichen Formen der Segmentierung (1S). Diese Unterteilung dient als Basis für die Berechnung eines Index (Melodiekomplexitätsindex), anhand dessen man bestimmen kann, wie komplex die Melodiebögen eines Probanden bzw. einer spezifischen Probandengruppe sind (siehe hierzu Kapitel 4.7).

Vermessung der Bogenmaße (BOMA)

Zusätzlich zur Strukturanalyse wurde die Melodie der Einzelsignale vermessen. Dies erfolgte ebenfalls in CDAP mit dem Vermessungsmodul für Bogenmaße. Bei der Vermessung der Signale orientiert man sich an der vorangegangenen Klassifikation zur Strukturanalyse. Hierbei wurden manuell Cursor an Anfang und Ende jedes Bogens, sowie eines An- oder Endlauts gesetzt. Auch Pausen die durch Segmentierung entstehen wurden so gekennzeichnet. Durch das Programm wurden nachfolgend die zugehörigen Grundfrequenz-, Intensitäts- und Zeitwerte der einzelnen gekennzeichneten Bereiche errechnet und automatisch in Exceltabellen gespeichert. Nach erfolgter Vermessung wurden die gesetzten Cursor unter dem Button „BOMA“ ebenfalls gespeichert und sind so jederzeit auch grafisch reproduzierbar.

4.5.3 Kategorisierung vorsprachlicher und früher sprachlicher Vokalisationen

Die finale Kategorisierung vorsprachlicher und früher sprachlicher Vokalisationen erfolgte auf Basis der in Kapitel 4.4 und 4.5 beschriebenen Methoden. Jedes Einzelsignal wurde hierfür bereits anhand von Schmalband-Spektrogrammen sowie dem Verlauf der Melodie und Intensitätskurve einer bestimmten Melodiestruktur zugeordnet und diese vermessen. Nachfolgend werden die erforderlichen Einzelschritte zur Klassifikation der Vokalisationen und Zuordnung zu einer Kategorie erläutert. Dies dient als Voraussetzung für die statistische Analyse.

4.5.3.1 Vokalisationstypen und Artikulationskategorien

Es erfolgte vorab eine übergeordnete Unterteilung des Untersuchungsmaterials nach dem Vokalisationstyp. Hierbei wurde eine Differenzierung zwischen vier verschiedenen Formen von Vokalisation vorgenommen. Die Klassifikation beruht auf der gängigen Einteilung von Säuglingslauten in der Fachliteratur unter Berücksichtigung der Erweiterung um U-Laute durch Wermke (2002).

- **Diskomfort-Laute:** Säuglingsschreie und allgemein Unmutslaute
- **Komfortlaute** (non-cry vocalization): Gurren (cooing) sowie marginales und kanonisches Babbeln
- **Übergangslaute:** Mischlaut zwischen Diskomfort- und Komfort-Vokalisation
- **Vegetative und reflexive Laute:** Laute die während vegetativen Funktionen oder als biologischer Reflex entstehen (Husten, Verschlucken, Gähnen, Schluckauf, Lachen etc.)

Für die vorliegende Dissertation wurden ausschließlich Komfortlaute quantitativ analysiert.

In der Literatur gibt es bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Schemata zur Klassifikation vorsprachlicher Säuglingslaute (Kent & Murray, 1982; Oller, Wieman, Doyle & Ross, 1976; Stark, Rose & McLagen, 1975). Zum Teil wurde zwischen „speechlike“ und „non speechlike“ unterschieden, wovon hier Abstand genommen wird, da diese Unterscheidung kaum zu objektivieren ist. Die von verschiedenen Autoren als „non speechlike“ beschriebenen Lautäußerungen der Säuglinge sind nach heutigem Verständnis ebenfalls ein wichtiges Element im Lernprozess zum Sprech- und Spracherwerb (Kent & Murray, 1982; Mampe et al., 2009; Wermke, Mende, Manfredi & Brusciaglioni, 2002).

Für die Auswertung wurde eine Klassifikation aller Komfortlaute nach festgelegten Kriterien vorgenommen. Angelehnt ist das Klassifikationssystem an das Modell nach Wermke und Pachtner et al. (2013). Dieses unterteilt in vier Komfortlaut-Kategorien. Während in den ersten zwei Monaten die artikulierte Laute aufgrund der nicht ausgereiften Vokaltrakt-Funktion noch stark limitiert sind, zeigt sich bei den drei Monate alten Säuglingen bereits eine größere Diversität in der Lautproduktion (Wermke et al., 2002; Wermke & Mende, 2011). Es setzen supraglottale Mechanismen bei der Lautproduktion ein, sodass erstmals auch artikulierte Laute in Erscheinung treten (Wermke, Pachtner et al., 2013).

Die Komfortlaute wurden nach reiner Phonation und verschiedenen Artikulationskategorien unterschieden. Differenziert wurden hier insbesondere Artikulation mit

Resonanzvariation (**ART (rv)**), Artikulation mit Konsonant- und Vokalbildung (**ART(CV)**) sowie reine Phonation in Form von „Vokanten“ (**V**). Die einzelnen Kategorien werden nachfolgend genauer erläutert.

1. Reine phonatorische Aktivität:

Bei dieser Art von Komfortlauten ist keine artikulatorische Aktivität im Vokaltrakt zu beobachten. Die Lautproduktion beruht hier auf reiner Phonation. Es entstehen vokalartige Laute, die je nach Literatur unterschiedlich genannt werden. Martin (1981) bezeichnet diese Art von Lauten beispielsweise als „vowel like“ oder „vocants“, wie sie danach auch von diversen anderen Autoren betitelt wurden.¹⁰ Bereits ein [ää] entspricht der Definition einer Resonanzvariation, da ein Wechsel zwischen den Resonanzfrequenzen die Klangvariation erzeugt. Dies erfordert eine Resonanzänderung des Vokaltrakts und somit ist hier schon Artikulation vorhanden.

2. Zusätzliche supralaryngeale Artikulation in Form von Resonanzvariation:

Artikulation (**ART**) beschreibt alle im Vokaltrakt ablaufenden Bewegungsvorgänge, welche die Resonanzeigenschaften der laryngeal erzeugten Laute verändern. Der Vokaltrakt umfasst die supraglottalen lufthaltigen Hohlräume, die der Lauterzeugung dienen. Es gibt unterschiedliche Formen von Artikulation (Friedrich, Bigenzahn, Zorowka & Brunner, 2008).

In dieser zweiten Kategorie ist insbesondere die Artikulation in Form von Resonanzvariation (**ART (rv)**) ohne Vokaltraktkonstriktion beschrieben. Da der Vokaltrakt ein schwingungsfähiger Hohlkörper ist, besitzt er mehrere Eigenfrequenzen (Resonanzfrequenzen). Das phonatorisch erzeugte Signal unterliegt auf dem Weg durch den Vokaltrakt einer gewissen Veränderung indem Töne, die im Eigenfrequenzbereich liegen verstärkt und Töne außerhalb dieses Spektrums gedämpft oder sogar ausgelöscht werden können. Durch Verschiebevorgänge des Vokaltrakts (Artikulation), kommt es zu einer Verlagerung der Resonanzfrequenzen (bspw. „aoe“). Je nach gebildetem Vokal gibt es charakteristische

¹⁰ Zu dieser Lautkategorie kann man zudem die „vocalic-sounds“, sowie die in unterschiedlicher Weise bezeichneten „Quasivokale“ nach Oller zählen („quasivowels“, „quasiresonant“, „quasiresonant nuclei“ oder „quasivocalic sound“) Bloom, D'Odorico und Beaumont (1993); Lynch, Oller, Steffens und Buder (1995); Martin (1981); Oller (1986), (2000); Oller und Eilers (1988); Stark, Talkin, Heinz und Bond (1982), siehe hierzu auch Kapitel 2.2.

Frequenzbereiche, die Formantenbereiche (Friedrich et al., 2008; Mathelitsch & Friedrich, 2000). Die Formanten sind im Breitband-Spektrogramm besonders deutlich zu erkennen. Im Schmalband-Spektrogramm lassen sich die Formanten durch unterschiedliche Schwarzfärbung der Teiltonmaxima jedoch ebenfalls darstellen.

Studien legen nahe, dass Säuglinge bereits ab einem Alter von 9 Wochen versuchen, durch kontrollierte Veränderung der tieferen Harmonischen einer Melodie, stimmliche Resonanz zu erzeugen (Wermke et al., 2002; Wermke et al., 2005).

3. **Zusätzliche supralaryngeale Artikulation in Form erzeugter konsonant-ähnlicher Elemente:**

Als Artikulation mit Konsonant- und Vokalbildung **ART(CV)** wird Lautproduktion bezeichnet, bei der ein konsonant-ähnlicher Laut (C) im Zusammenhang mit einem vokalartigen Laut (V) auftritt. Konsonanten und konsonant-ähnliche Elemente werden durch Konstriktionen innerhalb des Vokaltrakts erzeugt, wodurch der Atemluftstrom an der Passage gehindert wird. Diese Engstellen können an verschiedenen Stellen des Vokaltrakts gebildet werden, je nach Lokalisation entstehen unterschiedliche Lauteindrücke (Friedrich et al., 2008). Als Vokal kann hierbei sowohl ein Halbvokal als auch ein voller Vokal fungieren. Auch bei Konsonanten können Vorläufer, also konsonant-ähnliche Laute auftreten. Konsonanten sind in der Regel als schmale, vertikale Rauschbanden im Schmalband-Spektrogramm zu erkennen.

Für bestimmte konsonant-ähnlichen Laute, die hier in den „Vocants“ beobachtet werden konnten, wurde eine eigene Kategorie eingeführt, die der sogenannten Pseudokonsonanten.

Pseudokonsonanten (**ART(C?)**) entstehen, sobald der Artikulationstrakt durch zufällige Zungen- oder Velum-Bewegung unvollständig verengt wird. Dies geschieht vornehmlich zu Beginn der Sprachentwicklung und ist vorwiegend auditiv zu differenzieren. Martin (1981) bezeichnete diese und andere konsonant-artigen Laute als „closants“.

Eine besondere Form der supralaryngealen Artikulation, welche bei Säuglingen beobachtet wird, ist das Raspberry (**RASP**). Raspberry ist eine Art von Vibrieren, Reiben oder Rollen, welches meist mit den Lippen oder mit der Zunge erzeugt wird. Gelegentlich kommt es auch durch den Zungenkörper zustande, der sich

gegen den zahnlosen Alveolarkamm bewegt. Raspberry wird in der Literatur auch als „trills“ oder „friction noise“ bezeichnet (Oller, 1980; Stark, 1980).

Als vierte Kategorie der Komfortlautproduktion gilt das kombinierte Auftreten der beschriebenen Kategorien 1 bis 3.

Zusätzlich zu den vier aufgeführten Komfortlaut-Kategorien wurde zwischen zwei weiteren Kategorien unterschieden. Hierbei handelt es sich zum einen um **High Pitch** (bzw. Shift/Quieker), zum anderen um Artikulation mit Pressen (**ART(P1)**). Diese beiden Kategorien zählen zu den Registertypen, welche in allen vorhergehend beschriebenen Klassifikationskategorien auftreten können. Insbesondere treten diese auch in Kombinationen mit der final analysierten Vokalisationsart der Vokanten auf (siehe Kapitel 4.5.3.2). Deshalb werden zum besseren Verständnis von High Pitch und ART(P1) die drei vorhandenen Registertypen der menschlichen Klangerzeugung kurz erläutert. Nach Hollien (1972) ist ein Stimmregister eine Reihe oder ein Bereich aufeinanderfolgender Frequenzen, die mit nahezu identischer Sprachqualität erzeugt werden können. Definiert werden drei Registerarten, das Pulsregister im niedrigen Phonationsbereich, das Modalregister im mittleren Bereich sowie das Kopfreister im hohen Frequenzbereich (Hollien, 1974).

Das Pressen oder Pulsregister (ART(P1)) wird im tiefsten dieser drei Register erzeugt. Es entstehen knarrende tiefe Töne, die auditiv als „Pulse“ wahrgenommen werden. Dieses Lautelement lässt sich auch als Sonderform den konsonant-ähnlichen Elementen aus Kategorie drei der Komfortlautklassifikation zuordnen. Als „High Pitch“ werden Töne im Kopfreister bezeichnet. Abrupt auftretende schnelle Sprünge der Grundfrequenz zu höheren oder tieferen Frequenzen werden als „shift“ bezeichnet. Solche High Pitch Intervalle kommen sowohl bei gesunden Säuglingen im Rahmen einer regelrechten vorsprachlichen Entwicklung in bestimmten Altersabschnitten vermehrt vor, können aber auch auf cerebrale Fehlsteuerung hindeuten (Michelsson, Sirviö & Wasz-Höckert, 1977).

4.5.3.2 Charakterisierung der untersuchten Vokalisationsart

Alle in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Vorarbeiten dienten der Analyse des vorhandenen Lautrepertoires von gesunden und schwerhörigen Säuglingen. Die Aufbereitung des Datenmaterials sowie die Kategorisierung aller Laute wurde in einem Analyseteam des

Projekts vorgenommen, bei dem die Autorin dieser Arbeit beteiligt war. Bedingt durch den Umfang des Projekts und der vielen zu berücksichtigten Faktoren war diese Vorarbeit notwendig, um die finale Auswahl und Kategorisierung einer gezielt zu analysierenden Vokalisationsart zu ermöglichen.

Als Vokalisationsart zur spezifischen Untersuchung wurde der „Vokant“ als einer der am frühesten in Erscheinung tretenden Komfortlaute gewählt (Kapitel 2.2). Die Bezeichnung orientiert sich an den nach Martin (1981) definierten „vocants“ (siehe hierzu auch Kapitel 4.5.3.1 unter Kategorie eins der vier Komfortlautklassifikationen). Es handelte sich hierbei nicht nur um ein frühes, sondern auch um ein sehr häufig auftretendes Vokalisationselement im Lautrepertoire von Säuglingen (Chen & Irwin, 1946). Dieser vokalartige Laut, der bereits im ersten Stadium der vorsprachlichen Entwicklung beobachtet werden kann, wird laryngeal gebildet. Er beruht auf reiner Phonation, bei unverstelltem, relativ offenem pharyngealem Anteil des Vokaltrakts. Die Beschreibung von Vokanten in dieser Arbeit orientiert sich an der Grunddefinition von vokalartigen Lauten in der Literatur. Kuhl und Meltzoff (1996) zeigten in einer spektrographischen Längsschnittanalyse, dass sich vokalartige Laute mit zunehmendem Alter der Säuglinge ändern. Bei Betrachtung des Vokalraums (Vokaldreieck) konnte im Alter zwischen 12 und 20 Wochen eine stärkere Separation in die jeweiligen Vokalbereiche festgestellt werden. Darüber hinaus schien stimmliche Nachahmung eine Rolle zu spielen. Säuglinge, die einem bestimmten Vokal zuhörten, erzeugten Vokalisationen, die diesem Vokal ähnelten (Kuhl & Meltzoff, 1996). Die meisten der frühen Vokale werden als e/i/ä oder u wahrgenommen (Kent & Murray, 1982).

Auch die nach Buder et al. (2013) als „Quasivowel“ oder Halbvokal bezeichneten Vorläufer der späteren vollen Vokale können zu dieser Vokalisationsart gezählt werden. Die Halbvokale unterscheiden sich laut Buder et al. (2013) von den vollen Vokalen zum einen auditiv, zum anderen durch die physiologische Entstehung. Halbvokale werden als akustisch leise und kurz sowie teilweise mit nasalem Anteil beschrieben. Artikulatorisch lässt sich bei diesen keine Bewegung des Vokaltrakts feststellen. Volle Vokale klingen im Gegensatz dazu lauter und länger. Halbvokale bzw. Quasivokale werden bei relativer Neutralstellung des Vokaltrakts gebildet (Buder et al., 2013).¹¹ Da eine eindeutige

¹¹ Besonders zu Beginn der vorsprachlichen Entwicklung tritt laut Oller (2000) vorwiegend diese simple Form der Halbvokale auf. Im Verlauf bekommt der Halbvokal jedoch eine stärkere expressive Komponente, und lässt sich je nach Betonung gezielter einsetzen. So kann das Kind lächelnd durch eine steigend-fallende Betonung beispielsweise Interesse und Gefallen bekunden, wohingegen eine schnell abfallende Betonung eher Desinteresse und Abneigung symbolisiert (Buder et al., 2013).

Differenzierung innerhalb der vokalartigen Laute kaum möglich ist, werden diese nachfolgend vereinfacht als Vokanten zusammengefasst. In vorliegender Arbeit sind insbesondere die Vokanten Gegenstand der finalen Analyse und statistischen Auswertung.

Während der mehrmonatigen Vorarbeit hat sich auch gezeigt, dass zur Auswertung noch eine Differenzierung innerhalb der Vokanten vorgenommen werden sollte. Je nach Melodiestructur können Vokanten in verschiedenen Kombinationen und Mustern auftreten. Es wurde hierfür eine Unterteilung der Vokanten in vier charakteristisch auftretende Formen (Melodiestructuren) vorgenommen. In der klassischen Form besteht der Vokant häufig aus einem Bogen mit einer auf- und absteigenden Flanke (1B). Diese Form des Vokanten kommt auch den Beschreibungen vokalartiger Elemente in der Literatur am nächsten.

1. **Klassischer Vokant (V):**

Der klassische Vokant besteht aus einem Bogen, der sowohl mit als auch ohne An- und/oder Endlaut vorkommen kann. Es kann sich hierbei auch um einen Kurzlaut (180-300ms) handeln. Abbildung 8 a) zeigt einen Vokanten mit Anlaut.

2. **Vokant mit Doppelbogen (V, 2B):**

Der Vokant kommt auch in komplexeren Strukturmustern vor, wie beispielsweise als Doppelbogenstruktur. In Abbildung 8 b) wird ein doppelböiger Vokant dargestellt.

3. **Vokanten mit Segmentierung (V-S-V):**

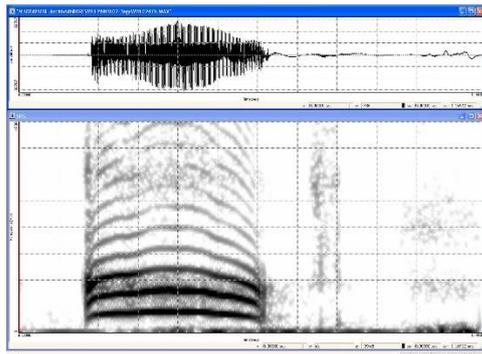
Sobald innerhalb einer Exspirationsphase zwei aufeinanderfolgende Vokanten auftreten, die durch einen glottalen Stopp segmentiert wurden, handelt es sich um einen Vokanten mit Segmentierungspause (1S). Dies wird in Abbildung 8 c) dargestellt.

4. **Vokant mit (Pseudo)- Konsonant (V,C?):**

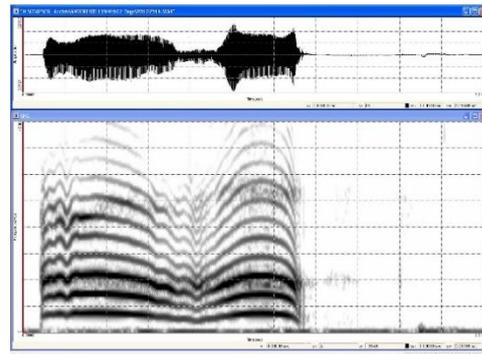
Ein Vokant in dem ein Pseudokonsonant, bzw. ein konsonantartiges Element vorkommt, wurde als Vokant mit Pseudokonsonant klassifiziert. Diese Form der Vokanten wird in Abbildung 8 d) dargestellt.

5. „Kombi“- Vokant (V-RASP; V-High Pitch; usw.):

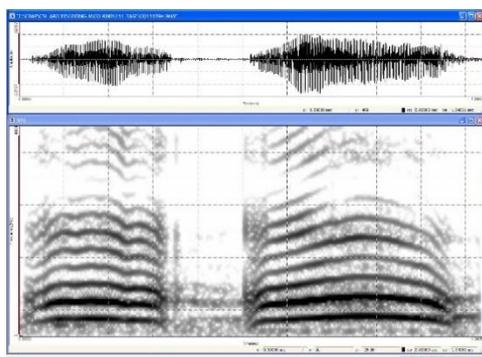
Vokanten, die in Kombination mit einem anderen Vokalisationselement auftreten, wurden als Kombi-Vokanten definiert. Beispiele zeigen Abbildung 8 e) und Abbildung 8 f). Zumeist ist der Vokant hierbei durch eine Segmentierung von dem anderen Vokalisationselement getrennt. Es kann aber auch vorkommen, dass sich weitere Elemente direkt an den Vokanten anschließen. Dieser Fall tritt vor allem in Kombination mit ART(P1) auf. Weitere Kombinationsmöglichkeiten bestehen mit Raspberry, unterschiedlichen Formen der Artikulation und High Pitch.



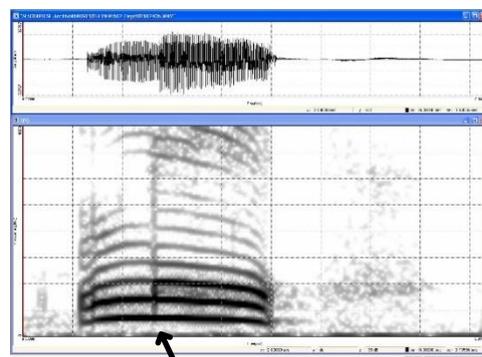
a) Vokant in einfacher, klassischer Form



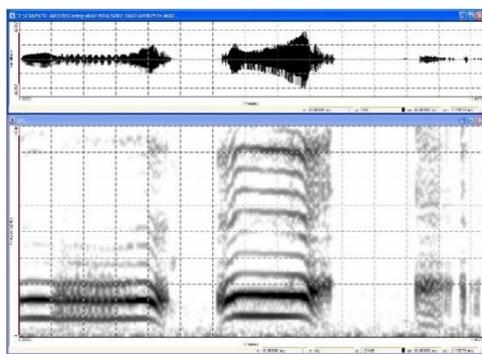
b) Vokant mit Doppelbogen-Melodie



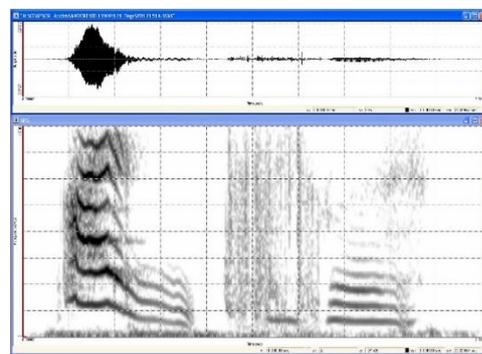
c) Vokant mit Segmentierung



d) Vokant mit Pseudokorsonant



e) Vokant (Mitte) in Kombination mit RASP und einem Kurzlaut, in einem zweifach segmentiertem Einzellausignal



f) Vokant (rechts) in Kombination mit High Pitch und RASP, in einem segmentiertem Einzellausignal

Abbildung 8: Darstellung der verschiedenen Vokantenformen

Unterschieden wurden die Vokantenformen sowohl auditiv als auch anhand der Spektrogramme. Bei Vokanten ist innerhalb des Frequenzspektrums zumeist eine höhere Intensität der ersten drei Harmonischen (dunklerer Bereich im Frequenzspektrum) zu beobachten.

Abschließend wird in Abbildung 9 ein stilisierter Vokant mit Angaben der Variationsbereiche von Länge und Hub aufgezeigt. Die Werte hierfür ergeben sich aus den Mittelwerten des untersuchten Datensamples der Kontrollgruppe sowie deren Standardabweichung für alle einbogigen, als Vokanten klassifizierten Melodiestrukturen.¹²

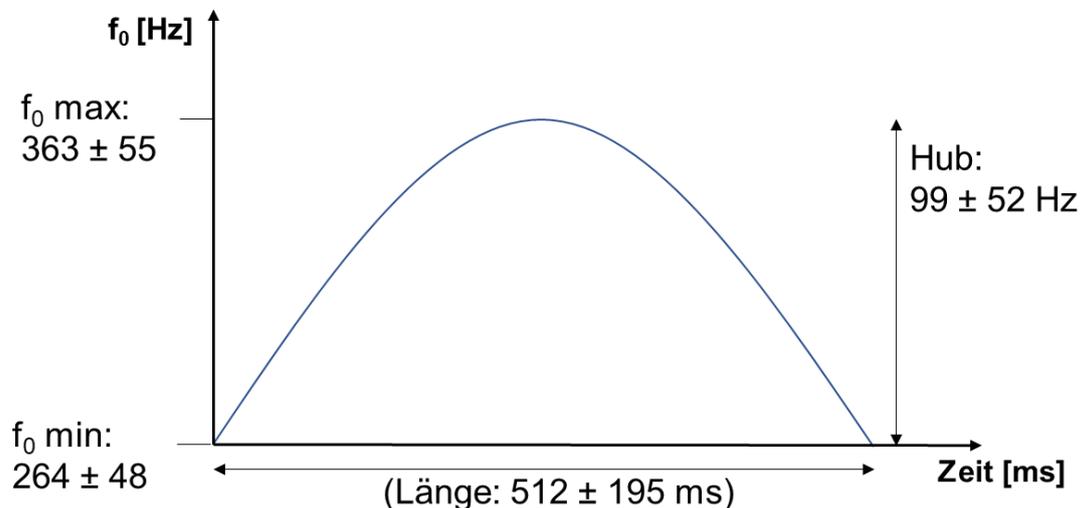


Abbildung 9: Stilisierter Vokant mit Maßangaben für Hub, Maxima und Minima der Grundfrequenz sowie der Länge¹³

Die folgende Voranalyse sowie der Ergebnisteil bezieht sich ausschließlich auf die hier erläuterte Vokalisationsart der Vokanten.

4.6 Deskriptive Voranalyse

Für die nachfolgende deskriptive Analyse wurde zunächst der Zusammenhang der Vokalisationen der NH-Gruppe der Kohortenstudie und der gesunden Referenzgruppe geprüft. Zur modellhaften Veranschaulichung einer regelrechten vorsprachlichen Entwicklung wurden, wie bereits im Abschnitt 4.2 Probandenkollektiv erläutert, die Lautaufnahmen dreier unauffälliger Säuglinge einer Längsschnittanalyse ebenfalls vollständig kategorisiert und ausgewertet. Die Datenerhebung hierfür erfolgte durch Frank (Dissertation in Vorbereitung) im Rahmen einer separaten Studie. Da im Verlauf der Analyse der vorliegenden Arbeit noch nicht ausreichend medizinisch unauffällige Probanden für die NH-

¹² Der Vokant, der hier als stilisierte Bogen mit Angabe ermittelter Durchschnittswerte der Kontrollgruppe aus dem Datensatz versehen ist, fällt unter die beschriebene Kategorie der klassischen Vokanten.

¹³ Die Auswertung der Längenverhältnisse von Vokanten ist Gegenstand der Dissertation von Fabian Clad (Dissertation in Vorbereitung).

Gruppe vorlagen, wurde diese durch die drei Probanden der Referenzgruppe aufgefüllt. Nachfolgende Diagramme veranschaulichen stichprobenartig die Übereinstimmung der Messgrößen dieser zwei Gruppen.¹⁴ Dargestellt wird hierzu die Gesamtheit aller kategorisierten Vokanten innerhalb der beiden Gruppen. Die Unterteilung in die einzelnen Unterkategorien innerhalb der Vokanten (siehe Kapitel 4.5.3.2) findet hier keine Berücksichtigung. Aufgrund der breiten Schnittmenge der beiden Gruppen, wurden in den statistischen Auswertungen die Vokalisationen der unauffälligen Probanden der Kohortenstudie und die Aufnahmen der drei Säuglinge der Längsschnittanalyse, als **Kontrollgruppe** zusammengefasst.

Tabelle 9: Verteilung der gesamten Vokanten auf NH- und Referenzgruppe

	absolute Häufigkeit	Prozent (%)
NH-Gruppe	158	24,2
Referenzgruppe	496	75,8
Gesamt	654	100

Die Tabelle 9 zeigt die absolute Anzahl aller Vokanten in der jeweiligen Gruppe. Die Säuglinge der Kohortenstudie (NH) machen mit nur 24,2% einen geringen Anteil an der Gesamtzahl der untersuchten Vokalisationen in der „zusammengefassten“ Kontrollgruppe aus. Abbildung 10 und Abbildung 11 verdeutlichen die Schnittmenge bei beispielhaften Messgrößen (geomean f_0 , absoluter Hub).

¹⁴ Eine detaillierte Darstellung zur referenzmodellbasierten Analyse findet sich in Kapitel 5.4.

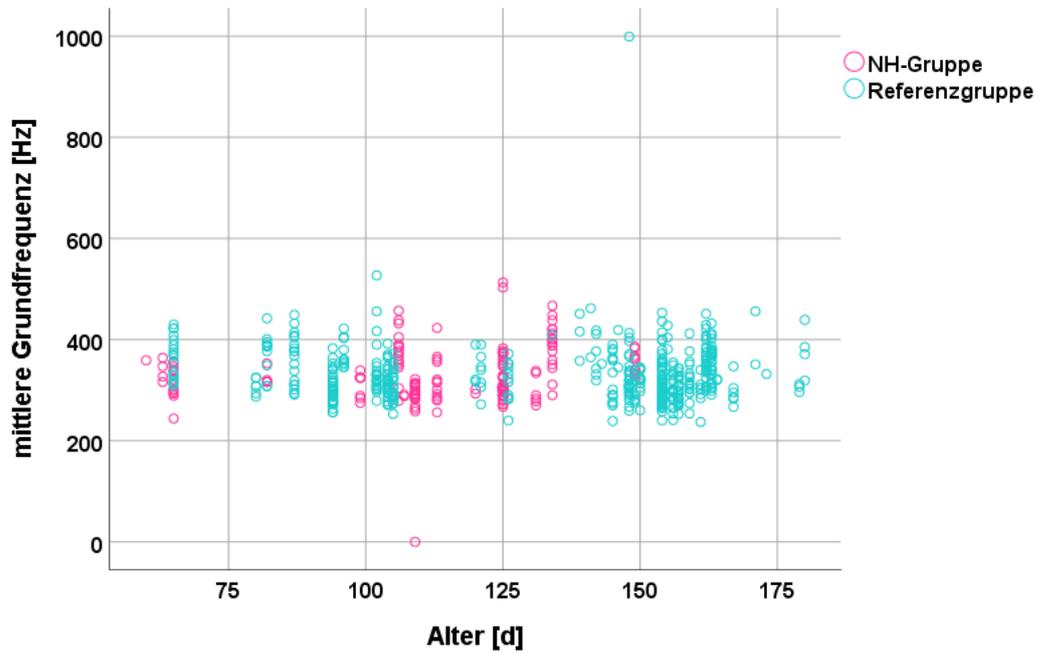


Abbildung 10: Streudiagramm zur Verteilung des geometrischen Mittelwerts in NH- und Referenzgruppe über die Gesamtheit der Vokanten

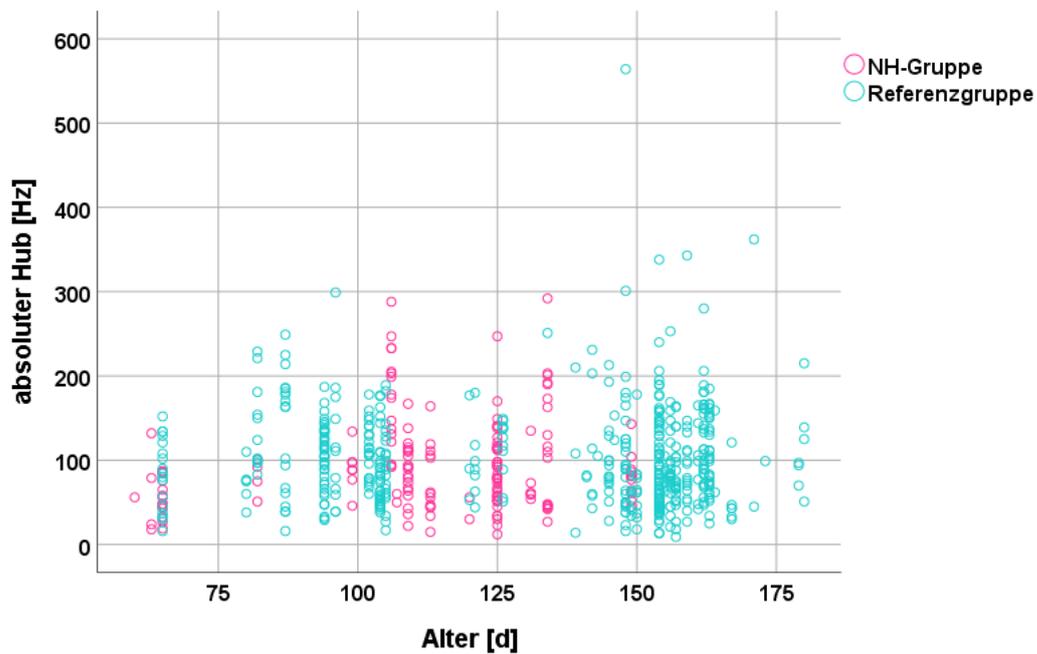


Abbildung 11: Streudiagramm zu Verteilung des absoluten Hubs in NH- und Referenzgruppe über die Gesamtheit der Vokanten

Während der Kategorisierung der Laute entstand zudem die Vermutung, dass es sich bei den „Vokanten mit Pseudokonsonanten“ („V,C?“) um eine Form von „unreifer“ Vokalisation handeln könnte. Derartige konsonant-ähnlichen Laute können beispielsweise durch eine unwillkürliche Zungenbewegung erzeugt werden. Geschieht diese Bewegung oder Konstriktion während einer Lautexpressionsphase, wird auditiv durch den Zuhörer ein Konsonant im Laut wahrgenommen. So kann auch während der Bildung eines Vokants ein solcher Laut entstehen und in den Vokal integriert werden. In Abbildung 12 wird die Verteilung der beiden Vokalisationselemente, Vokanten mit Pseudokonsonanten („V,C?“) und separate Vokanten („V“), über alle untersuchten Probanden dargestellt.

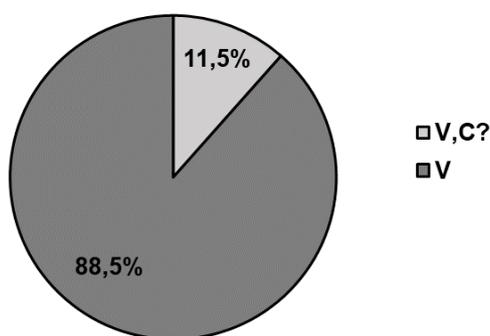


Abbildung 12: Kreisdiagramm über den prozentualen Anteil von separaten Vokanten und Vokanten mit Pseudokonsonanten über alle Gruppen

Es zeigte sich nur ein vergleichsweise geringer Anteil identifizierter V,C?- Einzelsignale. Zudem weisen die Probandengruppen eine relativ gleichmäßige Auftrittshäufigkeit von V,C? auf (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Verteilung der zwei Vokantenkategorien (V und V,C?) innerhalb der Probandengruppen

			V	V,C?	Gesamt
Gruppe	HI	Anzahl	495	69	564
		%	87,8%	12,2%	100,0%
	KG	Anzahl	533	64	597
		%	89,3%	10,7%	100,0%
Gesamt		Anzahl	1.028	133	1.161
		%	88,5%	11,5%	100,0%

Der Vokant mit Pseudokonsonant ist bisher nicht in der Fachliteratur beschrieben. Aufgrund der geringen Anzahl der „V,C?-Elemente“, deren Klassifikation als eigene Gruppe ohnehin nochmals geprüft werden muss, wurden die beiden Vokantenkategorien („V“

und „V,C?“) für nachfolgende Analysen zu einer Gruppe zusammengefasst. Sie werden daher im Folgenden einheitlich mit „V“ bezeichnet.

4.7 Statistische Analyse und Messgrößen

Für die abschließende quantitative Betrachtung und Auswertung spezifischer Messgrößen der Vokanten war die gesamte, in den vorhergehenden Kapiteln erläuterte, Aufbereitung des Datensamples notwendig. Neben der Kategorisierung der Lautäußerungen, insbesondere der Vokanten, wurden die Vokalisationen auf bestimmte Eigenschaften statistisch analysiert. Hierzu konnten anhand der vorangegangenen Messungen der Einzelsignale im CDAP-Programm verschiedene melodische und zeitliche Messgrößen zu jedem Laut generiert und in Excel bereitgestellt werden.

Der nachfolgende Ergebnisteil berichtet in einer vergleichenden Analyse über die verschiedenen Kennzahlen der Grundfrequenz sowie der Auftrittshäufigkeit der Melodiestrukturklassen von Vokanten. Hierbei wurde jeweils zwischen hochgradig hörgeschädigten (HI) und normalhörenden Säuglingen (KG) unterschieden. Die Analyse der Grundfrequenz umfasst die mittlere Grundfrequenz, die Standardabweichung des Grundfrequenzverlaufs sowie die Maxima und Minima der Grundfrequenz und den Grundfrequenzhub (absoluter Hub). Die statistischen Kennzahlen werden im Folgenden kurz definiert:

Kennzahlen der Grundfrequenz:

- **f_0 mean**
- **SD f_0**
- **f_0 min und f_0 max**
- **absoluter Hub (FM-Amplitude)**

Kennzahl der Melodiestruktur: **MCI (Melodiekomplexitätsindex)**

Zur besseren Vergleichbarkeit der Grundfrequenz innerhalb der Gruppen wurde der geometrische Mittelwert (geomean f_0) sowie die Standardabweichung der Grundfrequenz (SD f_0) jedes untersuchten Einzelsignals bestimmt.¹⁵ Da der menschliche Hörbereich eher einer logarithmischen als einer linearen Einteilung unterliegt, erscheint das

¹⁵ Bei der Berechnung der Standardabweichung wurde aufgrund von Limitationen in Microsoft Excel abweichend das arithmetische Mittel verwendet.

geometrische Mittel zur Betrachtung der mittleren Grundfrequenz sinnvoll. Der geometrische Mittelwert (f_0 mean) der Grundfrequenz wurde hierbei ohne ggf. vorhandene An- oder Endlaute berechnet.

$$f_0 \text{ mean} = \sqrt[n]{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad [1]$$

Die Standardabweichung der Grundfrequenz (SD f_0) stellte eine weitere Messgröße dar, durch welche die Streuung der einzelnen Messwerte um ihren Mittelwert bestimmt wurde. Hierbei dient das arithmetische Mittel der Grundfrequenz als Referenzgröße.

$$SD f_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [2]$$

Für die Berechnung des Hubs sowie der Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz wurde der Laut ebenfalls jeweils ohne An- und Endwelle betrachtet, um eine Manipulation durch mögliche Ausreißer ausschließen zu können. Der absolute Hub berechnet sich aus der Differenz zwischen den Maximal- und Minimalwerten der Grundfrequenz. Der absolute Hub der Grundfrequenzkontur wird auch als Frequenzmodulationsamplitude (FM-Amplitude) bezeichnet.

$$\text{absoluter Hub} = f_0 \text{ max} - f_0 \text{ min} \quad [3]$$

Wie in Kapitel 4.5.2 erläutert, wurde bei jeder Vokalisation zudem die Melodiestructur bestimmt. Auf Basis dieser Klassifikation kann der sogenannte Melodiekomplexitätsindex (MCI) berechnet werden (Wermke, Leising & Stellzig-Eisenhauer, 2007). Hierzu werden alle melodischen Strukturen zu zwei Strukturklassen zusammengefasst. Es gibt die einfachen Strukturklassen (ES), zu welcher die Einfachbögen und Kurzlaute zählen und die komplexen Strukturklassen (KS). Die komplexen Klassen setzen sich aus den Doppel- und Mehrfachbögen sowie jeglicher Art von Segmentierung zusammen (siehe Kapitel 4.5.2). Der MCI wird aus dem Quotienten von KS (Zähler) und der Summe von KS und ES (Nenner) gebildet. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und ist dimensionslos.

$$MCI = \frac{KS}{KS+ES} \quad [4]$$

Der MCI gibt den Grad der Melodiekomplexität an. Je höher der Anteil an komplexen Strukturen im Lautrepertoire eines Säuglings oder innerhalb einer definierten Probandengruppe ist, desto größer ist der MCI. Zunächst wurde für jeden Probanden ein MCI berechnet (Kindmittelwert). Anschließend wurde durch Bestimmung des arithmetischen Mittels aller MCI der Probanden einer Gruppe ein „Gruppen-MCI“ gebildet. Zu beachten

ist, dass sich der MCI hier nur auf die Melodiestrukturklassen der Vokanten bezieht und somit nicht das gesamte Lautrepertoire der Säuglinge berücksichtigt.

Alle hier definierten Kenngrößen waren Gegenstand der folgenden deskriptiven Analyse. Zur statistischen Auswertung wurde die Statistik-Software SPSS (Version 25) verwendet.

Die Kennzahlen der Grundfrequenz (f_0 mean, f_0 max, f_0 min, SD f_0 und Hub) wurden aufgrund der relativ geringen Größe der finalen Stichprobe zunächst auf Lautebene (Signallevel) betrachtet. Hierfür wurden für alle Vokalisationen in den definierten Gruppen anhand der bereitgestellten Werte der Exceltabelle deskriptive Statistiken generiert und anschließend in Grafiken genauer betrachtet. Die Datenanalyse liefert Hinweise auf die Verteilungseigenschaften der Grundfrequenzwerte. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden Histogramme, Streu-/Punktdiagramme und Box-Whisker-Plots verwendet. Um eine bessere Visualisierung potenzieller Entwicklungsverläufe der Ergebnisse zu erhalten wurde zudem zum Teil in den Streu-/Punktdiagrammen eine Loess-Kurve in SPSS generiert. Die Loess-Anpassungslinie zeigt Tendenzen und Zyklen in Datensätzen auf. Hierbei wird ein definierter Anteil an Datenpunkten zur Berechnung einer lokalen Glättung verwendet. Als Glättungsparameter wurde einheitlich 80% festgelegt. Im Boxplot werden neben Minimum und Maximum immer der Median sowie zwei Quartile dargestellt. Die Box kennzeichnet den Bereich indem die mittleren 50% des Datensatzes liegen. Somit entsprechen die untere und obere Begrenzung der Box dem 25%-Perzentil und dem 75%-Perzentil. Die mittlere Linie innerhalb der Box kennzeichnet den Median. Die Whiskers, die außerhalb der Box liegen markieren das Minimum und das Maximum, sofern keine Ausreißer vorliegen.

Anschließend wurde zusätzlich für jedes Kind ein Kind-Mittelwert über alle jeweils vorliegenden Vokalisationen berechnet. Je nach statistischer Betrachtung gingen, wie in Kapitel 4.3 erläutert, zum Teil nur bestimmte Probanden in die Analyse ein, welche in den definierten Altersbereichen (≤ 23 oder > 23 Wochen) Lautmaterial aufwiesen. Für den Altersbereich vor 23 Wochen entspricht die Anzahl der Kinder in der Kontrollgruppe $n = 18$, für die HI Gruppe standen $n = 8$ Probanden zur Verfügung. Im Altersbereich ab 23 Wochen entspricht $n = 3$ für die Kontrollgruppe und $n = 4$ für die HI-Gruppe. Anhand der Kindmittel konnten ausgewählte Messgrößen mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf das Vorliegen einer Normalverteilung überprüft werden. Sofern eine Normalverteilung nicht abgelehnt werden konnte, wurde mit parametrischem Test, andernfalls mit nicht-

parametrischem Test weitergearbeitet. Zum Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben mit dem nicht-parametrischen Testverfahren wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Bei vorliegender Normalverteilung konnte der t-Test angewendet werden. Als Signifikanzniveau wurde für alle Testverfahren $p = 0,05$ festgelegt. Sofern nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird, bezieht sich die statistische Analyse auf das Signallevel. Bei Untersuchungen auf Kindlevel wird dies gesondert gekennzeichnet.

5 Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden rund 20.000 Laute untersucht. Von diesen standen nach Vorselektion 6.500 Laute von insgesamt 27 Säuglingen zur geforderten Kategorisierung zur Verfügung. Es erfolgte eine weitere Klassifikation und Selektion, um ein möglichst homogenes Datensample für die statistische Auswertung zu erhalten. Die Auswertung bezieht sich nur auf die in Kapitel 4 spezifizierte Vokalisationsart der Vokanten, welche 1.238 Laute umfasst. In diesem finalen Datensample waren 18 Probanden gesund und wiesen keine Hörbehinderung auf, 9 Säuglinge hatten eine hochgradige Schwerhörigkeit beidseits.

Dieses Kapitel bietet zunächst eine quantitative Übersicht über die strukturelle Verteilung der untersuchten Vokalisationsart der Vokanten. Außerdem wird die Verteilung der Vokantenkategorien innerhalb der einzelnen Gruppen betrachtet. Anschließend werden weitere objektive akustische Messgrößen statistisch ausgewertet und hinsichtlich Differenzen zwischen den Vokanten der gesunden Säuglinge (**KG**) und den hörgeschädigten Säuglingen (**HI**) analysiert. Bei den verwendeten Untersuchungsgrößen handelt es sich um die Kennzahlen der Grundfrequenz. Die f_0 -Analyse beinhaltet den absoluten Hub, die mittlere Grundfrequenz, die Standardabweichung der Grundfrequenz sowie das Frequenzminimum und -maximum.

5.1 Quantitative Analyse der Melodiestructur

5.1.1 Auftrittshäufigkeit der Melodiestructurkategorien

Die Laute wurden anhand der Melodie-/Intensitätsdiagramme in verschiedene Strukturmuster eingeteilt. Diese wurden bereits in Kapitel 4.5.2 Klassifikation der Melodiestructur erläutert. Nachfolgendes Säulendiagramm in Abbildung 13 stellt die Verteilung der Strukturmuster der Vokanten dar. Im vorliegenden Diagramm ist nicht zwischen den verschiedenen Kategorien der Vokanten (V; V-Kombi) differenziert worden. Somit entsprechen alle Vokanten zusammen 100% der untersuchten Vokalisationsart.

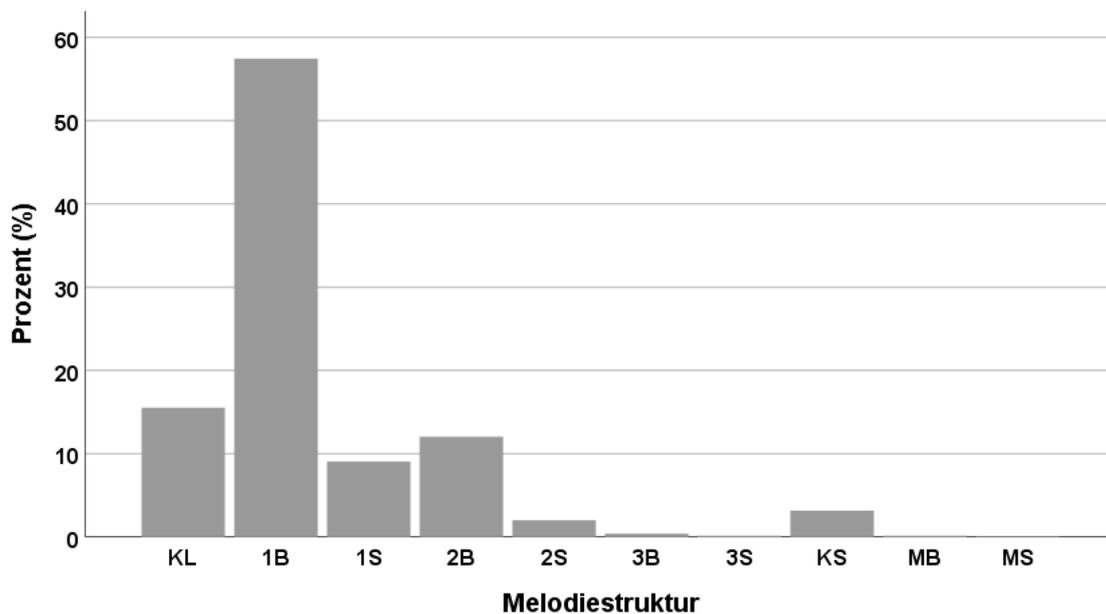


Abbildung 13: Säulendiagramm zur Verteilung der Melodiebogenstrukturen über die Gesamtheit der Vokantenkategorien aller Probanden

Zeichenerklärung: KL = Kurzlaut, 1B = Einfachbogen, 1S = einfache Segmentierung, 2B = Doppelbogen, 2S = zweifache Segmentierung, 3B = Dreifachbogen, 3S = dreifache Segmentierung, KS = komplexe Segmentierung, MB = Mehrfachbogen, MS = Mehrfachsegmentierung

Das Säulendiagramm in Abbildung 13 zeigt die relative Verteilung der Melodiestructur aller V-Laute ($n = 1.238$). Aus der Grafik wird deutlich, dass Kurzlaute zusammen mit einböigen Strukturen als einfachste Formen der Melodiebögen in der frühen Komfortvokalisation dominieren.

Um die Verteilung der Melodiestructuren in den einzelnen Gruppen zu erhalten, ist in Tabelle 11 die Zusammensetzung für beide Gruppe gesondert in Absolutwerten und als prozentuale Verteilung dargestellt.

Tabelle 11: Verteilung der Melodiebogenstruktur über alle Vokanten innerhalb der Probandengruppen

Anzahl der Strukturtypen aller Vokanten		KL	1B	1S	2B	2S	3B	3S	KS	MB	MS	Gesamt
Gruppe	HI	114 20%	363 62%	41 7%	45 8%	5 1%	2 0%	2 0%	12 2%	- 0%	- 0%	584 100%
	KG	78 12%	348 53%	71 11%	104 16%	20 3%	3 0%	- 0%	27 4%	2 0%	1 0%	654 100%
Gesamt		192 16%	711 57%	112 9%	149 12%	25 2%	5 0%	2 0%	39 3%	2 0%	1 0%	1.238 100%

Zeichenerklärung: KL = Kurzlaut, 1B = Einfachbogen, 1S = einfache Segmentierung, 2B = Doppelbogen, 2S = zweifache Segmentierung, 3B = Dreifachbogen, 3S = dreifache Segmentierung, KS = komplexe Segmentierung, MB = Mehrfachbogen, MS = Mehrfachsegmentierung

Im weiteren Verlauf werden die kombinierten Vokanten, V-Kombi (n = 77), nicht in die Analyse einbezogen. Durch die Kombination mit unterschiedlichen Vokalisationsarten innerhalb einer Lautäußerung weisen sie eine hohe Variabilität auf. Zudem ist hier häufig bereits Artikulation vorhanden, weshalb diese inhaltlich gesondert ausgewertet werden sollten. Um jedoch zumindest eine Übersicht über das Auftreten der definierten Vokantenkategorien in den verschiedenen Probandengruppen zu erhalten, wird an dieser Stelle die ermittelte Häufigkeit der verschiedenen Kategorien in Tabelle 12 dargestellt. Unterschieden werden insbesondere „V“ und „V-Kombi“.

Tabelle 12: Anteile von V und V-Kombi innerhalb der Gruppen

			V	V-Kombi	Gesamt
Gruppe	HI	Anzahl	564	20	584
		%	96,6%	3,4%	100,0%
	KG	Anzahl	597	57	654
		%	91,3%	8,7%	100,0%
Gesamt		Anzahl	1.161	77	1.238
		%	93,8%	6,2%	100,0%

Innerhalb der KG-Gruppe zeigt sich verglichen mit der HI-Gruppe eine größere relative Häufigkeit komplexer Strukturen (V-Kombi).

Tabelle 13 stellt die Verteilung der Bogenstrukturen der Vokanten ohne „V-Kombi“ dar. Bei vergleichender Betrachtung der beiden Gruppen HI und KG lässt sich hier ebenfalls ein höherer Anteil weniger komplexer Melodiestructuren in der HI-Gruppe erkennen.

Tabelle 13: Verteilung der Melodiebogenstruktur der Vokanten ohne V-Kombi

Anzahl der Strukturtypen der Vokanten ohne V-Kombi		KL	1B	1S	2B	2S	3B	3S	KS	MB	Gesamt
Gruppe	HI	114 20%	361 64%	32 6%	45 8%	3 1%	2 0%	2 0%	5 1%	- 0%	564 100%
	KG	78 13%	341 57%	47 8%	100 17%	9 2%	3 1%	0 0%	17 3%	2 0%	597 100%
Gesamt		192 17%	702 60%	79 7%	145 12%	12 1%	5 0%	2 0%	22 2%	2 0%	1.161 100%

Zeichenerklärung: KL = Kurzlaut, 1B = Einfachbogen, 1S = einfache Segmentierung, 2B = Doppelbogen, 2S = zweifache Segmentierung, 3B = Dreifachbogen, 3S = dreifache Segmentierung, KS = komplexe Segmentierung, MB = Mehrfachbogen, MS = Mehrfachsegmentierung

Insgesamt überwiegen bei beiden Gruppen die einfachen Strukturtypen (Einbogen-Strukturen (1B) zusammen mit den Kurzlauten (KL)). Basierend auf diesem Ergebnis wurde die folgende quantitative Analyse daher mit Vokanten dieser beiden Melodiestrukturen fortgesetzt.

5.1.2 Melodiekomplexitätsindex

Auf Basis der klassifizierten Melodiestrukturen aller Vokanten (V; V-Kombi) wurde anhand der ermittelten Strukturkategorien für jeden Säugling ein MCI berechnet. Anschließend wurde mithilfe dieser MCI-Werte ein Mittelwert für die jeweiligen Gruppen gebildet (Kindebene). Dies dient der Veranschaulichung des Anteils von komplexen Strukturkategorien an den Gesamtlauten. Alle Säuglinge, bei denen in Summe weniger als fünf Vokalisationen vorlagen, wurden von der Berechnung ausgeschlossen. Tabelle 14 zeigt die Werte für den MCI in den Probandengruppen.

Tabelle 14: Melodiekomplexitätsindex je Gruppe

Gruppe	Anzahl (n)	Mittelwert	Median
HI	8	0,20	0,22
KG	12	0,30	0,30

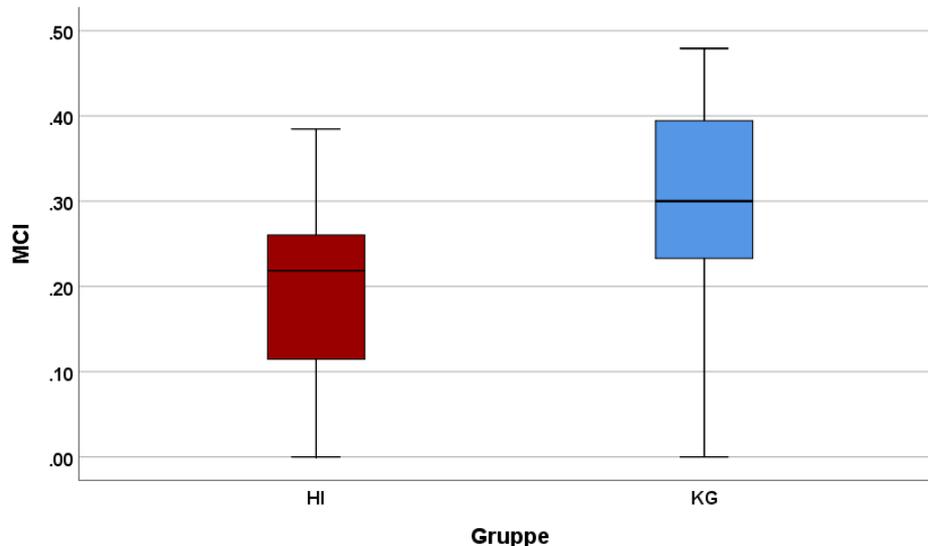


Abbildung 14: Boxplot zur Verteilung der MCI-Werte pro Gruppe (HI: n = 8, KG: n = 12)

Der Boxplot stellt den Unterschied in der Verteilung der MCI-Werte in den beiden Gruppen grafisch dar. Zu erkennen ist ein tendenziell höherer MCI für die Säuglinge der Kontrollgruppe verglichen mit denen der HI-Gruppe. Der Shapiro-Wilk-Test lieferte für beide Gruppen eine Normalverteilung (KG: $p = 0,601$; HI: $p = 0,888$). Trotz bestehender Unterschiede ist das Ergebnis nicht signifikant (t-Test: $p = 0,103$).

Zusätzlich wurden die MCI-Werte für die Altersbereiche vor und ab 23 Wochen für die jeweilige Gruppe berechnet, um einen altersabhängigen Entwicklungsverlauf untersuchen zu können. Die Alterstrennung berücksichtigte in diesem Fall nicht den Versorgungsstatus mit Hörhilfen der HI-Probanden. Es zeigt sich hierbei innerhalb beider Gruppen, HI und KG, eine Steigung der MCI-Werte mit zunehmendem Alter.

Tabelle 15: Melodiekomplexitätsindex in zwei Altersbereichen (vor bzw. nach der 23. Woche) je Gruppe

Gruppe	vor 23 Wochen			nach 23 Wochen		
	Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Anzahl (n)	Mittelwert	Median
HI	8	0,19	0,19	4	0,32	0,35
KG	12	0,24	0,30	3	0,39	0,45

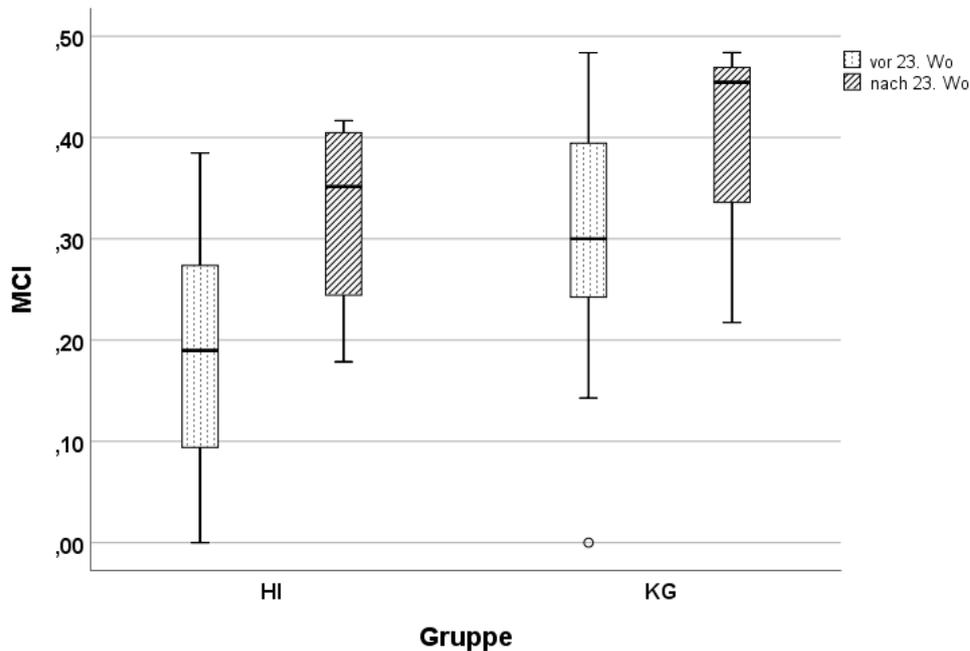


Abbildung 15: Boxplot zur Verteilung der MCI-Werte in zwei Altersbereichen

Für den Altersbereich vor 23 Wochen liegt sowohl für die HI-Gruppe als auch für die KG-Gruppe nach Shapiro-Wilk eine Normalverteilung vor (HI: $p = 0,992$; KG: $p = 0,617$). Obwohl ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Gruppen vor der 23. Woche anhand Abbildung 15 zu erkennen ist zeigt sich, vermutlich auf Grund der geringen Stichprobengröße, im t-Test kein signifikantes Ergebnis (t-Test: $p = 0,09$). Auch für den Altersbereich nach 23 Wochen sind nach Shapiro-Wilk beide Gruppen normalverteilt. Auch hier sind die Unterschiede nach dem t-Test nicht signifikant (t-Test: $p = 0,551$).

Im folgenden Kapitel 5.2 werden die Kenngrößen der mittleren Grundfrequenz zunächst auf Lautebene betrachtet, anschließend erfolgt zudem eine Analyse ausgewählter Größen auf Kindebene sowie eine referenzmodellbasierte Analyse.

5.2 Quantitative Analyse melodischer Frequenzeigenschaften

In der quantitativen Analyse der melodischen Messgrößen wurden die Probanden der Kontrollgruppe (KG) mit den hörgeschädigten Säuglingen (HI) verglichen. Alle Untersuchungen beziehen sich hierbei, wie aus Kapitel 5.1.1 hervorgeht, auf die einfachen Strukturklassen der Einfachbögen und Kurzlaute.

Wie bereits in Kapitel 4.2 Probandenkollektiv anhand der Tabelle 7 deutlich wurde, setzt sich die HI-Gruppe sowohl aus Aufnahmematerial mit aktivierten Hörgeräten (mit HH)

als auch ohne Versorgung, bzw. ohne aktivierte Hörgeräte (ohne HH) zusammen. Dies wurde in der Datenauswahl für die nachfolgende Analyse berücksichtigt und die Kontrollgruppe an den entsprechenden Altersbereich angepasst. Es ergibt sich somit für die statistische Analyse eine Fallzahl von **n = 419** für die Kontrollgruppe und **n = 447** für die HI-Gruppe.¹⁶ Nachstehend werden die Verteilungseigenschaften der Grundfrequenzmessgrößen beschrieben.

5.2.1 Mittlere Grundfrequenz

Zunächst wird die Verteilung der mittleren Grundfrequenz f_0 (geometrischer Mittelwert) über alle Vokanten mit einfachen Konturen (1B/KL) der gesunden Säuglinge sowie der hörgeschädigten Säuglinge in Abbildung 16 dargestellt. Die Werte für die Berechnung von f_0 beziehen sich hierbei, wie in Kapitel 4.7 erläutert, auf den Laut ohne eventuell vorhandene An- und Endwellen. Es wird noch nicht weiter in die Aufnahmekategorien „versorgt“ und „unversorgt“ differenziert.¹⁷ Die dazugehörige Tabelle 16 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Grundfrequenzanalyse der Vokanten innerhalb der Kontrollgruppe und der HI-Gruppe. In dieser Berechnung wurde der gesamte untersuchte Zeitraum betrachtet.

Tabelle 16: Deskriptive Statistik des geometrischen Mittelwerts der Grundfrequenz aller Vokanten pro Gruppe

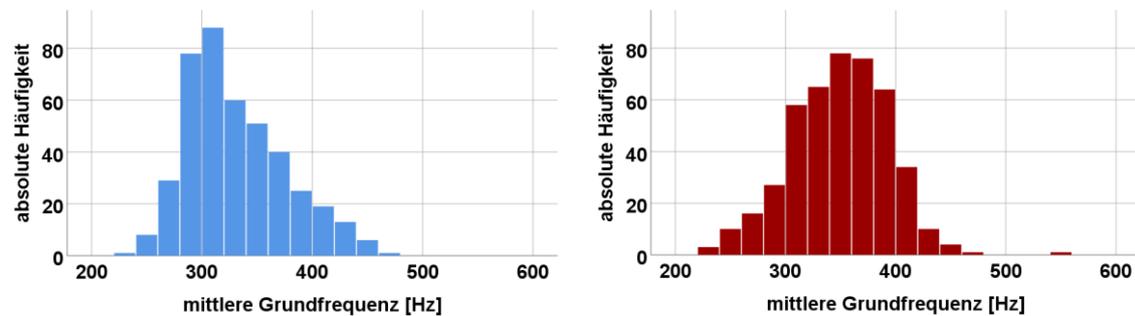
Mittlere f_0 [Hz]	KG-Gruppe (n = 419)	HI-Gruppe (n = 447)
Mittelwert	330,5	349,1
Median	320,0	352,0
Std.-Abweichung	44,7	44,1
Minimum	239,0	233,0
Maximum	462,0	542,0
Schiefe	0,67	-0,03
Kurtosis	-0,10	0,36

Anhand der Tabelle 16 lassen sich für die HI-Gruppe höhere Werte im Vergleich zur Kontrollgruppe ablesen. Nachfolgende Abbildung 16 zeigt, dass sich die

¹⁶ Durch die Berücksichtigung des Versorgungsstatus mit HH mussten die Laute von einem Probanden für die statistische Analyse der Grundfrequenz ausgelassen werden (Kapitel 4.3). Somit ergibt sich in Tabelle 13 bei der HI-Gruppe ein höherer Wert der Summe aus 1B und KL (361 + 114 = 475), als in die Analyse der melodischen Kenngrößen tatsächlich eingingen (447).

¹⁷ Die Begrifflichkeiten „versorgt“ sowie „mit Hörhilfe“ (mit HH) und „unversorgt“ sowie „ohne Hörhilfe“ (ohne HH) werden äquivalent verwendet.

Verteilungsmuster der beiden Gruppen unterscheiden. Die Binbreite beträgt bei beiden Abbildungen BI = 20 Hz.



a) Kontrollgruppe

b) HI-Gruppe

Abbildung 16: Histogramm zur Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Vokanten

Das Histogramm der Kontrollgruppe weist tendenziell ein rechtsschiefes Verteilungsmuster im Verhältnis zur eher linksschiefen Verteilung der Grundfrequenzwerte in der HI-Gruppe auf. Im nächsten Schritt wird eine differenzierte Betrachtung vorgenommen, um einen Erklärungsansatz für die unterschiedlichen Verteilungen zu erarbeiten.

Da in den Histogrammen mögliche Alterseffekte nicht berücksichtigt sind, sollen nachfolgende Streudiagramme (Abbildung 17 und Abbildung 18) eine Übersicht über potenzielle Alterseinflüsse auf die mittlere Grundfrequenz liefern. Die HI-Gruppe wird hierbei, durch unterschiedliche Symbole, in Aufnahmen mit und ohne Hörhilfe gekennzeichnet.

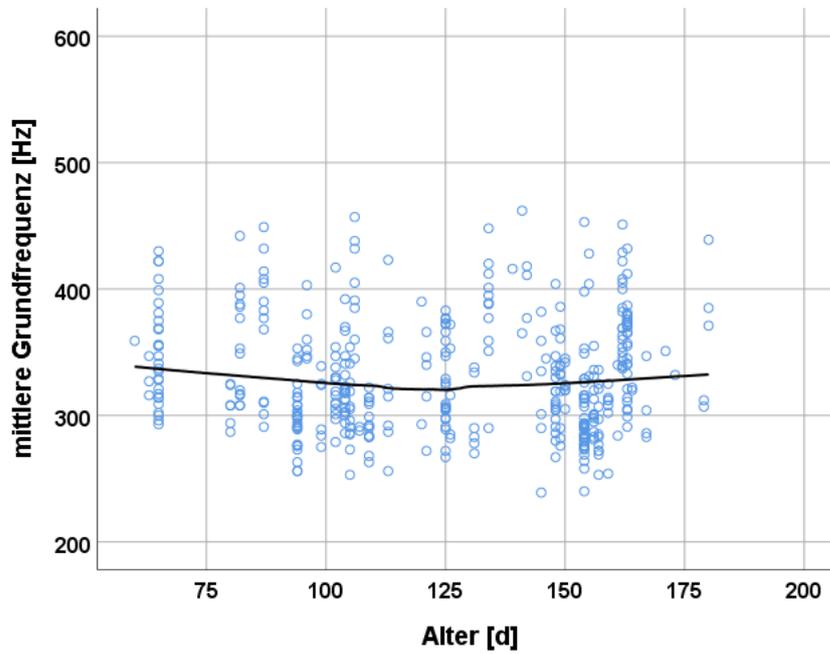


Abbildung 17: Streudiagramm über die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Vokanten in der Kontrollgruppe

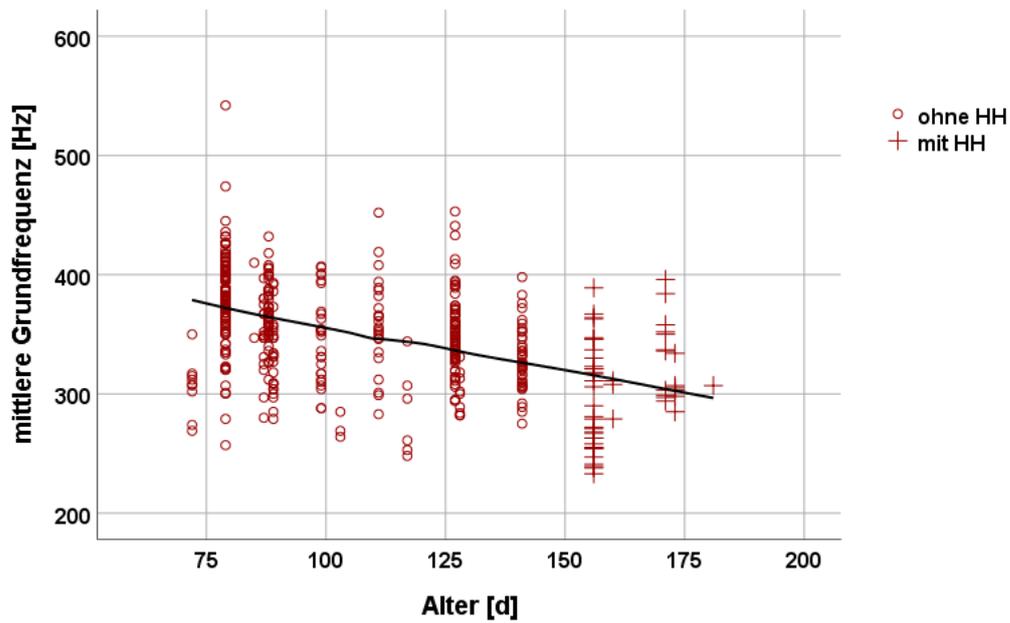


Abbildung 18: Streudiagramm über die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Vokanten in der HI-Gruppe

Legt man zur besseren Visualisierung möglicher Entwicklungseffekte eine Loess-Anpassungslinie durch das Streu-Punktdiagramm der Kontrollgruppe, zeigt sich ein nahezu horizontaler Verlauf der mittleren Grundfrequenz bei circa 330 Hz über den gesamten untersuchten Altersbereich. Im Gegensatz dazu zeigt die Loess-Linie im Streudiagramm der HI-Gruppe eine deutlich abfallende Tendenz der mittleren Grundfrequenz über den gesamten Altersabschnitt. Die Loess-Kurve beginnt bei vergleichsweise hohen Frequenzwerten von circa 380 Hz, fällt aber bis zum Alter von 180 Tagen auf rund 300 Hz ab.

Um einen möglichen Effekt der Versorgungskonditionen (versorgt/unversorgt) in die Analyse einzubeziehen wurde zusätzlich ein Streudiagramm mit den Aufnahmen von Proband H7 generiert. Von diesem lagen bereits ab dem 90. Tag Daten mit einer Versorgung durch Hörhilfe vor.

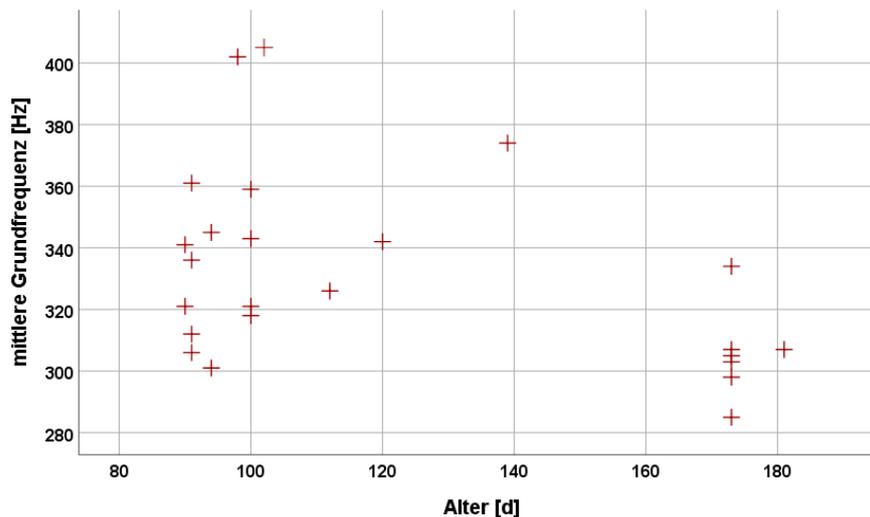


Abbildung 19: Streudiagramm über die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der Aufnahmen mit aktivierter Hörhilfe des Probanden H7

Auch hier zeigt sich eine fallende Tendenz der mittleren Grundfrequenzwerte.

Zusätzlich zum oben dargestellten Vergleich der mittleren Grundfrequenz der beiden Gruppen über den untersuchten Altersbereich wurden anhand von Boxplots jeweils die „versorgte“ und „unversorgte“ HI-Gruppe mit der altersentsprechenden Kontrollgruppe betrachtet. Hierzu wurde jeweils über die Vokanten innerhalb der definierten Altersbereiche (23-Wochen-Trennung) gemittelt.

Tabelle 17: Deskriptive Statistik der mittleren Grundfrequenz innerhalb der beiden Gruppen HI und KG vor der 23. Woche ($\leq 154d$), die HI-Gruppe ist hier unversorgt und nach der 23. Woche ($> 154d$), die HI-Gruppe ist hier versorgt

mittlere Grundfrequenz [Hz]		KG-Gruppe		HI-Gruppe	
		≤ 23 Wochen (n = 323)	> 23 Wochen (n = 96)	≤ 23 Wochen (n = 391)	> 23 Wochen (n = 56)
Mittelwert		328,2	338,3	355,5	305,0
% Änderung			3,1%		-14,2%
Median		318,0	336,0	357,0	305,5
% Änderung			5,7%		-14,4%
Std.-Abweichung		44,6	44,6	40,7	41,7
Minimum		239,0	253,0	248,0	233,0
Maximum		462,0	451,0	542,0	396,0
Perzentile	25	293,0	304,0	327,0	268,8
	75	354,0	370,5	383,0	336,8

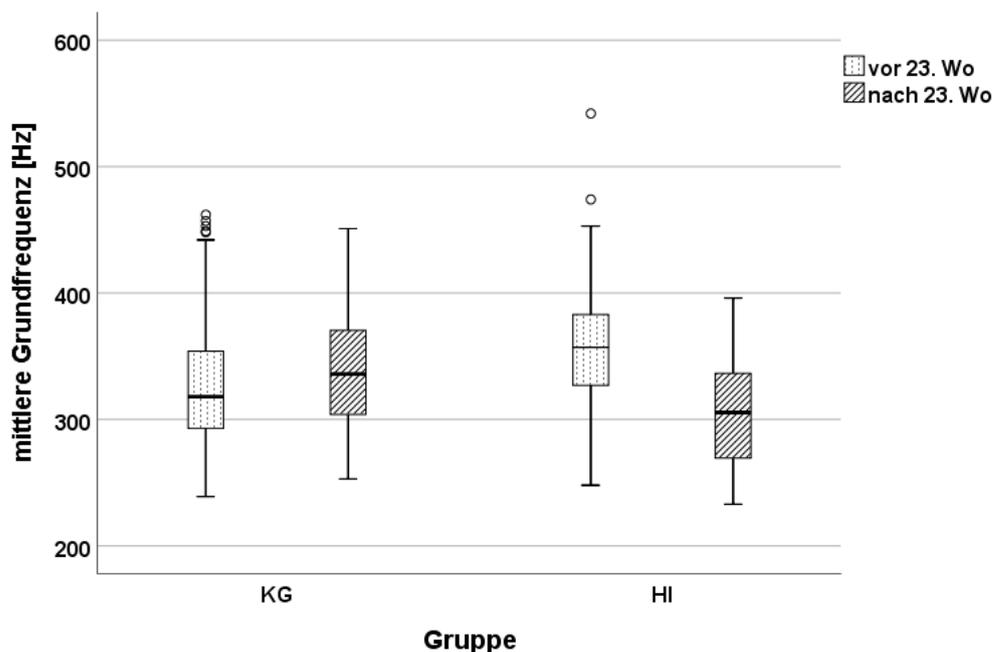


Abbildung 20: Boxplots zur Verteilung der mittleren Grundfrequenzwerte in den Gruppen HI und KG vor der 23. Woche ($\leq 154d$), die HI-Gruppe ist hier unversorgt sowie nach der 23. Woche ($> 154d$), die HI-Gruppe ist hier versorgt

Die Analyse der unversorgten HI-Probanden, die den Altersbereich vor der 23. Woche betrifft, zeigt eine höhere mittlere Grundfrequenz im Vergleich zur Kontrollgruppe

(Tabelle 17). Die mittlere Grundfrequenz liegt bei der HI-Gruppe im Median bei 357 Hz, bei der Kontrollgruppe im Median bei 318 Hz.

Die Analyse der versorgten HI-Probanden im Altersbereich nach 154 Tagen zeigt eine mittlere Grundfrequenz bei 305,5 Hz, welche unterhalb der mittleren Grundfrequenz der Kontrollgruppe liegt (Tabelle 17). In der Kontrollgruppe erhöht sich der Median geringfügig innerhalb der Gruppe, wohingegen der Median der HI-Gruppe insgesamt einen deutlichen Abfall verzeichnet. Zusammenfassend spiegelt Abbildung 20 die bereits in den Streudiagrammen zu erkennende Tendenz des Alterseinflusses auf die Werte der mittleren Grundfrequenz wider.

5.2.2 Standardabweichung, Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz

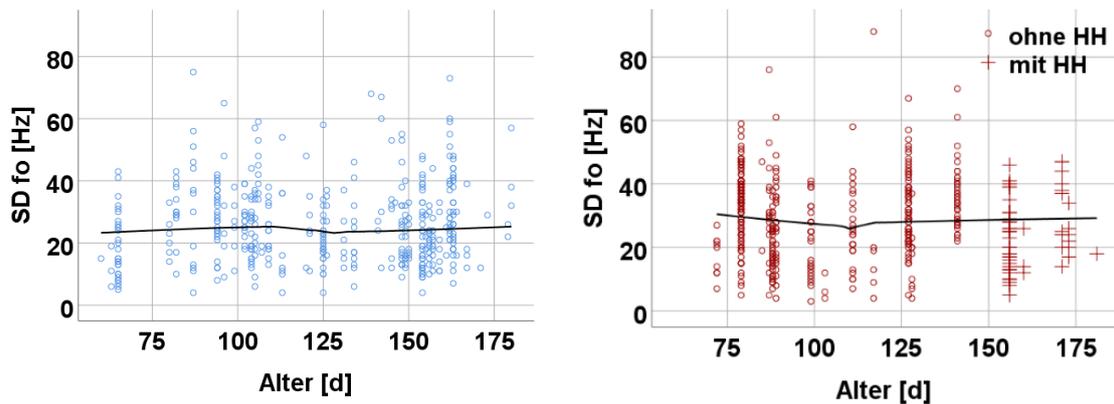
Die Standardabweichung der Grundfrequenz über die Melodie der Einzellaute wird im Folgenden genauer betrachtet. Um einen möglichen Alterseffekt in die Analyse miteinzubeziehen, wurden ebenfalls Streudiagramme generiert.

Tabelle 18: Deskriptive Statistik der Standardabweichung der Grundfrequenzwerte der Vokanten

SD fo [Hz]	KG-Gruppe (n = 419)	HI-Gruppe (n = 447)
Mittelwert	25,8	28,6
Median	24,0	28,0
Std.-Abweichung	12,8	12,9
Minimum	4,0	3,0
Maximum	75,0	88,0
Kurtosis	0,92	0,68
Schiefe	0,91	0,44

Bei Betrachtung des gesamten Altersabschnitts liegt die Standardabweichung der Vokanten der HI-Gruppe geringfügig über dem Wert der Kontrollgruppe.

Abbildung 21 zeigt die Standardabweichung der Grundfrequenz unter Berücksichtigung des Alterseinflusses in beiden Probandengruppen. Die Loess-Anpassungslinie verläuft bei beiden Gruppen annähernd horizontal, was auf eine gleichbleibende Variabilität der mittleren Grundfrequenz innerhalb der jeweiligen Gruppe hindeutet.



a) Kontrollgruppe

b) HI-Gruppe

Abbildung 21: Streudiagramme zur Standardabweichung der Grundfrequenz über den untersuchten Altersbereich

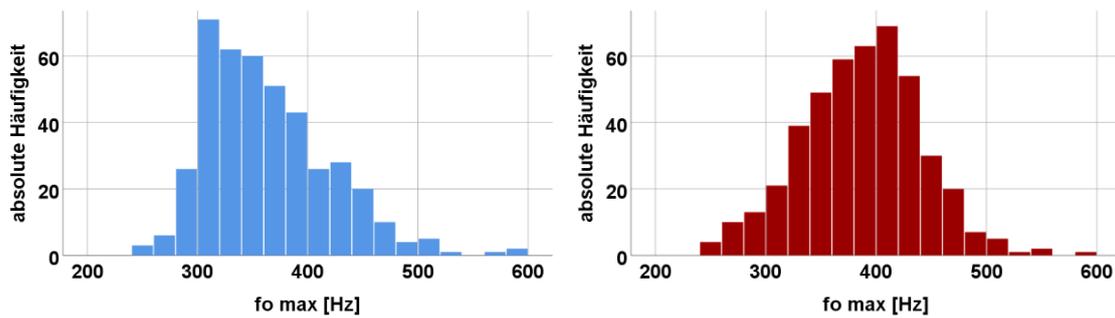
Die Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz werden in nachfolgenden Grafiken analysiert. Zunächst werden die Histogramme sowie die zugehörige deskriptive Statistik für die Maxima aufgezeigt. Tabelle 19 gibt einen Überblick über die Lage der Maxima in den beiden Gruppen.

Tabelle 19: Deskriptive Statistik der Maximalwerte der Vokanten

fo max [Hz]	KG-Gruppe (n = 419)	HI-Gruppe (n = 447)
Mittelwert	363,4	386,5
Median	353,0	387,0
Std.-Abweichung	56,3	54,7
Minimum	254,0	249,0
Maximum	590,0	588,0
Schiefe	0,89	0,08
Kurtosis	0,97	0,28

Im Median zeigten sich für die HI-Gruppe höhere Maxima der Grundfrequenz, während die Maximal- und Minimalwerte von f_0 max in beiden Gruppen kaum differieren.

Die Binbreite in Abbildung 22 beträgt $BI = 20$ Hz. Auch hier ergibt sich ein differentes Verteilungsmuster zwischen den beiden Gruppen HI und KG.



a) Kontrollgruppe

b) HI-Gruppe

Abbildung 22: Histogramme zur Verteilung der Maximalwerte der Vokanten in beiden Gruppen a) KG und b) HI

Tabelle 20 stellt die Maximalwerte mit Berücksichtigung der 23-Wochen-Trennung des analysierten Altersbereichs dar.

Tabelle 20: Deskriptive Statistik der Maximalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten der Kontrollgruppe und der HI-Gruppe mit 23-Wochen-Trennung

fo max [Hz]	KG-Gruppe		HI-Gruppe	
	<= 23 Wochen (n = 323)	> 23 Wochen (n = 96)	<= 23 Wochen (n = 391)	> 23 Wochen (n = 56)
Mittelwert	360,8	372,0	393,6	336,7
% Änderung		3,1%		-14,4%
Median	349,0	365,5	395,0	332,5
% Änderung		4,7%		-15,8%
Std.-Abweichung	56,8	54,1	51,2	52,6
Minimum	254,0	274,0	255,0	249,0
Maximum	590,0	505,0	588,0	512,0
Perzentile	25	318,0	325,3	302,5
	75	391,0	413,6	427,0

Auch für die Minimalwerte wurde zunächst die deskriptive Statistik über die gesamten Vokanten berechnet, anschließend erfolgte die Trennung in die zwei definierten Altersbereiche vor und nach der 23. Woche. Tabelle 21 stellt die Minimalwerte für beide Probandengruppen dar.

Tabelle 21: Deskriptive Statistik der Minimalwerte aller Vokanten

fo min [Hz]	KG-Gruppe (n = 419)	HI-Gruppe (n = 447)
Mittelwert	266,1	276,9
Median	265,0	272,0
Std.-Abweichung	47,5	48,2
Minimum	150,0	168,0
Maximum	428,0	441,0
Schiefe	0,14	0,43
Kurtosis	0,50	-0,27

In Abbildung 23 ist die Verteilung der Minimalwerte für die Gruppen dargestellt. Die Binbreite in beiden Histogrammen beträgt $BI = 15$ Hz.

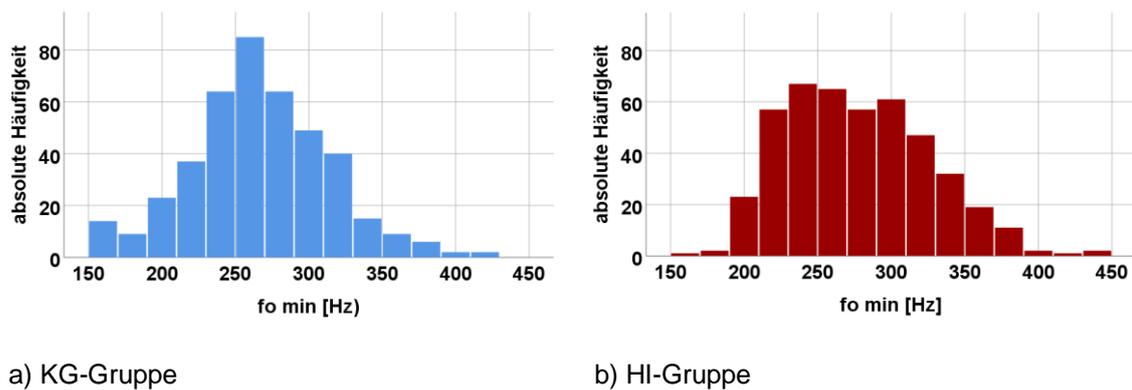


Abbildung 23: Histogramme zur Verteilung der Minimalwerte in den beiden untersuchten Gruppen

Auch hier wurden zudem separat die beiden definierten Altersbereiche vor und nach der 23. Woche betrachtet.

Tabelle 22: Deskriptive Statistik der Minimalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten der Kontrollgruppe und der HI-Gruppe mit 23-Wochen-Trennung

fo min [Hz]	KG-Gruppe		HI-Gruppe	
	<= 23 Wochen (n = 323)	> 23 Wochen (n = 96)	<= 23 Wochen (n = 391)	> 23 Wochen (n = 56)
Mittelwert	265,0	269,9	281,8	243,4
% Änderung		1,8%		-13,6%
Median	261,0	270,0	281,0	239,0
% Änderung		3,4%		-14,9%
Std.-Abweichung	48,4	44,3	47,9	35,2
Minimum	150,0	154,0	188,0	168,0
Maximum	428,0	381,0	441,0	368,0
Perzentile	25	235,0	249,8	244,0
	75	296,0	296,8	315,0

In Abbildung 24 finden sich die zugehörigen Streudiagramme zu den Maximal- und Minimalwerten. Sowohl der Verlauf der Maxima als auch der Verlauf der Minima der Grundfrequenz spiegeln den bereits analysierten Verlauf der mittleren Grundfrequenz über den untersuchten Altersbereich wider.

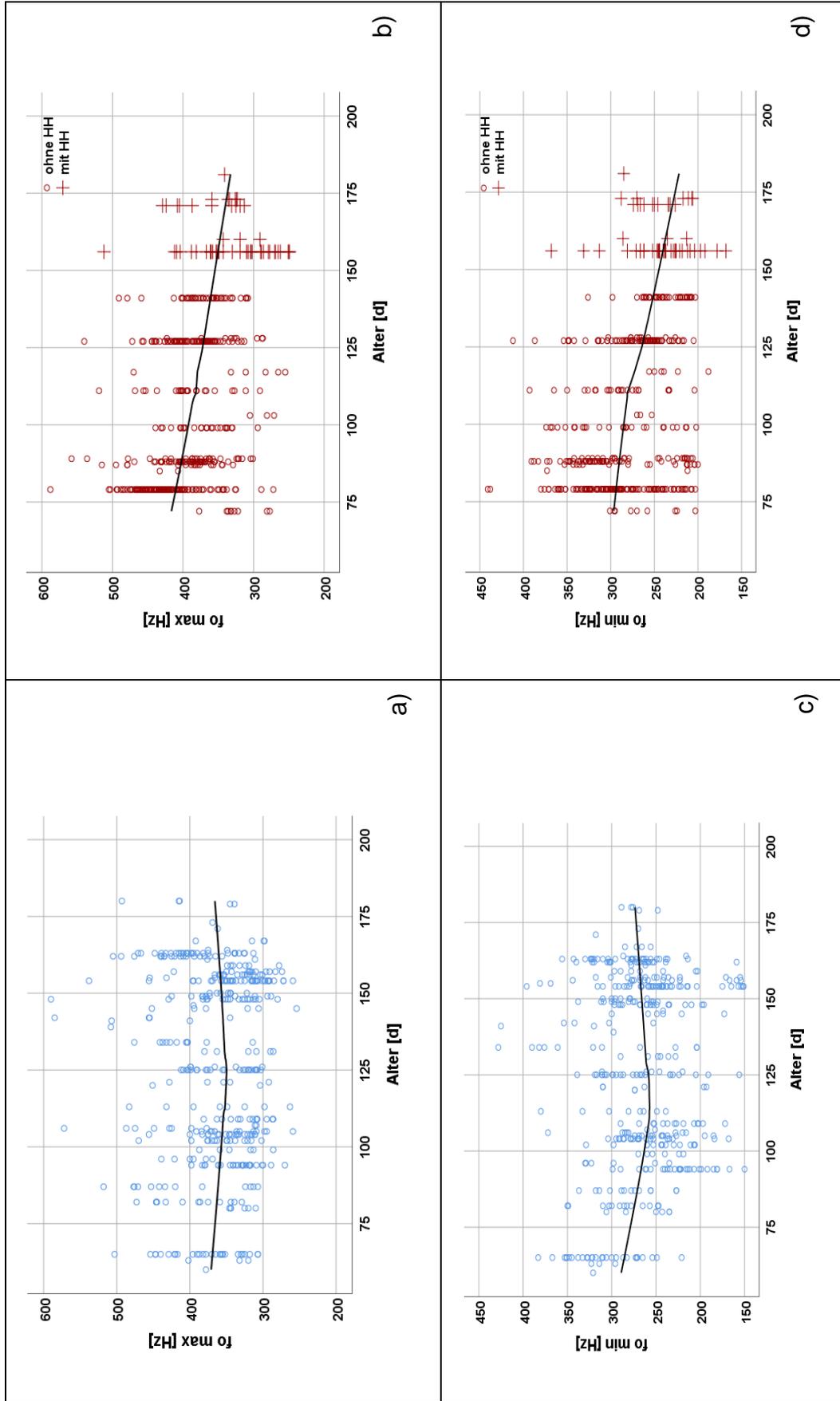


Abbildung 24: Streudiagramme für die Grundfrequenzmaximal- und Minimalwerte

a) stellt die Maxima der Grundfrequenz der Kontrollgruppe und b) die Maxima der HI-Gruppe unter Berücksichtigung der Versorgung mit HH dar. Die Minima der Grundfrequenz werden in c) für die Kontrollgruppe, in Abbildung d) für die HI-Gruppe dargestellt.

5.2.3 Grundfrequenzhub (FM-Amplitude)

Zur Analyse des absoluten Hubs der Grundfrequenzkontur wurde jeweils, wie bereits in Kapitel 4.7 erläutert, die reine Bogenform ohne zusätzliche An- oder Endwelle betrachtet. Die Ergebnisse der Verteilung des absoluten Hubs aller einbögigen Vokanten und Kurzlaute der Kontroll- und HI-Gruppe werden in Abbildung 25 dargestellt. Tabelle 23 zeigt die zugehörigen Werte der Verteilung des absoluten Hubs innerhalb der beiden Gruppen über den gesamten untersuchten Altersbereich. Ein möglicher Alterseffekt sowie die Versorgung mit Hörhilfe fand hier noch keine Berücksichtigung.

Tabelle 23: Deskriptive Statistik des absoluten Hubs der Vokanten in Kontroll- und HI-Gruppe über den gesamten Untersuchungszeitraum

absoluter Hub [Hz]	KG-Gruppe (n = 419)	HI-Gruppe (n = 447)
Mittelwert	97,3	109,5
Median	89,0	110,0
Std.-Abweichung	51,4	53,0
Minimum	9,0	5,0
Maximum	301,0	312,0
Schiefe	0,78	0,46
Kurtosis	0,48	0,23

Der Median der HI-Gruppe zeigt mit 110 Hz deutlich höhere Werte im Vergleich zum absoluten Hub der Kontrollgruppe (89 Hz).

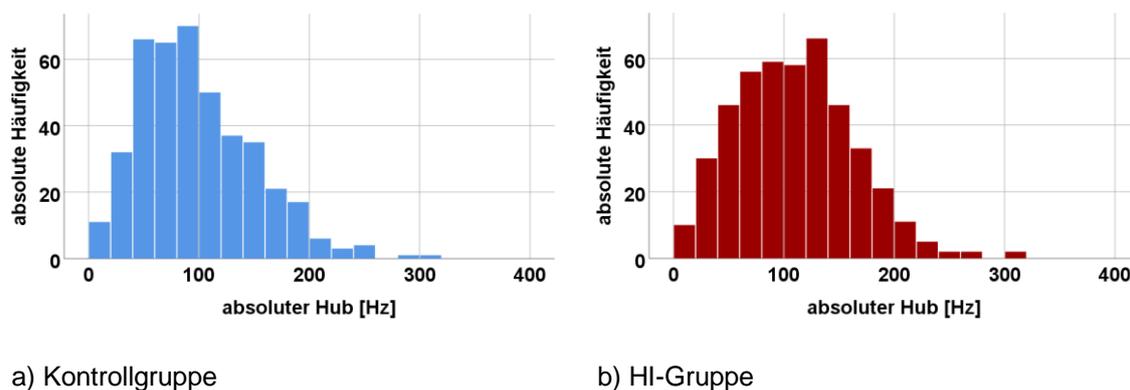


Abbildung 25: Verteilung des absoluten Hubs innerhalb der Gruppen a) und b)

Um einen möglichen Alterseffekt besser berücksichtigen zu können wurden nachfolgend die Streudiagramme für die beiden Gruppen dargestellt. Hier zeigt sich in Abbildung 26 tendenziell eine Steigung der Loess-Linie der Kontrollgruppe im Altersbereich < 90 d, wohingegen die der HI-Gruppe (Abbildung 27) hier zunächst eine fallende Tendenz aufweist.

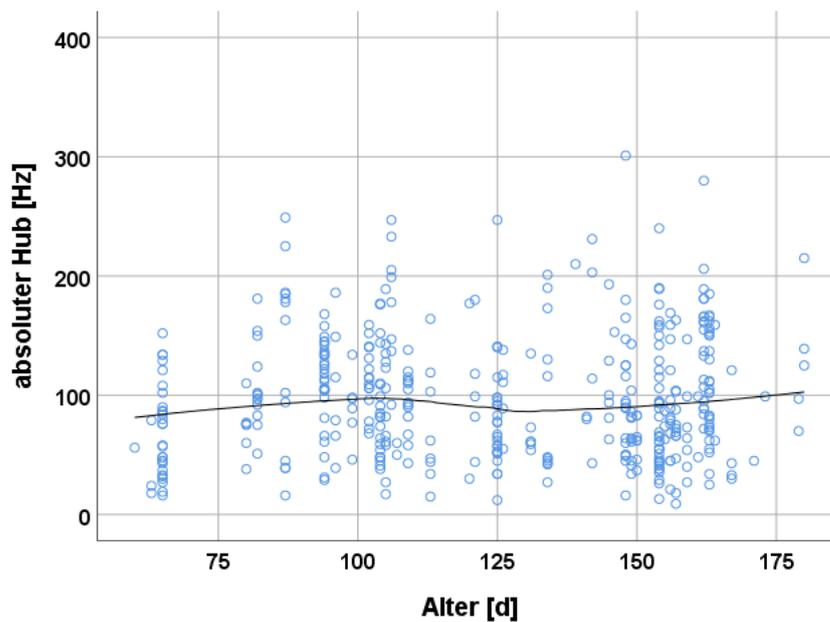


Abbildung 26: Streudiagramm über den absoluten Hub der Vokanten der Kontrollgruppe im untersuchten Altersbereich

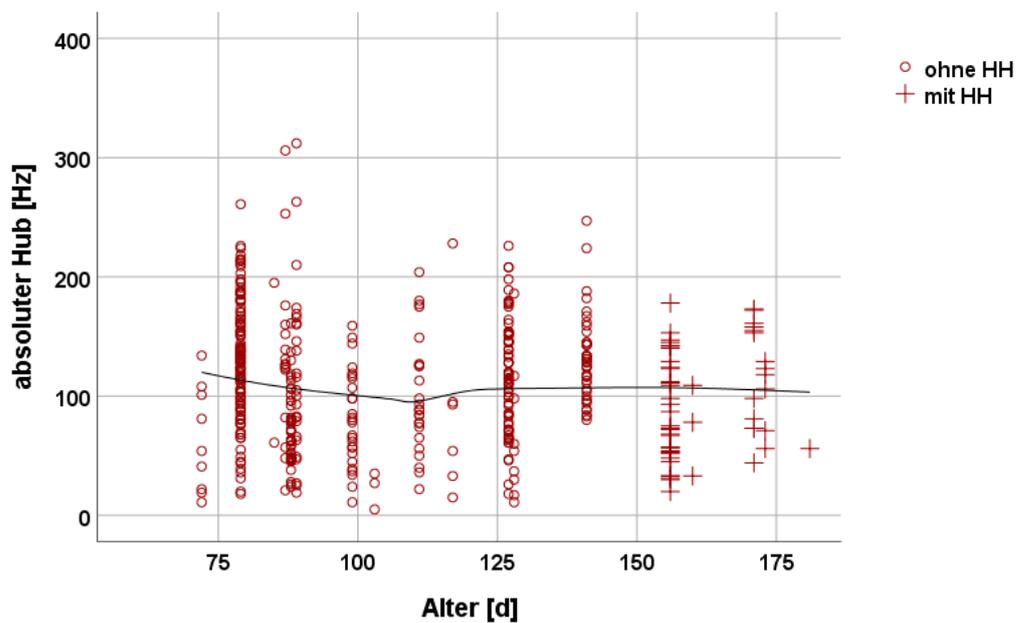


Abbildung 27: Streudiagramm über den absoluten Hub der Vokanten der HI-Gruppe im gesamten untersuchten Altersbereich

In Tabelle 24 wird der absolute Hub unter Berücksichtigung der Altersbereiche vor bzw. nach der 23. Woche dargestellt.

Tabelle 24: Deskriptive Statistik des absoluten Hubs in KG und HI-Gruppe unter Berücksichtigung der Trennung in die zwei definierten Altersbereiche

absoluter Hub [Hz]		KG-Gruppe		HI-Gruppe		
		<= 23 Wochen (n = 323)	> 23 Wochen (n = 96)	<= 23 Wochen (n = 391)	> 23 Wochen (n = 56)	
Mittelwert		95,9	102,2	111,9	93,4	
% Änderung			6,5%		-16,5%	
Median		89,0	92,0	113,0	84,0	
% Änderung			3,4%		-25,7%	
Std.-Abweichung		51,5	51,4	53,8	44,2	
Minimum		12,0	9,0	5,0	20,0	
Maximum		301,0	280,0	312,0	178,0	
Perzentile		25	55,0	66,5	71,0	56,0
		75	128,0	147,0	145,0	129,0

Zur besseren Veranschaulichung der Verteilungseigenschaften in den beiden Altersbereichen wurde in Abbildung 28 ein Boxplotdiagramm aufgezeigt.

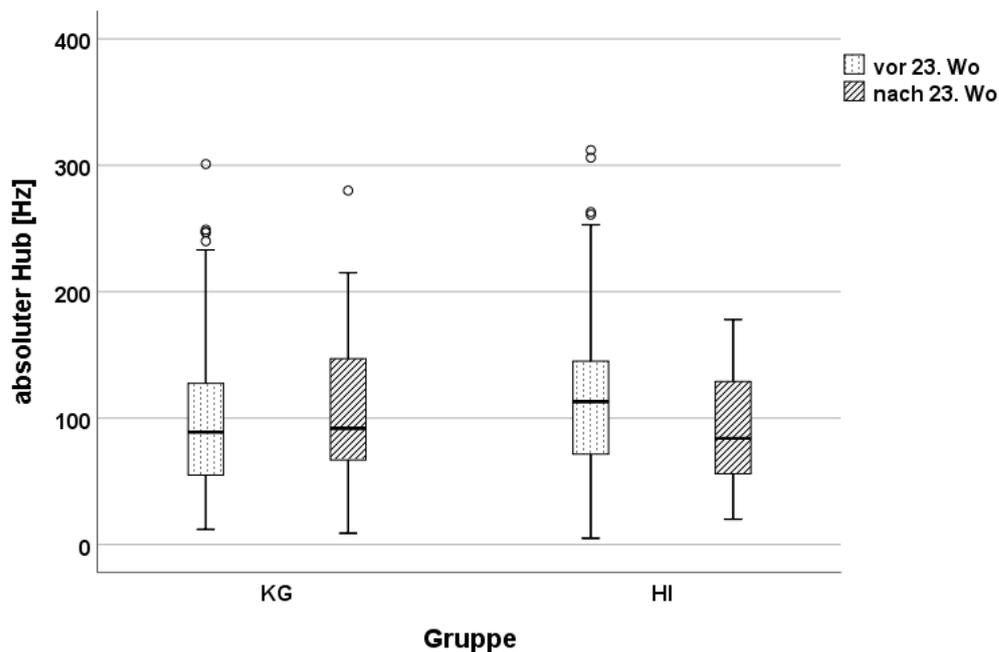


Abbildung 28: Verteilung der Werte des absoluten Hubs unter Berücksichtigung der 23-Wochen-Trennung

Der absolute Hub bleibt in der Kontrollgruppe tendenziell gleich beziehungsweise steigt geringfügig an, wohingegen der Grundfrequenzhub der hörbehinderten Probandengruppe sinkt (-25,7%).

5.3 Betrachtung ausgewählter Messgrößen auf Kindebene

5.3.1 Mittlere Grundfrequenz

Betrachtet man die mittlere Grundfrequenz der einfachen Vokanten (1B/KL) auf Kindebene findet sich über den gesamten untersuchten Altersbereich auch hier im Median eine geringfügig höhere Grundfrequenz für die HI-Gruppe. Die mittlere Grundfrequenz zeigt nach Shapiro-Wilk in der Kontrollgruppe keine Normalverteilung, wohingegen die hörbehinderte Gruppe diese aufweist (KG: $p = 0,049$, HI: $p = 0,451$). Es wurde deshalb nachfolgend mit dem nicht parametrischen Test, Mann-Whitney-U-Test, die Signifikanz der Ungleichheit zwischen den beiden Gruppen ermittelt. Obwohl im Median ein Unterschied besteht und zudem im Boxplot in Abbildung 29 eine vergleichsweise tiefere mittlere Grundfrequenz der Kontrollgruppe zu erkennen ist, gab es keine statistisch signifikanten Gruppenunterschiede (Mann-Whitney-U-Test: $p = 0,405$).

Tabelle 25: Mittlere Grundfrequenz auf Kindebene im Gruppenvergleich über den gesamten Altersbereich

mittlere fo [Hz]	KG-Gruppe (n = 18)	HI-Gruppe (n = 8)
Mittelwert	333,0	340,6
Median	325,1	346,9
Std.-Abweichung	38,6	37,2
Minimum	289,5	270,9
Maximum	423,0	384,6
Kurtosis	0,40	0,54
Schiefe	1,05	-0,98

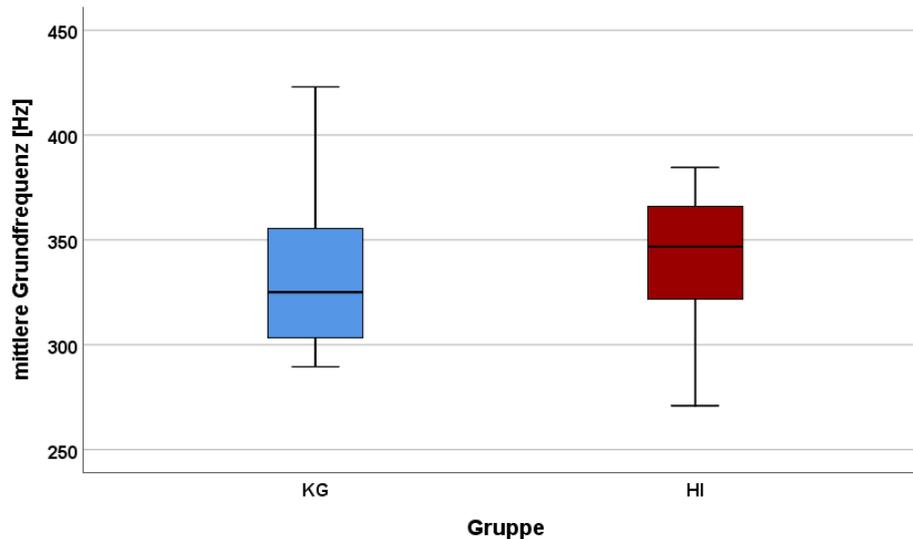


Abbildung 29: Boxplot der Grundfrequenz auf Kindebene im Gruppenvergleich (gesamter Altersbereich)

Auch auf Kindebene wurden die zwei definierten Altersbereiche vor und nach der 23. Woche analysiert, um mögliche Alters- und Versorgungseffekte zu berücksichtigen. Abbildung 30 zeigt die nach Altersbereichen gruppierten Boxplots für die beiden Gruppen KG und HI.

Die mittlere Grundfrequenz liegt vor 23 Wochen bei der Kontrollgruppe im Median bei 325 Hz, wohingegen die der HI-Gruppe 352 Hz beträgt. Somit zeigt sich sowohl auf Laut- als auch auf Kindebene eine höhere mittlere Grundfrequenz der HI-Gruppe für den Bereich vor 23 Wochen. Bei Betrachtung auf Kindebene sinkt jedoch nach 23 Wochen sowohl der Median der mittleren Grundfrequenz der Kontrollgruppe als auch derjenige der HI-Gruppe deutlich ab (KG = 304,5 Hz; HI = 320,2 Hz). Dennoch verzeichnet auch hier die HI-Gruppe einen ausgeprägteren fallenden Verlauf der mittleren Grundfrequenz.

Im Altersbereich vor 23 Wochen weist die Kontrollgruppe nach Shapiro-Wilk ebenfalls keine Normalverteilung auf (KG: $p = 0,044$). Die HI-Gruppe ist in diesem Altersbereich normalverteilt (HI: $p = 0,389$). Obwohl ein Unterschied vor der 23. Woche zwischen den beiden untersuchten Gruppen zu erkennen ist, zeigt die Grundfrequenz hier keine signifikanten Unterschiede (Mann-Whitney-U-Test: $p = 0,345$). Im Altersbereich nach 23 Wochen liegt nach Shapiro-Wilk in der Kontrollgruppe ebenfalls keine Normalverteilung vor, während die HI-Gruppe normalverteilt ist. (KG: $p = 0,029$; HI: $p = 0,454$). Der nicht parametrische Test zeigt kein signifikantes Ergebnis (Mann-Whitney-U-Test: $p = 1,000$).

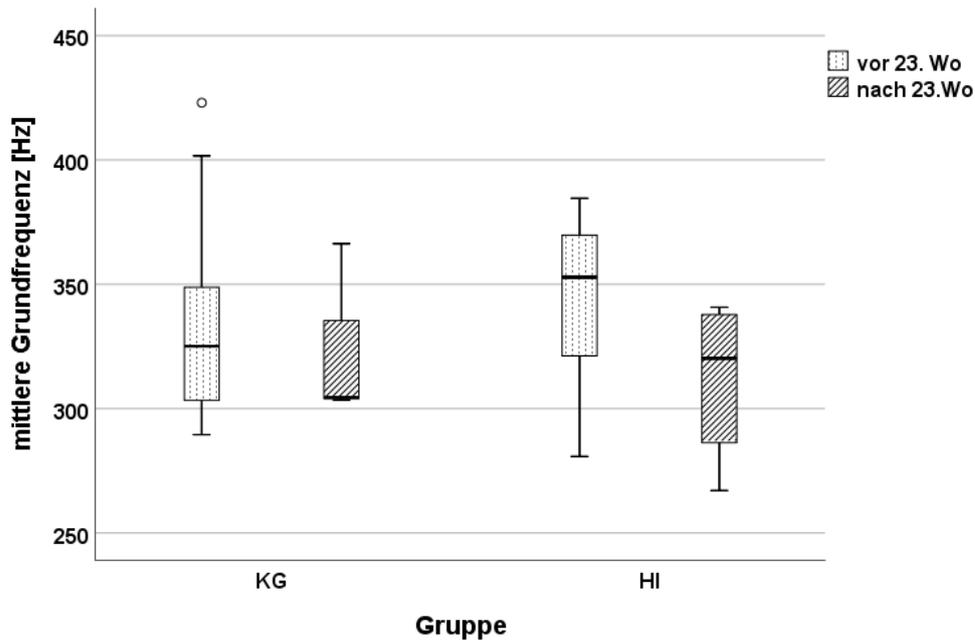


Abbildung 30: Gruppiertes Boxplot auf Kindebene über die Entwicklung innerhalb der Gruppen in den definierten Altersbereichen vor bzw. nach der 23. Woche

5.3.2 Grundfrequenzhub

Betrachtet man den absoluten Hub der Vokanten auf Kindebene, zeigt sich gemittelt über den gesamten untersuchten Altersbereich, ein ähnliches Bild wie bereits auf Signalleve. Wie sowohl anhand der Tabelle 26, als auch in Abbildung 31 zu erkennen ist, weisen auch hier die hörbehinderten Probanden im Median einen größeren Hub auf. Der absolute Hub zeigt nach Shapiro-Wilk sowohl in der Kontrollgruppe als auch in der HI-Gruppe eine Normalverteilung (KG: $p = 0,077$; HI: $p = 0,214$). Trotz optisch erkennbarer Differenz innerhalb der beiden Gruppen liegt kein statistisch signifikanter Unterschied vor (t-Test: $p = 0,273$).

Tabelle 26: Absoluter Hub der Vokanten auf Kindebene im Gruppenvergleich (über den gesamten Altersbereich)

absoluter Hub [Hz]	KG-Gruppe (n = 18)	HI-Gruppe (n = 8)
Mittelwert	82,5	97,4
Median	82,2	104,8
Std.-Abweichung	33,3	25,8
Minimum	30,0	65,6
Maximum	179,8	131,7
Kurtosis	3,45	-1,82
Schiefe	1,22	-0,23

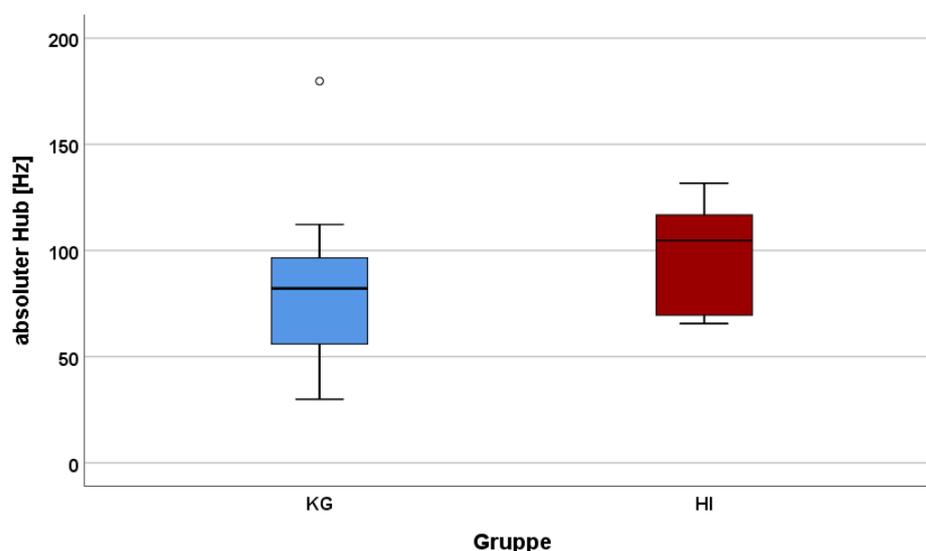


Abbildung 31: Boxplot über den absoluten Hub der Vokanten auf Kindebene im Gruppenvergleich (gesamter Altersbereich)

Auch hier wurden zudem die beiden Altersbereiche vor und nach der 23. Woche nochmals separat betrachtet. Dies ist in Abbildung 32 grafisch dargestellt.

Der absolute Hub der Kontrollgruppe liegt für den Bereich vor 23 Wochen im Median bei 82,2 Hz, wohingegen der Hub der HI-Gruppe mit 103,7 Hz deutlich höhere Werte aufweist. Im Bereich nach 23 Wochen bleibt der Hub der Kontrollgruppe weitestgehend konstant (81,3 Hz). Der Variationsbereich wird hingegen geringer, da in diesem Altersabschnitt kleine Hübe seltener auftreten. Der Median der HI-Gruppe sinkt nach 23 Wochen um 3,9% auf 99,6 Hz.

Im Altersbereich vor 23 Wochen liegt ebenfalls sowohl in der Kontrollgruppe als auch in der HI-Gruppe nach Shapiro-Wilk eine Normalverteilung vor (KG: $p = 0,072$, HI: $p =$

0,250). Wie in Abbildung 32 zu erkennen ist weist auch hier die HI-Gruppe im Median größere Hübe auf, dennoch zeigt der absolute Hub in diesem Altersbereich keine signifikanten Gruppenunterschiede (t-Test: $p = 0,296$). Auch im Altersbereich nach der 23. Woche sind beide Gruppen nach Shapiro-Wilk normalverteilt (KG: $p = 0,192$; HI: $p = 0,985$). Der t-Test zeigt jedoch kein signifikantes Ergebnis ($p = 0,738$).

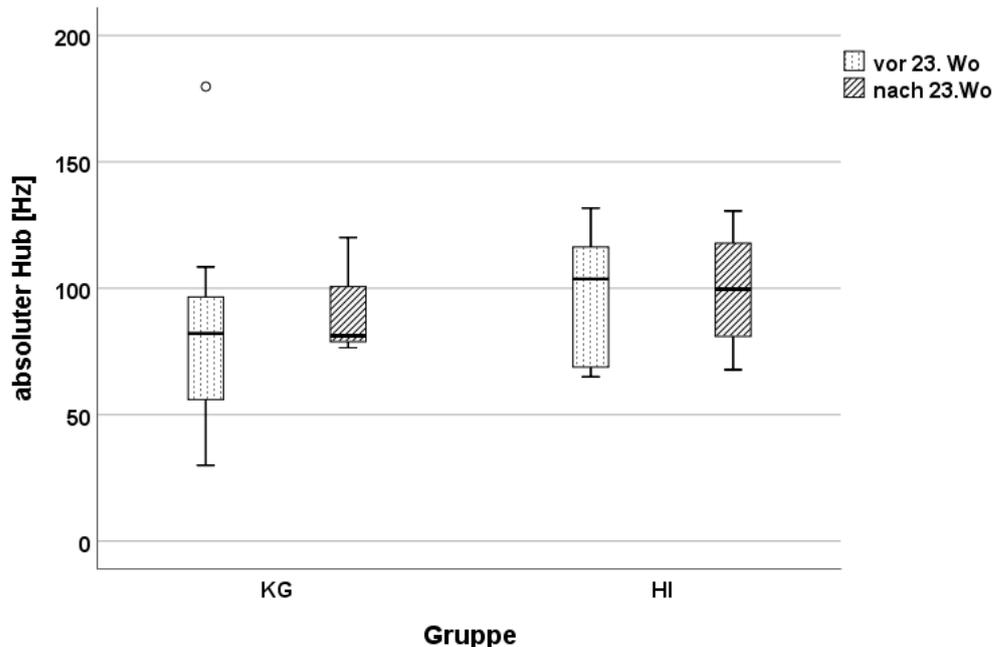


Abbildung 32: Gruppiertes Boxplot des absoluten Hubs auf Kindebene innerhalb der Gruppen in den definierten Altersbereichen vor bzw. nach der 23. Woche

5.4 Referenzmodellbasierte Analyse

Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, wurde die Kontrollgruppe aus der NH-Gruppe der Kohortenstudie und der Referenzgruppe eines Vorläuferprojekts (Frank, Dissertation in Vorbereitung) gebildet. Die Längsschnittdaten der Referenzgruppe mit drei gesunden, unauffälligen Probanden diente jedoch ursprünglich der Modellbildung eines gesunden Entwicklungsverlaufs.

Nachfolgend wird anhand dieses Referenzmodells die Entwicklung von Vokanten gesunder Säuglinge im Vergleich zu den hörbehinderten Probanden dargestellt. Des Weiteren wird somit der in Kapitel 4.6 untersuchte Zusammenhang der beiden Probandengruppen nochmals geprüft. In den Streu-/Punktdiagrammen wurde eine Selektion der Kontrollgruppe auf Vokanten der Probanden der gesunden Referenzgruppe aus dem

Archiv des ZVES vorgenommen ($n = 312$). Die HI-Gruppe blieb unverändert ($n = 447$). Auch hier wurden nur die einfachen Strukturklassen (1B und KL) der Vokanten für die Analyse verwendet.

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der mittleren Grundfrequenz über die Zeit in Referenz- und HI-Gruppe. Die mittlere Grundfrequenz der Referenzgruppe beträgt hier im Median 320 Hz, was dem Median der gesamten Kontrollgruppe entspricht. Die Loess-Kurve beschreibt auch hier einen schwach bogenförmigen, weitestgehend geraden Verlauf.

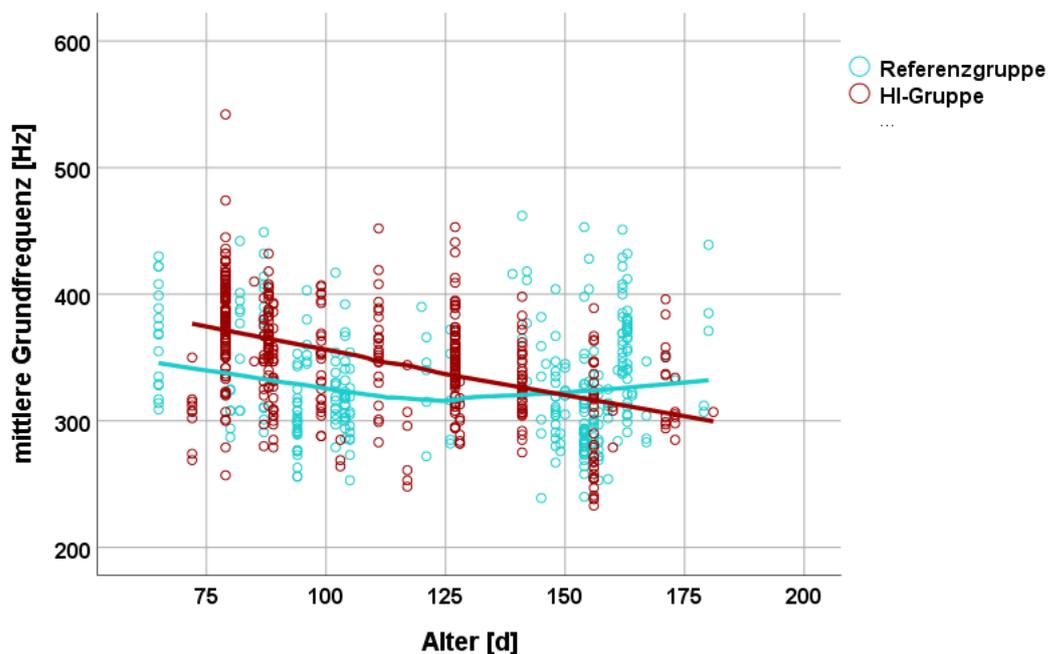


Abbildung 33: Streudiagramm der mittleren Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe

Die Standardabweichung der Grundfrequenz liegt mit 25 Hz im Median für die Referenzgruppe sogar noch etwas näher an der Standardabweichung der HI Gruppe (28 Hz) als die Kontrollgruppe (24 Hz). Insgesamt zeigt sich jedoch auch hier tendenziell eine gleichbleibende Variabilität der Grundfrequenz.

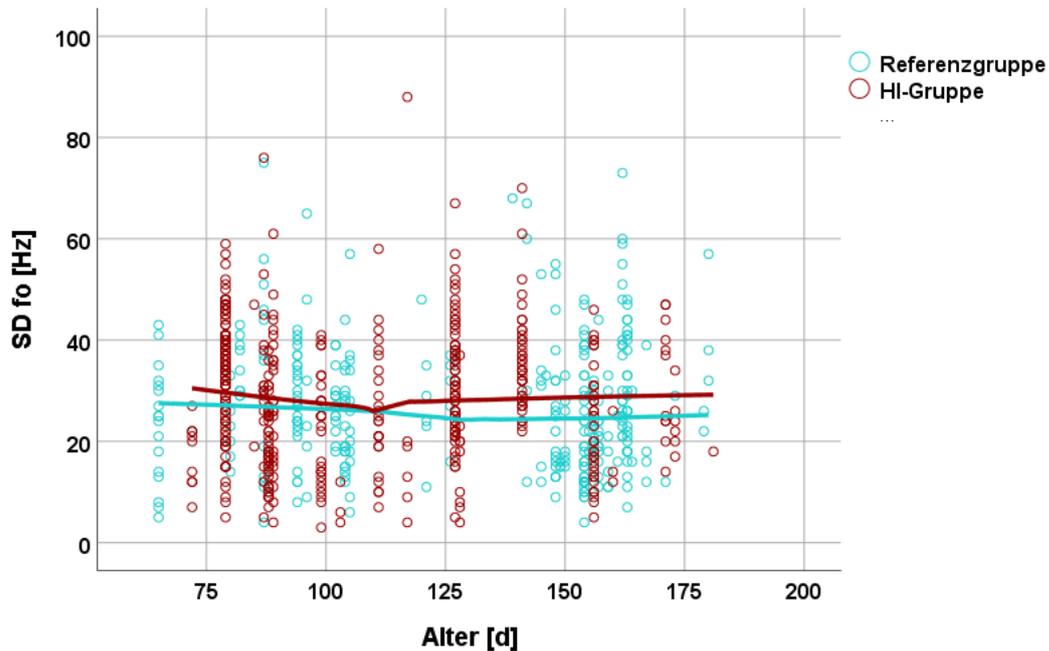


Abbildung 34: Streudiagramm der Standardabweichung der Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe

Sowohl das Streudiagramm für die Maxima der Grundfrequenz (Abbildung 35), als auch das für die Minima der Grundfrequenz (Abbildung 36), stellen annähernd das gleiche Ergebnis wie bei Betrachtung der gesamten Kontrollgruppe dar. Auch hier wurde zur besseren Visualisierung der Entwicklungstendenzen die Loess-Anpassungslinie generiert. Im Median weist die Referenzgruppe bei den Maximalwerten 351 Hz auf, für die Minima sind es im Median 261 Hz. Dies verdeutlicht sogar noch etwas stärker den Unterschied zur HI-Gruppe, deren Maxima bei 387 Hz und Minima bei 272 Hz liegt. Die Kontrollgruppe hatte hierzu im Vergleich im Median Maxima von 353 Hz, bei den Minima waren es 265 Hz.

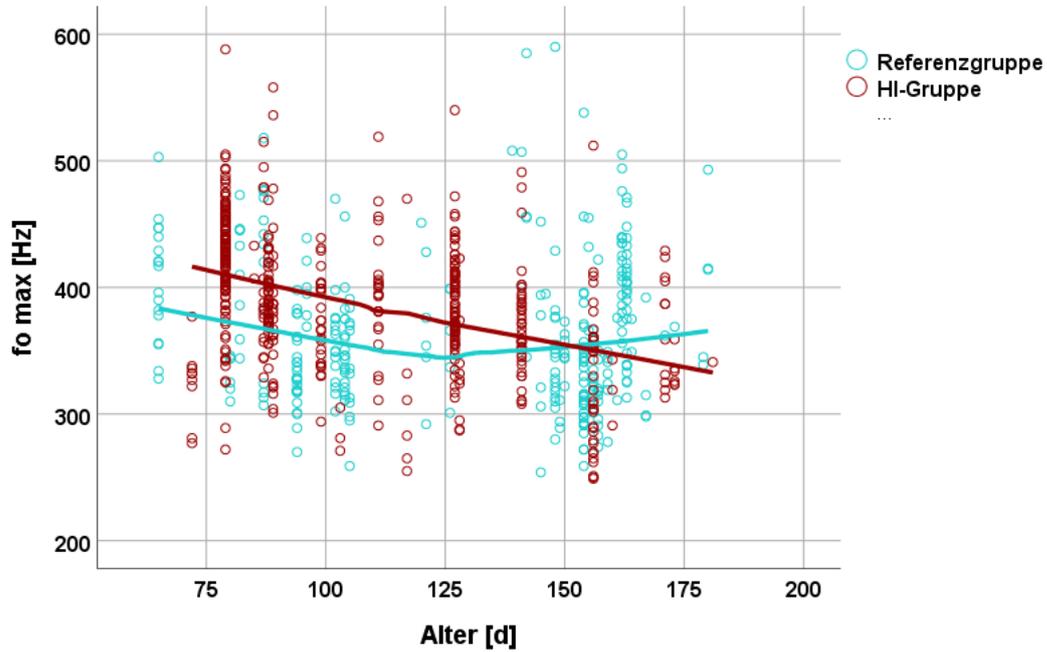


Abbildung 35: Streudiagramm der Maximalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe

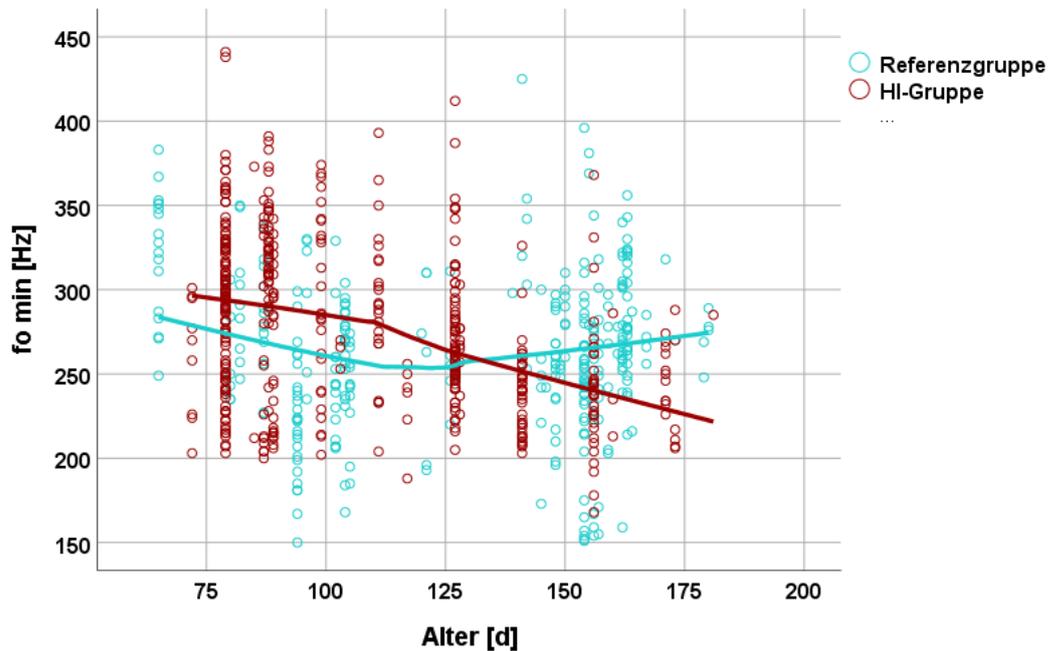


Abbildung 36: Streudiagramm der Minimalwerte der Grundfrequenz über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe

Der absolute Hub liegt mit 95 Hz im Median etwas näher an der HI-Gruppe (110 Hz) als die Kontrollgruppe (89 Hz). Maximum und Minimum des Hubs sind jedoch mit 9 Hz und 301 Hz bei Kontroll- und Referenzgruppe identisch. Die Loess-Linie der Referenzgruppe scheint im Verlauf tendenziell leicht nach unten abzufallen.

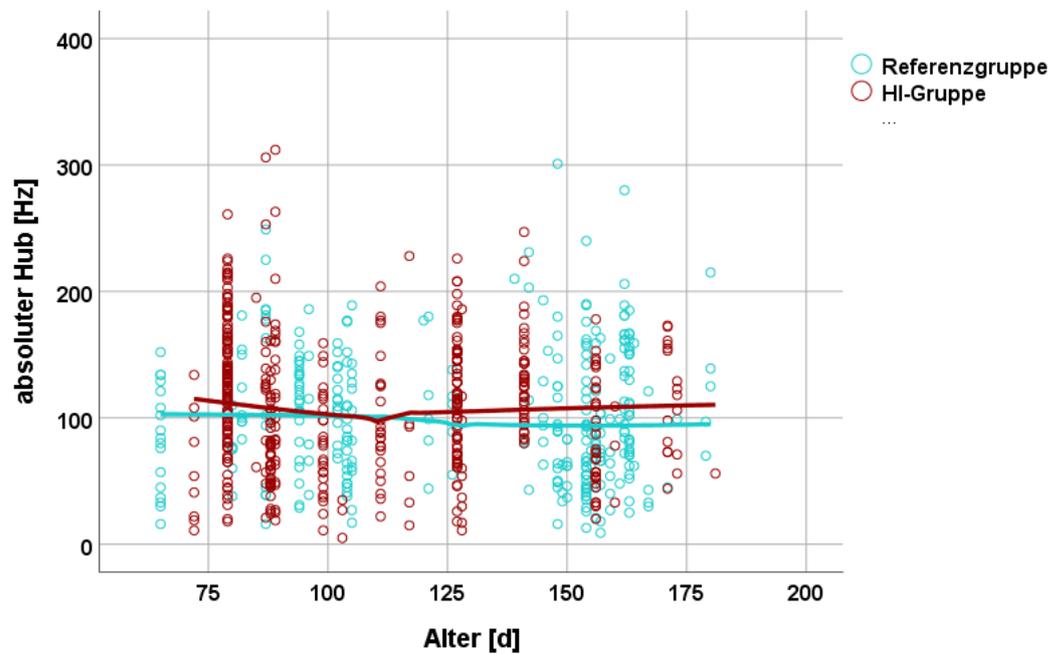


Abbildung 37: Streudiagramm des absoluten Hubs über die Vokanten in Referenzgruppe und HI-Gruppe

Zusammenfassend lässt sich anhand des Referenzmodells ein ähnlicher Entwicklungsverlauf wie bei Betrachtung der gesamten Kontrollgruppe ausmachen.

6 Diskussion

In der Literatur werden Abweichungen in der vorsprachlichen Entwicklung mit unterschiedlichen medizinischen und neurologischen Dysfunktionen in Zusammenhang gebracht (Berger & Cunningham, 1983; Buder et al., 2013; Grimm, 2012; Lind, Vuorenkoski, Rosberg, Partanen & Wasz-Höckert, 1970; Moura et al., 2008; Patten et al., 2014; Paul, Fuerst, Ramsay, Chawarska & Klin, 2011; Soltis, 2004). Insbesondere bei der Forschung an hochgradig hörbehinderten Säuglingen liegen jedoch zum Teil widersprüchliche Befunde vor. Während teilweise von nahezu keinen Differenzen bei gesunden und hörbehinderten Säuglingen in der vorsprachlichen Entwicklung berichtet wird (Scheiner et al., 2004), gehen andere Autoren von deutlichen Unterschieden in Qualität und Quantität des Lautrepertoires aus (Clement, 2004; Hapsburg & Davis, 2006; Iyer & Oller, 2008; Möller & Schönweiler, 1999; Wermke, Shehata-Dieler et al., 2013).

Nachdem bereits in der Schreimelodie von Neugeborenen Elemente der Prosodie der Muttersprache zu erkennen sind, stellt sich die Frage, ob eine hochgradige Hörbehinderung nicht frühzeitig zu Auffälligkeiten in der Lautproduktion führen müsste (DeCasper & Fifer, 1980; Mampe et al., 2009; Prochnow, 2013; Wermke, Pachtner et al., 2013; Wermke et al., 2016). Mit dieser Fragestellung hat sich auch vorliegende Arbeit befasst. Dafür wurden sowohl die Melodiestructur als auch melodische Messgrößen analysiert. Die deskriptive Auswertung bezieht sich in der statistischen Analyse nur auf die in vorliegender Arbeit definierte Vokalisationsart der Vokanten, bei welcher es sich um die früheste und häufigste Art der Komfortvokalisation handelt (siehe Kapitel 4.5.3.2). Die Spezialisierung auf diese einfache und robuste Vokalisationsart wurde vorgenommen, um im Rahmen des übergeordneten Gesamtprojekts eine erste hypothesengenerierende Untersuchung durchzuführen. Sofern man bereits bei dieser einfachen Lautart Unterschiede zwischen hörbehinderten und gesunden Säuglingen beobachten kann, ist anzunehmen, dass sich in komplexeren Vokalisationen erst recht Unterschiede zeigen. Die Ergebnisse werden nachfolgend interpretiert und bewertet sowie anhand des aktuellen Stands der Forschung diskutiert.

6.1 Strukturelle Melodieeigenschaften bei hörgeschädigten und gesunden Säuglingen – genetische Determination oder auditiver Lerneffekt?

Die Melodiestructur der Vokanten wurde in dieser Arbeit in einer vergleichenden, quantitativen Analyse untersucht. Bei Betrachtung der Gesamtheit der klassifizierten

Vokantenkategorien (V, V-Kombi) überwogen die simplen Strukturmuster (1B) bei beiden Probandengruppen (HI und KG). Als zweithäufigstes Strukturmuster zeigte sich die 2B Struktur, 1S folgte als dritthäufigste, 2S als vierthäufigste Kategorie. Diese Reihenfolge manifestierte sich sowohl über alle kategorisierten Laute als auch im Intragruppenvergleich. Der Verlauf von einfachen zu komplexeren Strukturmustern mit zunehmendem Alter stellt ein universales Entwicklungsmodell für die Melodie in Weinlauten dar (Wermke et al., 2002; Wermke & Friederici, 2004; Wermke & Mende, 2011). Wermke und Mende (2011) postulierten ein angeborenes Entwicklungsprogramm, das von einfachen Protomodulen in der Melodie ausgeht, die zu Modulen reifen und zu immer komplexeren Mustern kombiniert werden. Sie postulierten auch die Wiederholung dieser Sequenz in aufeinanderfolgenden Entwicklungsphasen (Wermke & Mende, 2011, Kap. 42). Wird dieser Mechanismus also in jeder der in Kapitel 2.2 beschriebenen vorsprachlichen Entwicklungsphasen durchlaufen, ist es naheliegend, dass dieses Phänomen auch im Cooing-Stadium zu beobachten ist. Systematisch durch Daten demonstriert wurde dieser Entwicklungsvorgang bei Cooing und Babbling erstmals durch Frank (Dissertation in Vorbereitung) anhand von Längsschnittdaten im Alter von 3 bis 7 Monaten. Aufgrund der genetischen Ausstattung für den Spracherwerb bei menschlichen Säuglingen ist das „Entwicklungsprogramm“ angeboren. Es wird jedoch durch epigenetische Faktoren, die zu einem individuellen Variationsbereich der Merkmalsausprägung (zum Beispiel der Melodiekomplexität) führen, beeinflusst.

Die in Kapitel 5.1 dargestellten Ergebnisse zeigen innerhalb der HI-Gruppe, unter Berücksichtigung der Variationsbereiche von Alter und Versorgungsstatus, tendenziell eine geringere melodische Komplexität der Vokanten. Dies manifestierte sich nicht nur in der Melodiestrukturanalyse, sondern auch im Melodiekomplexitätsindex auf Kindniveau. Hierbei zeigte sich im Gruppenvergleich für die Kontrollgruppe ein höherer MCI-Wert als für die HI-Gruppe. Eine mögliche Ursache für die weniger melodisch differenzierten Vokalisationen der HI-Probanden könnte die fehlende auditive Rückkopplung sein. Diese führt offenbar zu einer Verzögerung im Programmablauf der vorsprachlichen Entwicklung. Die Folge ist eine reduzierte Mustervariation, eine Art Monotonie der Lautproduktion. So berichten beispielsweise auch Schauwers, Gillis und Govaerts (2008) bei älteren HI-Säuglingen ab 8 Monaten von einer deutlich geringeren Silbenvariabilität und -diversität. Bei Betrachtung der Entwicklung des MCI im Altersverlauf zeigte sich bei beiden Gruppen eine Zunahme des MCI. Dennoch lag die HI-Gruppe in der Komplexität insgesamt unterhalb der KG-Probanden. Einerseits zeigte sich hier also der erwartete universale Entwicklungstrend von einfachen zu komplexen Melodiestrukturen in beiden

Gruppen. Andererseits ist aber auch ein verzögerter Ablauf dieser Phase der vorsprachlichen Entwicklung bei hörgeschädigten Säuglingen zu beobachten. Damit der angeborene Entwicklungsmechanismus regelrecht abläuft, werden vermutlich externe Reize und Eigenstimuli benötigt. Die Entwicklung neuronaler Strukturen ist abhängig von ausreichender akustischer Stimulation (Neville & Bavelier, 2006). Fehlt diese in der frühen Entwicklungsphase, können die Neuronen ihre Funktionsspezifität nicht ausreichend manifestieren (Diller et al., 2003; Klinke et al., 2001). Dies kann negative Langzeiteffekte zur Folge haben. Eine verzögerte vorsprachliche Entwicklung von hochgradig hörgeschädigten Säuglingen wurde bereits mehrfach anhand des verspäteten Beginns des kanonischen Babbelns belegt (Hapsburg & Davis, 2006; Oller & Eilers, 1988).¹⁸

H1: Bei der Entwicklung des MCI im Altersverlauf zeigte sich bei beiden Gruppen eine Zunahme der komplexen Laute. Die Melodiestructur der Vokanten sowie der MCI auf Kindebene weisen bei der HI-Gruppe jedoch auf eine geringere melodische Komplexität im Vergleich zur gleichaltrigen, gesunden Kontrollgruppe im Alter von 2 bis 6 Monaten hin.

Es wird daher ein verzögerter Verlauf der Melodieentwicklung in der untersuchten Phase der vorsprachlichen Entwicklung bei hörgeschädigten Säuglingen postuliert.

6.2 Quantitative Melodieeigenschaften als möglicher Indikator einer Hörbehinderung bei Säuglingen

6.2.1 Ist die mittlere Grundfrequenz bei hörbehinderten Säuglingen tatsächlich höher?

Auffälligkeiten der Frequenzkenngrößen bei Säuglingslauten gelten als Indikator für verschiedene gesundheitliche Störungen (Moura et al., 2008; Soltis, 2004). Eine höhere Grundfrequenz wurde vielfach mit neurologischen Störungen in Zusammenhang gebracht und auch für hörbehinderte Säuglinge postuliert.

Sofern in Vergleichsstudien zwischen hörgeschädigten und gesunden Säuglingen bzw. Kindern von einem Unterschied in der mittleren Grundfrequenz berichtet wird, ist diese zumeist oberhalb der für gleichaltrige, gesunde Probanden angegeben (Clement et al., 1996; Clement et al., 1998; Ryalls et al., 1993). Bereits 1971 kam Jones zu dem Ergebnis, dass Weinen von Kindern im Alter von 4 Jahren mit schwerem bis hochgradigem Hörverlust in höheren Frequenzen stattfindet. So waren 97% der f_0 -Messungen bei der

¹⁸ Bei Oller und Eilers 1988 wurde der Versorgungsstatus mit Hörhilfen nicht einheitlich berücksichtigt.

HI-Gruppe \leq 1500 Hz während 97% der Messungen der Kontrollgruppe Werte \leq 700Hz aufwiesen (Jones, 1971). Auch in methodisch und inhaltlich vergleichbaren Studien, in denen nur Komfortvokalisationen von Säuglingen im Alter von 2,5 bis 17 Monaten untersucht wurden, zeigten sich höhere f_0 -Werte in der HI-Gruppe (Clement et al., 1996; Clement et al., 1998). Signifikante Unterschiede waren jedoch erst mit 9,5 bis 11,5 Monaten zu beobachten (ibd.). Clement et al. (1994) postulierten, dass die Grundfrequenz in den ersten Monate vorwiegend von Stimmlippenanatomie und Atemphysiologie bestimmt wird und sich somit noch nicht zu der von gesunden Säuglingen unterscheidet. Auditorische Erfahrungen, so wurde bisher angenommen, würden erst gegen Ende des ersten Lebensjahres zunehmend an Bedeutung erlangen.

Im Unterschied dazu zeigte sich bei der Analyse der Vokanten in vorliegender Arbeit bereits im Altersbereich zwischen 2 und 6 Monaten, bei Betrachtung des gesamten Untersuchungszeitraums, tendenziell eine höhere mittlere Grundfrequenz der HI-Gruppe. Diese Differenz erwies sich statistisch zwar als nicht signifikant, für die Berechnung auf Kindlevel stand jedoch auch nur ein sehr kleiner Datensatz zur Verfügung. Bei Vorliegen weiterer Daten aus der übergeordneten Kohortenstudie, sollte dies daher noch einmal überprüft werden. Somit steht das Ergebnis im Hinblick auf die höhere mittlere Grundfrequenz bei Betrachtung des gesamten Untersuchungszeitraums in Übereinstimmung mit der Fachliteratur.

Allerdings hat sich in der Analyse ein neuer Aspekt gezeigt, der bisher wenig Berücksichtigung in den publizierten Untersuchungen fand: Hiernach könnten sowohl der Versorgungsstatus mit einer Hörhilfe als auch die zu diesem frühen Zeitpunkt fortschreitende Entwicklung, also der Alterseffekt, einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Frequenzeigenschaften der Säuglingslaute haben. In der vorliegenden Arbeit zeigte sich sowohl auf Signallevel als auch auf Kindlevel im Altersverlauf ein fallender Trend der mittleren Grundfrequenz bei den hörbehinderten Säuglingen, unabhängig von der Versorgung mit Hörhilfen. Beginnend bei Werten oberhalb der KG-Gruppe, fiel die Grundfrequenz in der HI-Gruppe im Altersverlauf von 2 bis 6 Monaten deutlich ab. Dieser Befund wurde in der Fachliteratur bisher nicht beschrieben. Die mittlere Grundfrequenz der gesunden Kontrollgruppe zeigte sich je nach Analyse auf Signal- bzw. Kindlevel hingegen uneinheitlich. Während sie auf Signallevel einen tendenziell steigenden Verlauf über den gesamten analysierten Altersabschnitt aufwies, war sie auf Kindlevel schwach abfallend. Das könnte damit zusammenhängen, dass einige Säuglinge sich bereits in der Phase des Übens von Registerwechseln befanden und einzelne Vokanten

hochfrequent im Falsett erzeugt wurden. Im Mittel scheint bei Vokanten aber die normale Phonation das bevorzugte Register zu sein. Der Abfall der Grundfrequenz bei den HI-Probanden dagegen deutet auf eine Bevorzugung des Strohassregisters hin. Diese Hypothese sollte anhand der größeren Stichprobe in der finalen Kohortenauswertung erneut geprüft werden. Die Analyse der vorliegenden Arbeit lieferte insgesamt bei Berücksichtigung von Altersentwicklung und Versorgungsaspekten für die HI-Probanden keine signifikant höheren Werte für die mittlere Grundfrequenz im Altersbereich nach 23 Wochen, wie es für ältere Hörbehinderte in der Literatur beschrieben wird. Vielmehr zeigte sich tendenziell eine Abnahme der mittleren Grundfrequenz im Altersbereich zwischen 2 und 6 Monaten. Hier stellt sich die Frage nach den Ursachen für diese Diskrepanz. Die wenigen früheren Arbeiten, die höhere Grundfrequenzen postulierten (Clement et al., 1998; Iyer & Oller, 2008; Jones, 1971; Ryalls et al., 1993), weisen zum Teil methodische Limitationen auf. Manche Studien sind beispielsweise sehr heterogen bezüglich des Alters der Probanden sowie dem Versorgungsstatus mit Hörhilfen. Dies könnte auch ein Grund für die unterschiedlichen Befunde sein.

Die hier gefundenen, tendenziell fallenden Frequenzwerte der HI-Probanden im Untersuchungszeitraum könnten möglicherweise ein erstes Indiz dafür sein, dass hochgradig hörbehinderte Säuglinge zunehmend in tiefere Frequenzbereiche gehen, um Vibration zu spüren. Eine ähnliche Beobachtung machten auch Clement et al. (1996), die besonders bei der hörgeschädigten Probandengruppe zum Teil extrem niedrige f_0 beschreiben: „another example of peculiar phonation was an extremely low F_0 because of vocal fry (creaky voice) specially found within the HI group“ (Clement et al., 1996, S. 1550). Sie verweisen allerdings auf eine Strohassphonation, wohingegen die hier kategorisierte Vokalisationsart der Vokanten vorwiegend im Modalregister erzeugt wurde. Dennoch ist das in vorliegender Arbeit gefundene Ergebnis, durch eine tiefere Tonlage eine stärkere Schwingung im Larynx zu spüren, ähnlich. Zudem wird der Vokant, wie in Kapitel 4.5.3.1 beschrieben, teilweise mit laryngealen Konstriktionen kombiniert. Tritt er beispielsweise mit dem Puls- bzw. Strohassregister (creaky voice) kombiniert auf, befindet sich der Vokant vermehrt in einem tieferen Frequenzbereich. Da bei hörbehinderten Säuglingen die akustische Rückkopplung je nach Schweregrad der Behinderung eingeschränkt ist, bzw. fehlt, wäre es eine natürliche und naheliegende Reaktion auf eine andere Sinneswahrnehmung auszuweichen und nach einer anderen Reizafferenz zu suchen. Die Vorliebe für propriozeptive und taktil-kinästhetische Laute bei hochgradig hörgeschädigten Säuglingen beschreibt auch schon Gräfin von Spiegel zum Diesenberghanxleden (2009) in ihrer Dissertation.

Die unzureichende Differenzierung der Vokalisationstypen in der bestehenden Fachliteratur könnte ein weiterer möglicher Grund dafür sein, dass der hier gefundene Trend der mit dem Alter fallenden mittleren Grundfrequenz der HI-Probanden dort nicht berichtet ist. Sofern Übergangslaute, also Laute mit eher weinerlichem Charakter, neben Komfortvokalisation in die Analysen eingehen, sind die mittleren f_0 - Werte höher. Geht man wie bereits in Kapitel 6.1 ausgeführt davon aus, dass Säuglinge mit hochgradiger Hörstörung eine verzögerte vorsprachliche Entwicklung aufweisen, erzeugen sie auch Komfortvokalisation in einem späteren Alter. In der weiteren Kohortenauswertung könnte durch eine Formantanalyse eine entsprechende Differenzierung vorgenommen werden und eine Trennung von reifen Vokalen und Vokalvorläufern erfolgen. Da in der Expansionsphase zwischen 3 und 8 Monaten vereinzelt erstmals reife Vokale im Lautrepertoire von Säuglingen vorkommen (siehe Kapitel 2.2), könnten diese anhand der Formanten im Frequenz-Spektrogramm identifiziert werden (Rvachew, Alhaidary, Mattock & Polka, 2008). Dieser Aspekt konnte jedoch in vorliegender Arbeit aufgrund des bereits sehr hohen zeitlichen Arbeitsumfangs nicht berücksichtigt werden. Zudem standen zur Darstellung des Altersbereichs vor 154 Tagen final deutlich mehr Aufnahmen als für den Bereich ab der 23. Woche zur Verfügung. Somit war die Datenbasis abschließend auch zu gering, um aufgrund der resultierenden asymmetrischen Verteilung der Messpunkte eine statistisch signifikante Aussage über den Einfluss der Versorgung auf die Vokanteneigenschaften treffen zu können.

Nachdem sich allerdings bereits bei der hier untersuchten primitiven Form der Vokalisation (Vokanten) tendenziell ein Unterschied der mittleren Grundfrequenz im Altersverlauf gezeigt hat, wären weitere Analysen im Rahmen der Kohortenstudie sinnvoll. Für die Auswertung innerhalb der Kohortenstudie wird daher postuliert:

H2: Die Komfortlaute im Altersbereich zwischen 2 und 6 Monaten zeigen eine höhere mittlere Grundfrequenz bei den HI-Probanden.

Weiterhin wird für die HI Gruppe eine Abnahme der mittleren Grundfrequenz nach Versorgung mit Hörhilfe postuliert. Der Medianwert liegt allerdings auf Kindlevel oberhalb desjenigen der Kontrollgruppe.

6.2.2 Standardabweichung, Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz

Die Standardabweichung sowie die Maximal- und Minimalwerte der Grundfrequenz wurden in dieser Arbeit nur auf Signallevel betrachtet. Die Standardabweichung unterscheidet sich bei beiden Probandengruppen kaum. Die Loess-Anpassungslinie verläuft

sowohl bei der HI-Gruppe als auch bei der KG-Gruppe annähernd horizontal. Dies deutet auf eine gleichbleibende innerlautliche Variabilität der mittleren Grundfrequenz über den analysierten Altersabschnitt innerhalb der jeweiligen Gruppe hin. Diese Größe scheint wenig Aussagekraft zu haben, um die Gruppen zu differenzieren. Das könnte daran liegen, dass hier nur Vokanten untersucht wurden und die Variation dadurch „künstlich“ reduziert war. In der Fachliteratur gibt es bisher keine vergleichbaren Untersuchungen zur Standardabweichung.

Die Maximalwerte der Kontrollgruppe liegen im Median ebenfalls in beiden Altersabschnitten eng beieinander mit 349 Hz vor der 23. Woche und 365,5 Hz nach der 23. Woche. Die HI-Gruppe weist hingegen einen deutlich fallenden Verlauf der Maximalwerte auf. Im Bereich vor 23 Wochen liegen die Maximalwerte mit 395 Hz noch über denen der Kontrollgruppe wohingegen sie nach der 23. Woche auf 332 Hz abfallen. Dies ergibt eine prozentuale Differenz von -15,8%. Auch die Minimalwerte verzeichnen bei der Kontrollgruppe vor und nach der 23. Woche nur einen geringen Unterschied, während die Minima der HI-Gruppe immerhin noch um -14,9% fallen. Somit stützen diese Befunde den beobachteten, fallenden Verlauf der mittleren Grundfrequenz der HI-Gruppe mit dem Alter.

H3: In der Standardabweichung scheinen sich zunehmende intentionale Variation und fehlende vokale Regelkapazität zu vermischen. Da dies kaum zu trennen ist, sollte diese Messgröße bei der weiteren Kohortenauswertung vorerst nur sekundär berücksichtigt werden.

6.2.3 Grundfrequenzhub (FM-Amplitude)

Neben der Analyse der mittleren Grundfrequenz wurde in dieser Arbeit die maximale Frequenzamplitude (absoluter Hub der Grundfrequenzkontur) untersucht. Dabei zeigte sich, dass der absolute Hub sowohl auf Signallevel als auch auf Kindlevel bei Betrachtung des gesamten analysierten Altersabschnitts in der HI-Gruppe höhere Werte als in der KG-Gruppe aufwies. Dieser Unterschied war statistisch allerdings nicht signifikant. Generell liegen auch zum Grundfrequenzhub in der Fachliteratur kaum geeignete Daten bzw. Referenzwerte vor. Jones (1971) hat neben der mittleren Grundfrequenz auch den absoluten Hub vermessen. Die Analyse bezog sich jedoch nur auf den Vokalisationstyp Weinen im Alter von 4 Jahren. Über den Versorgungsstatus mit Hörhilfe wurde nicht berichtet. Es zeigten sich in der Kontrollgruppe Werte ≤ 500 Hz zu 71%, während in der HI-Gruppe zu 75% Werte größer 500 Hz gemessen wurden. Dieses Ergebnis stützt

somit tendenziell die ermittelten höheren FM-Amplitudenverläufe für die HI-Probanden der vorliegenden Arbeit. Dies scheint plausibel, da den hörgeschädigten Säuglingen die auditive Rückkopplung zur Regulation der Frequenzamplitude während einer Lautproduktion fehlt. Wie bereits bei der mittleren Grundfrequenz beschrieben, kann vermutet werden, dass diese Säuglinge einen „Ersatzfeedback“ suchen und hier den Frequenzbereich weit „abtasten“. Das ist bisher nur eine Spekulation, sollte aber aufgrund der Plausibilität mit einem größeren Datensatz noch einmal untersucht werden.

Auch bei der Hubanalyse wurden die beiden Gruppen HI und KG nicht nur über den gesamten untersuchten Altersabschnitt betrachtet, sondern auch separat für den Altersbereich vor und nach der 23. Woche. Bei der Untersuchung auf Signalleve ergab sich für die Kontrollgruppe vor der 23. Woche ein Median unter dem der HI-Gruppe (89 Hz versus 113 Hz). In der Kontrollgruppe stieg der Hub nach der 23. Woche um 3,4% im Gegensatz zur HI-Gruppe (-25,7% im Vergleich zum ersten Altersbereich). Insgesamt wies die HI Gruppe hier also zunächst einen vergleichsweise hohen Wert für den absoluten Hub auf, der dann mit zunehmendem Alter immer weiter abgesunken ist. Dieses Ergebnis, so könnte man spekulieren, würde für die Hypothese sprechen, dass hörgeschädigte Säuglinge zunächst das gesamte Frequenzspektrum „abtasten“. Im Altersverlauf scheinen die hörgeschädigten Säuglinge aufgrund fehlender Rückkopplung jedoch zunehmend zu „resignieren“, was sich in der sinkenden Frequenzamplitude bemerkbar machen könnte. Die Kontrollgruppe wies hingegen tendenziell im Entwicklungsverlauf höhere Frequenzhübe auf. Hier wird intentional mit der Melodie variiert, um die Intonationsmuster der Umgebungssprache zu imitieren.

Da für die Betrachtung auf Kindebene mit $n = 18$ für die Kontrollgruppe und $n = 8$ für die HI-Gruppe insgesamt nur wenig Daten zur Verfügung standen, ist auch hier die erweiterte Analyse mit einer größeren Stichprobe der Kohortenstudie abzuwarten. Dafür wird im Ergebnisteil vorliegender Arbeit folgende Hypothese für den Frequenzhub postuliert:

H4: Die Frequenzamplitude (maximaler, absoluter Hub der Grundfrequenz) weist sowohl auf Signalebene als auch auf Kindebene bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsalters der Kohortenstudie für die HI-Probanden im Mittel höhere Werte als für die gesunde Kontrollgruppe auf. Bei Berücksichtigung der Altersentwicklung zeigt sich in der HI Gruppe ein fallender Trend der Frequenzamplitude ab einem Alter von ca. 154 Tagen. Diese Größe wird als wichtige Messgröße in der Kohortenauswertung angesehen.

6.3 Methodische Limitationen und Vorschläge für die weiteren Analysen im Rahmen der Kohortenstudie

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Pilotstudie im Rahmen einer laufenden Kohortenstudie. Die Pilotstudie sollte anhand der ersten rekrutierten Probanden Hypothesen für die Auswertung der vollständigen Daten der Gesamtstudie erarbeiten.

Es wurden dafür in dieser Arbeit nur Vokanten und auch hier nur einfache Strukturkategorien (1B und KL) ausgewertet. Damit sollte zunächst anhand einer einfachen Vokalisationsart geprüft werden, ob es Unterschiede in den Vokalisationseigenschaften gesunder und hörgeschädigter Säuglinge gibt. Hinweise hierfür konnten in dieser Arbeit gefunden werden. Im Laufe der Untersuchung wurde jedoch zunehmend die Limitation dieser engen Eingrenzung deutlich. Die starke Homogenisierung hat möglicherweise bestehende Unterschiede nicht hinreichend entdecken lassen. Für weiterführende Auswertungen wird daher die Erfassung des gesamten Lautrepertoires vorgeschlagen. Da, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, insbesondere melodisch-rhythmische Merkmale als bedeutend in der vorsprachlichen Entwicklung gelten, wäre auch eine vergleichende Analyse komplexer Strukturformen zwischen hörgeschädigten und gesunden Säuglingen notwendig.

Methodisch limitierend für die Gesamtstudie sind auch die Rahmenbedingungen zur Aufzeichnung der Säuglingslaute. Die Aufnahmen erfolgten in der Regel im Anschluss an das NHS-2, für welches die Säuglinge im Idealfall schlafen sollten (siehe Kapitel 3.2). Um dies zu gewährleisten, ging häufig eine längere Wachperiode der zu untersuchenden Säuglinge voraus, die nicht selten nachfolgend zu Übermüdigungserscheinungen führte. Hierdurch produzierten manche Säuglinge vorwiegend Wein- und Überganslaute wodurch die Beantwortung der Frage, ob HI-Probanden weniger und/oder andere Komfortvokalisationen erzeugen, erschwert wurde. Dass der Gemütszustand der Säuglinge einen Einfluss auf die Vokalisationsleistung hat, postulierten auch Hsu, Fogel und Messinger (2001).

Die übergeordnete Gesamtstudie wurde als Kohortenstudie angelegt und erfasst alle Säuglinge, die im Zeitraum von circa 1,5 Jahren Auffälligkeiten im NHS-1 zeigen. Da hierdurch eine relativ große Stichprobe in die Untersuchung einbezogen werden kann, ist dieser Projektaufbau auch grundsätzlich sinnvoll. Hierbei zeigte sich jedoch bereits bei den ersten Probanden der Kohortenstudie, dass es viele unterschiedliche Muttersprachen gab. Dieser Einflussfaktor gilt in der Literatur als relevant für die Melodieeigenschaften der Säuglingsvokalisationen (Mampe et al., 2009; Prochnow, 2013; Wermke,

Pachtner et al., 2013; Wermke et al., 2016). Für weitere Analysen wäre daher zu prüfen, ob eine Berücksichtigung der Muttersprache zu einer verbesserten Differenzierung der Vokalisationseigenschaften der Probanden führt.

Insgesamt haben die hier durchgeführten Analysen ermöglicht, Hypothesen für die Auswertung der Kohortenstudie zu erarbeiten. Es ist geplant, die in dieser Arbeit postulierten Hypothesen in einer nachfolgenden Untersuchung im Rahmen der Kohortenstudie zu prüfen. Dabei sollte insbesondere eine größere Datenmenge verwendet, als auch das gesamte Lautrepertoire der Komfortvokalisation berücksichtigt werden. Zudem sollten psychologisch-medizinische Begleitdaten soweit möglich beachtet sowie die Art der statistischen Datenauswertung erweitert werden.

7 Zusammenfassung

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine explorative Pilotstudie im Rahmen einer Kohortenstudie, die als Kooperationsprojekt des Zentrums für Vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES) der Poliklinik für Kieferorthopädie und dem Comprehensive Hearing Center (CHC) der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen des Universitätsklinikums Würzburg entstanden ist.

Die Zielsetzung des Gesamtprojekts ist es, in Zukunft Säuglinge mit angeborener Hörstörung noch früher zu erkennen und individuell optimiert behandeln zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurde unter anderem anhand der ersten in der Kohortenstudie rekrutierten Probanden untersucht, inwiefern die Fähigkeit zu hören die Melodieeigenschaften von Vokanten, einer frühen Form von Komfort-Säuglingslauten, beeinflusst. Grundlegend war die Annahme, dass ein Säugling nur dann fähig ist ein regelrechtes, altersadäquates Vokalisationsrepertoire zu erzeugen, wenn er sich selbst hören kann. Sofern sich also bereits bei dieser primitiven Vokalisationsart Differenzen zeigen würden, so die Annahme, würden auch komplexere Vokalisationen Unterschiede zwischen gesunden und hörgeschädigten Säuglingen aufweisen. Die vorliegende Untersuchung sollte erste Hypothesen generieren, um die Auswertung der Kohorte später zielgerichteter vornehmen zu können.

Anhand der ersten Studienprobanden der Kohortenstudie sowie ergänzender, anonymisiert vorliegender Daten des ZVES Archivs, wurden ausgewählte melodische und strukturelle Kenngrößen der Komfortvokalisation ausgewertet. Als melodische Kenngrößen wurden hierbei insbesondere die mittlere Grundfrequenz sowie die maximale FM-Amplitude (Hub) betrachtet. Zudem wurden die strukturellen Melodieeigenschaften und die Melodiekomplexität bestimmt. Gegenstand der signalanalytischen Untersuchung war die vergleichende Analyse hochgradig sensorineural hörgeschädigter Probanden (HI) mit unauffälligen Säuglingen der Kontrollgruppe (KG). Bei der Patientengruppe lagen sowohl Aufnahmen mit Hörhilfe (mit HH) als auch ohne Hörhilfe (ohne HH) vor. Um den Versorgungsstand mit Hörhilfen sowie die Altersentwicklung betrachten zu können, wurde der Untersuchungszeitraum zwischen 60 und 180 Tagen in zwei Altersabschnitte unterteilt. Für den Bereich vor 23 Wochen (≤ 154 d) wurden nur Aufnahmen ohne HH gewählt, für den Altersbereich nach 23. Wochen nur Aufnahmen mit HH.

Die Aufnahmen für die Kohortenstudie erfolgten im CHC im Rahmen des Neugeborenen-Hörscreenings-2. Sowohl die pseudonymisierten Aufnahmen der Kohortenstudie als auch die anonymisiert vorliegenden Aufnahmen des Archivs wurden anschließend in mehreren Analyseschritten im ZVES ausgewertet. Insgesamt wurden circa 20.000 Laute bearbeitet, von denen nach Vorselektion jedoch nur 6.500 Laute von 27 Säuglingen bestehen blieben. Für die deskriptive Analyse, die sich spezifisch auf die Vokalisationsart der in dieser Arbeit definierten Vokanten bezieht, standen noch 1.238 Laute zur Verfügung.

Zunächst mussten die Lautaufnahmen der gesunden und hörgeschädigten Säuglinge durch computergestützte Analyseprogramme vorverarbeitet werden, sodass nachfolgend eine Kategorisierung der gesamten Laute ermöglicht wurde. Mithilfe der Open-source Software PRAAT konnte der Verlauf der Grundfrequenz berechnet werden. Anschließend erfolgte mit dem CDAP-Programm (Cry-Data-Analysis-Programm) neben der Einteilung der Vokalisationen in Kategorien eine Vermessung aller Laute.

Im Ergebnisteil wurden nur „Vokanten“, als simpelste Form der Komfortvokalisation (non-cry-Vokalisation), hinsichtlich verschiedener Messgrößen vergleichend analysiert. Es zeigte sich, dass bereits bei dieser einfachen Vokalisationsart Unterschiede in der Melodiestructur zwischen den beiden Gruppen bestehen. In der hörgeschädigten Probandengruppe fanden sich tendenziell weniger komplexe Strukturen verglichen mit der gesunden Kontrollgruppe. Wenngleich dieser Unterschied in der kleinen Stichprobe nicht signifikant war, scheint bereits bei dieser simplen Vokalisationsart die fehlende externe akustische Stimulation eine Rolle zu spielen. Berücksichtigt man die Altersentwicklung vor und nach 23 Wochen, lässt sich bei beiden Gruppen eine Zunahme der Komplexität feststellen, die allerdings bei der HI-Gruppe deutlich geringer war. Dies könnte auf ein angeborenes Melodieentwicklungsprogramm hindeuten, welches zur vollständigen Entfaltung jedoch Höreindrücke benötigt. Auch bei der Grundfrequenzanalyse ergaben sich Differenzen zwischen den beiden Probandengruppen. Sowohl bei der Analyse der mittleren Grundfrequenz als auch des Grundfrequenzhubs, zeigten sich bei Betrachtung des gesamten untersuchten Altersbereichs tendenziell höhere Werte für die HI-Gruppe. Zur Entwicklung innerhalb der definierten Altersabschnitte vor und nach 23 Wochen sowie dem Versorgungsstatus mit Hörhilfen lässt sich aufgrund der geringen Datenstichprobengröße jedoch kaum eine eindeutige Aussage treffen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind als richtungsweisende, vorläufige Hypothesen für die laufende Kohortenstudie zu betrachten: Ein Defizit in der Hörleistung macht sich nicht, wie bisher in der Fachliteratur postuliert, erst ab dem 6. Monat in der Komfortvokalisation bemerkbar, sondern vermutlich bereits ab dem 2. Lebensmonat.

8 Literaturverzeichnis

- Benninghoff, A., Drenckhahn, D. & Waschke, J. (2014). *Taschenbuch Anatomie* (2. Aufl.). München: Urban & Fischer.
- Benzaquen, S., Gagnon, R., Hunse, C. & Foreman, J. (1990). The intrauterine sound environment of the human fetus during labor. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 163(2), 484–490.
- Berger, J. & Cunningham, C. C. (1983). Development of early vocal behaviors and interactions in Down's syndrome and nonhandicapped infant-mother pairs. *Developmental psychology*, 19(3), 322–331.
- Birnholz, J. & Benacerraf, B. (1983). The development of human fetal hearing. *Science*, 222(4623), 516–518.
- Bloom, K., D'Odorico, L. & Beaumont, S. (1993). Adult preferences for syllabic vocalizations: Generalizations to parity and native language. *Infant Behavior and Development*, 16(1), 109–120.
- Boenninghaus, H.-G. & Lenarz, T. (2005). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde* (Springer-Lehrbuch, 12. Aufl.). Berlin: Springer.
- Brezinka, C., Lechner, T. & Stephan, K. (1997). Der Fetus und der Lärm. *Gynäkologisch-geburtshilffliche Rundschau*, 37(3), 119–129.
- Brosch, S. & Delb, W. (Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie, Hrsg.). (2013). *Periphere Hörstörungen im Kindesalter. AWMF-Leitlinien-Register 049-010: S2k-Leitlinie kindliche Hörstörungen*. Zugriff am 03.08.2019. Verfügbar unter <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/049-010.html>
- Buder, E. H., Warlaumont, A. S. & Oller, D. K. (2013). An acoustic phonetic catalog of prespeech vocalizations from a developmental perspective. In B. Peter & A. A. N. MacLeod (Hrsg.), *Comprehensive perspectives on speech sound development and disorders: Pathways from linguistic theory to clinical practice* (Languages and linguistics, S. 103–134). New York: Nova Science Publishers.
- Bundesministerium für Gesundheit (Bundesministerium für Gesundheit, Hrsg.). (2008). *Bekanntmachung eines Beschlusses des Gemeinsamen Bundesausschusses über eine Änderung der Kinder-Richtlinien: Einführung eines Neugeborenen-*

Hörscreenings. Verfügbar unter https://www.g-ba.de/downloads/39-261-681/2008-06-19-Kinder-Hörscreening_BAnz.pdf

Bundesministerium für Gesundheit. (2019). *Kindergesundheit. Gesundheitsuntersuchungen für Kinder und Jugendliche*. Verfügbar unter <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/praevention/kindergesundheit/frueherkennungsuntersuchung-bei-kindern.html>

Cebulla, M., Hofmann, S. & Shehata-Dieler, W. (2014). Sensitivity of ABR based newborn screening with the MB11 BERAphone®. *International journal of pediatric otorhinolaryngology*, 78(5), 756-761.

Cebulla, M. & Shehata-Dieler, W. (2012). ABR-based newborn hearing screening with MB11 BERAphone® using an optimized chirp for acoustical stimulation. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 76(4), 536–543.

Cenoz, J. & Genesee, F. (2001). *Trends in Bilingual Acquisition*: John Benjamins Publishing Company.

Chen, H. P. & Irwin, O. C. (1946). Infant Speech Vowel And Consonant Types. *Journal of Speech Disorders*, 11(1), 27–29.

Cheour-Luhtanen, M., Alho, K., Sainio, K., Rinne, T., Reinikainen, K., Pohjavuori, M. et al. (1996). The ontogenetically earliest discriminative response of the human brain. *Psychophysiology*, 33(4), 478–481.

Clad, F. (Dissertation in Vorbereitung). *Vergleichende Analyse temporaler Eigenschaften von Vokanten bei gesunden und hochgradig hörgeschädigten Säuglingen zum Zeitpunkt des Neugeborenen-Hörscreenings-2*.

Clement, C. J. (2004). *Development of vocalizations in deaf and normally hearing infants*. Universität Amsterdam.

Clement, C. J., Koopmans-van Beinum, F. J. & den Os, E. A. (1994). The development of vocalizations of deaf and normally hearing infants. In Institute of Phonetic Sciences, University of Amsterdam (Hrsg.), – *Proceedings 18* (Bd. 18, 65-76).

Clement, C. J., Koopmans-van Beinum, F. J. & Pols, L.C.W. (1996). Acoustical characteristics of sound production of deaf and normally hearing infants. In H. T. Bunnell & W. Idsardi (Hrsg.), *Proceedings ICSLP 96. Fourth International Conference on*

- Spoken Language Processing* (Bd. 3, Bd. 3, S. 1549–1552). Philadelphia, USA. Zugriff am 04.02.2019.
- Clement, C. J., Koopmans-van Beinum, F. J. & van den Dikkenberg-Pot, I. (1998). Influence of lack of auditory speech perception on sound productions of deaf infants. *IFA Proceedings 22, Institute of Phonetic Sciences University of Amsterdam*, 47–60.
- Colletti, V., Carner, M., Miorelli, V., Guida, M., Colletti, L. & Fiorino, F. G. (2005). Cochlear implantation at under 12 months: report on 10 patients. *The Laryngoscope*, 115(3), 445-449.
- Connor, C. M., Craig, H. K., Raudenbush, S. W., Heavner, K. & Zwolan, T. A. (2006). The age at which young deaf children receive cochlear implants and their vocabulary and speech-production growth: is there an added value for early implantation? *Ear and Hearing*, 27(6), 628–644.
- DeCasper, A. J. & Fifer, W. (1980). Of human bonding: newborns prefer their mothers' voices. *Science*, 208(4448), 1174–1176.
- DeCasper, A. J. & Spence, M. J. (1986). Prenatal maternal speech influences newborns' perception of speech sounds. *Infant Behavior and Development*, 9(2), 133–150.
- Dehaene-Lambertz, G., Montavont, A., Jobert, A., Alliol, L., Dubois, J., Hertz-Pannier, L. et al. (2010). Language or music, mother or Mozart? Structural and environmental influences on infants' language networks. *Brain and language*, 114(2), 53-65.
- Dettman, S. J., Dowell, R. C., Choo, D., Arnott, W., Abrahams, Y., Davis, A. et al. (2016). Long-term communication outcomes for children receiving cochlear implants younger than 12 months. A multicenter study. *Otology & Neurotology*, 37(2), e82-e95.
- Diller, G., Kinkel, M., Kosmalowa, J., Krahulcov, B., Lehnhardt, E., Lehnhardt, M. et al. (2003). *Hörstörungen-pädagogische Möglichkeiten*. Studienbrief 1 im Comenius 2.1: Qualifikation von pädagogischen Fachkräften in der Hörgeschädigtenförderung (QESWHIC). Zugriff am 30.07.2019. Verfügbar unter http://www.monsana.ch/uploads/media/letter01de_1_.pdf

- Eiband, D. (2018). *Charakterisierung vorsprachlicher Komfortvokalisationen von Kindern mit orofazialen Spaltbildungen vor und nach operativem Gaumenverschluss*. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Eilers, R. E. & Oller, D. K. (1994). Infant vocalizations and the early diagnosis of severe hearing impairment. *The Journal of Pediatrics*, 124(2), 199–203.
- Eisenmann, M. (Dissertation in Vorbereitung). *Entwicklung und Testung von PRAAT Skripten zur semi-automatischen Vokalisationsanalyse im Rahmen der Vorsprachlichen Diagnostik am ZVES*.
- Fagan, M. K. (2014). Frequency of vocalization before and after cochlear implantation: dynamic effect of auditory feedback on infant behavior. *Journal of Experimental Child Psychology*, 126, 328–338.
- Fagan, M. K. (2015). Why repetition? Repetitive babbling, auditory feedback, and cochlear implantation. *Journal of experimental child psychology*, 137, 125-136.
- Fiellau-Nikolajsen, M. (1983). Epidemiology of secretory otitis media. A descriptive cohort study. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 92(2 Pt 1), 172–177.
- Fornfeld, B. (2004). Erkennen-Verstehen-Lernen, Erziehungswissenschaftliche Reflexionen im heilpädagogischen Kontext. In S. Kannewischer, B. Kolb & G. Hopfinger (Hrsg.), *Verhalten als subjektiv-sinnhafte Ausdrucksform. Festschrift für Konrad Bundschuh zum 60. Geburtstag* (S. 9–15). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Frank, V. (Dissertation in Vorbereitung). *Analyse melodischer und artikulatorischer Eigenschaften in Komfortvokalisationen von Säuglingen mit deutscher Muttersprache im Alter von 3-7 Monaten*.
- Friedrich, G., Bigenzahn, W., Zorowka, P. & Brunner, E. (2008). *Phoniatrie und Pädaudiologie. Einführung in die medizinischen, psychologischen und linguistischen Grundlagen von Stimme, Sprache und Gehör* (Gesundheitsberufe Stimme - Sprache - Gehör, 4., korrigierte Aufl.). Bern: Huber.
- Geo-Science-International (Geo-Science-International, Wikimedia Commons, the free media repository, Hrsg.). (2018). *Wie ist unser Ohr aufgebaut – und wie funktioniert Hören eigentlich? Aufbau des Ohrs*. Zugriff am 09.08.2019. Verfügbar unter <https://www.uvex-safety.com/blog/de/2018-03-03/wie-ist-unser-ohr-aufgebaut-und-wie-funktioniert-hoeren-eigentlich/>

- Götte, K. & Nicolai, T. (2019). *Pädiatrische HNO-Heilkunde* (2. Auflage). München, Deutschland: Elsevier.
- Gräfin von Spiegel zum Diesenberg-Hanxleden, M.-A. (2009). *Spektrographische Analyse der Vokalisierungen hochgradig hörgeschädigter Kinder im Zeitraum vor, während und nach Cochlea-Implantation*. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Gratier, M. & Devouche, E. (2011). Imitation and repetition of prosodic contour in vocal interaction at 3 months. *Developmental psychology*, 47(1), 67-76.
- Grimm, H. (2012). *Störungen der Sprachentwicklung. Grundlagen-Ursachen-Diagnose-Intervention-Prävention* (3., Überarb. Aufl.). Heidelberg: Hogrefe.
- Gross, M., Finck-Krämer, U. & Spormann-Lagodzinski, M. (2000). Angeborene Erkrankungen des Hörvermögens bei Kindern. *HNO*, 48(12), 879–886.
- Gürkov, R. (2019). *BASICS Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde* (Basics, 5. Auflage). München: Urban & Fischer in Elsevier.
- Hammes, D. M., Willis, M., Novak, M. A., Edmondson, D. M., Rotz, L. A. & Thomas, J. F. (2002). Early identification and cochlear implantation: critical factors for spoken language development. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, (189), 74–78.
- Hapsburg, D. von & Davis, B. L. (2006). Auditory sensitivity and the prelinguistic vocalizations of early-amplified infants. *Journal of speech, language, and hearing research: JSLHR*, 49(4), 809-822.
- Hepper, P. G. & Shahidullah, B. S. (1994). Development of fetal hearing. *Archives of Disease in Childhood. Fetal and Neonatal Edition*, 71(2), F81-F87.
- Hollien, H. (1974). On Vocal Registers. *Journal of Phonetics*, 2(2), 125–143.
- Houston, D. M., Pisoni, D. B., Kirk, K. I., Ying, E. A. & Miyamoto, R. T. (2003). Speech perception skills of deaf infants following cochlear implantation: a first report. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 67(5), 479–495.
- Hsu, H.-C., Fogel, A. & Messinger, D. S. (2001). Infant non-distress vocalization during mother-infant face-to-face interaction: Factors associated with quantitative and qualitative differences. *Infant Behavior and Development*, 24(1), 107–128.
- Huppelsberg, J. & Walter, K. (2007). *Kurzlehrbuch Physiologie*. Stuttgart: Thieme.

- Huppelsberg, J. & Walter, K. (2013). *Kurzlehrbuch Physiologie* (4. Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Hüttenbrink, K. B. (1994). Die chronische Otitis media. In J. Helms, E. Kastenbauer, C. Herberhold & H. H. Naumann (Hrsg.), *Oto-Rhino-Laryngologie in Klinik und Praxis* (601–632.). Stuttgart: Thieme Verlag.
- Iyer, S. N. & Oller, D. K. (2008). Fundamental frequency development in typically developing infants and infants with severe-to-profound hearing loss. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 22(12), 917–936.
- Jenni, O. G. & Largo, R. H. (2015). Wachstum und Entwicklung in der Pränatal- und Neugeborenenperiode. In G. F. Hoffmann, M. J. Lentze, J. Spranger & F. Zepp (Hrsg.), *Pädiatrie. Grundlagen und Praxis* (S. 1–14). Berlin: Springer.
- Jones, C. M. (1971). Diagnostic implications of acoustic cry features. *Journal of communication disorders*, 4(4), 310–316.
- Kajtažović, J. (2015). *Ermittlung des Variabilitätsbereiches der mittleren Grundfrequenz in Vokalisationen von Säuglingen mit syndromaler und nicht-syndromaler Spaltbildung in den ersten 90 Lebenstagen*. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Kant, I. (1798). *Der Streit der Fakultäten. Anthropologie in pragmatischer Hinsicht*. Zugriff am 30.08.2019. Verfügbar unter <https://korpora.zim.uni-duisburg-essen.de/kant/aa07/Inhalt7.html>
- Kent, R. D. & Murray, A. D. (1982). Acoustic features of infant vocalic utterances at 3, 6, and 9 months. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(2), 353-365.
- Kent, R. D., Osberger, M. J., Netsell, R. & Hustedde, C. G. (1987). Phonetic development in identical twins differing in auditory function. *The Journal of speech and hearing disorders*, 52(1), 64-75.
- Kiese-Himmel, C. & Ohlwein, S. (2002). Die frühe Sprachentwicklung permanent hörgestörter Kinder im Verlauf. *Sprache Stimme Gehör*, 26(02), 84–91.
- Kishon-Rabin, L., Taitelbaum-Swead, R., Ezrati-Vinacour, R. & Hildesheimer, M. (2005). Prelexical vocalization in normal hearing and hearing-impaired infants before and after cochlear implantation and its relation to early auditory skills. *Ear and Hearing*, 26(4 Suppl), 17S-29S.

- Kisilevsky, B. S. & Hains, S. M.J. (2011). Onset and maturation of fetal heart rate response to the mother's voice over late gestation. *Developmental science*, 14(2), 214–223.
- Klinke, R., Kral, A. & Hartmann, R. (2001). Sprachanbahnung über elektronische Ohren - So früh wie möglich. *Deutsches Ärzteblatt*, 98(46), A3049-A3052.
- Koivisto, M., Wasz-Höckert, O., Michelsson, K. & Sirvio, P. (1974). Spectrographic analysis of pain cry of hypoglycemia in newborn infants. *XIV International Congress of Pediatrics*, 1, 250.
- Koopmans-van Beinum, F. J., Clement, C. J. & van den Dikkenberg-Pot, I. (2001). Babbling and the lack of auditory speech perception: a matter of coordination? *Developmental science*, 4(1), 61–70.
- Koopmans-van Beinum, F. J. & Van der Stelt, J. M. (1986). Early Stages in the Development of Speech Movements. In B. Lindblom & R. Zetterström (Hrsg.), *Precursors of Early Speech. Proceedings of an International Symposium held at the Wenner-Gren Center, Stockholm, September 19-22, 1984* (S. 37–50). Stockholm: Stockton Press.
- Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 831-843.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(4), 2425–2438.
- Lasky, R. E. & Williams, A. L. (2005). The Development of the Auditory System from Conception to Term. *NeoReviews*, 6(3), e141-e152.
- Lind, J., Vuorenkoski, V., Rosberg, G., Partanen, T. J. & Wasz-Höckert, O. (1970). Spectrographic analysis of vocal response to pain stimuli in Infants with down's syndrome. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 12(4), 478–486.
- Lynch, M. P., Oller, D. K., Steffens, M. L. & Buder, E. H. (1995). Phrasing in prelinguistic vocalizations. *Developmental Psychobiology*, 28(1), 3–25.
- Major, D. R. (1906). *First steps in mental growth; A series of studies in the psychology of infancy*. New York: The Macmillan Company.

- Mampe, B., Friederici, A. D., Christophe, A. & Wermke, K. (2009). Newborns' cry melody is shaped by their native language. *Current Biology : CB*, 19(23), 1994–1997.
- Martin, J. A. M. (1981). Voice, speech and language in the child: Development and Disorder. In G. E. Arnold, F. Winckel & B. D. Wyke (Hrsg.), *Disorders of Human Communication* (Bd. 4). Vienna: Springer Vienna.
- Mathelitsch, L. & Friedrich, G. (2000). *Die Stimme. Instrument für Sprache, Gesang und Gefühl* (Physik-compact Sonderthemen, 1. Aufl.). Wien: öbv & hpt Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- Michelsson, K., Sirviö, P. & Wasz-Höckert, O. (1977). Sound spectrographic cry analysis of infants with bacterial meningitis. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 19(3), 309–315.
- Möller, S. & Schönweiler, R. (1999). Analysis of infant cries for the early detection of hearing impairment. *Speech Communication*, 28(3), 175–193.
- Moon, C., Lagercrantz, H. & Kuhl, P. K. (2013). Language experienced in utero affects vowel perception after birth: a two-country study. *Acta Paediatrica (Oslo, Norway : 1992)*, 102(2), 156–160.
- Moore, D. R. (2002). Auditory development and the role of experience. *British Medical Bulletin*, 63, 171–181.
- Moore, J. K. & Linthicum, F. H. (2007). The human auditory system: a timeline of development. *International Journal of Audiology*, 46(9), 460–478.
- Moura, C. P., Cunha, L. M., Vilarinho, H., Cunha, M. J., Freitas, D., Palha, M. et al. (2008). Voice parameters in children with Down syndrome. *Journal of Voice*, 22(1), 34–42.
- Nathani, S., Ertmer, D. J. & Stark, R. E. (2006). Assessing vocal development in infants and toddlers. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 20(5), 351–369.
- Neville, H. & Bavelier, D. (2006). Human brain plasticity: Evidence from sensory deprivation and altered language experience. In S. Martinez-Conde, S. L. Macknik, L. M. Martinez, J. M. Alonso & P. Tse (Hrsg.), *Visual perception* (Progress in Brain Research, 1st edition, Bd. 138, S. 177–188). Amsterdam: Elsevier.

- Niebuhr-Siebert, S., Schrey-Dern, D. & Springer, P. (2011). Hören und Sprechen. In W. Wendlandt (Hrsg.), *Sprachstörungen im Kindesalter. Materialien zur Früherkennung und Beratung* (Forum Logopädie, 6., aktualisierte Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Oller, D. K. (1980). The emergence of the sound of speech in infancy. Chapter 6. In G. H. Yeni-Komshian, J. F. Kavanagh & C. A. Ferguson (Hrsg.), *Child phonology* (Perspectives in neurolinguistics, neuropsychology and psycholinguistics, S. 93–112). New York: Acad. Press.
- Oller, D. K. (1986). Metaphonology and Infant Vocalizations. In B. Lindblom & R. Zetterström (Hrsg.), *Precursors of Early Speech. Proceedings of an International Symposium held at the Wenner-Gren Center, Stockholm, September 19-22, 1984* (S. 21–35). Stockholm: Stockton Press.
- Oller, D. K. (2000). *The emergence of the speech capacity*. Mahwah, New Jersey: Erlbaum.
- Oller, D. K. & Eilers, R. E. (1988). The Role of Audition in Infant Babbling. *Child Development*, 59(2), 441–449.
- Oller, D. K., Eilers, R. E., Bull, D. H. & Carney, A. E. (1985). Prespeech vocalizations of a deaf infant: a comparison with normal metaphonological development. *Journal of speech and hearing research*, 28(1), 47-63.
- Oller, D. K., Wieman, L. A., Doyle, W. J. & Ross, C. (1976). Infant babbling and speech. *Journal of child language*, 3(1), 1–11.
- Pachtner, S. (2016). *Quantitative Charakterisierung akustischer und phonetischer Eigenschaften kanonischer Babblers von gesunden Kindern mit deutscher Umgebungssprache*. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Patten, E., Belardi, K., Baranek, G. T., Watson, L. R., Labban, J. D. & Oller, D. K. (2014). Vocal patterns in infants with autism spectrum disorder: canonical babbling status and vocalization frequency. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 44(10), 2413–2428.
- Paul, R., Fuerst, Y., Ramsay, G., Chawarska, K. & Klin, A. (2011). Out of the mouths of babes: vocal production in infant siblings of children with ASD. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 52(5), 588–598.

- Pettito, L. A., Katerelos, M., Levy, B. G., Gauna, K., Tetreault, K. & Ferraro, V. (2001). Bilingual signed and spoken language acquisition from birth: implications for the mechanisms underlying early bilingual language acquisition. *Journal of child language*, 28(2), 453–496.
- Probst, R., Grevers, G., Iro, H. & Rosanowski, F. (2008). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. 635 Abbildungen, 5 Tabellen* (3., korrigierte und aktualisierte Aufl.). Stuttgart: G. Thieme Verlag.
- Prochnow, A. (2013). *Der Erwerb melodisch-rhythmischer Grundbausteine im Rahmen der vorsprachlichen Entwicklung – eine vergleichende Analyse der Schreie von schwedischen und deutschen Neugeborenen*. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- Ptok, M. (2004). Frühdiagnostik kindlicher Hörstörungen [Early diagnosis of hearing impairment in children]. *Zeitschrift für ärztliche Fortbildung und Qualitätssicherung*, 98(4), 265–270.
- Ptok, M. (2011). Early detection of hearing impairment in newborns and infants. *Deutsches Ärzteblatt International*, 108(25), 426–431.
- Rvachew, S., Alhaidary, A., Mattock, K. & Polka, L. (2008). Emergence of the corner vowels in the babble produced by infants exposed to Canadian English or Canadian French. *Journal of Phonetics*, 36(4), 564–577.
- Rvachew, S., Creighton, D., Feldman, N. & Sauve, R. (2002). Acoustic-phonetic description of infant speech samples: coding reliability and related methodological issues. *Acoustics Research Letters Online*, 3(1), 24–28.
- Ryalls, J., Baum, S., Samuel, R., Larouche, A., Lacoursière, N. & Garceau, J. (1993). Anticipatory co-articulation in the speech of young normal and hearing-impaired French Canadians. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 28(1), 87–101.
- Schauwers, K., Gillis, S. & Govaerts, P. J. (2008). The Characteristics of prelexical babbling after cochlear implantation between 5 and 20 months of age. *Ear and Hearing*, 29(4), 627-637.
- Scheiner, E., Hammerschmidt, K., Jürgens, U. & Zwirner, P. (2004). The influence of hearing impairment on preverbal emotional vocalizations of infants. *Folia Phoniatrica*

Et Logopaedica: Official Organ of the International Association of Logopedics and Phoniatrics (IALP), 56(1), 27–40.

Schönweiler, R. & Schmidt, C.-M. (2009). Universal auditory screening of neonates and hearing disorders in childhood. *Deutsches Ärzteblatt International*, 106(20), 355–356.

Schünke, M., Schulte, E. & Schumacher, U. (2018). *Kopf, Hals und Neuroanatomie* (Prometheus: Lernatlas der Anatomie, 5., vollständig überarbeitete Auflage). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Seifert, E., Brosch, S., Dinnesen, A. G., Keilmann, A., Neuschaefer-Rube, C., Goldschmidt, O. et al. (2005). Periphere Hörstörungen im Kindesalter. Ergebnisse einer evidenzbasierten Konsensuskonferenz. *HNO*, 53(4), 376–382.

Shehata-Dieler, W., Dieler, R., Keim, R., Finkenzeller, P., Dietl, J. & Helms, J. (2000). Universelle Hörscreening-Untersuchungen bei Neugeborenen mit dem BERaPhon. *Laryngo- Rhino- Otologie*, 79(2), 69–76.

Shehata-Dieler, W., Dieler, R., Wenzel, G., Keim, R., Singer, D. & von Deuster, C. (2002). Das Würzburger Hörscreening-Programm bei Neugeborenen. Erfahrungen bei mehr als 4000 Säuglingen - Einfluss nichtpathologischer Faktoren auf die Messergebnisse. *Laryngo- Rhino- Otologie*, 81(3), 204–210.

Shehata-Dieler, W. & Wermke, K. (2018). From crying to word production – observational study of an identical twin pair with severe hearing disorder. *Speech, Language and Hearing*, 21(2), 81–85.

Silbernagl, S. & Despopoulos, A. (2012). *Taschenatlas Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Sohn, W. & Jörgenshaus, W. (2001). Schwerhörigkeit in Deutschland repräsentative Hörscreening-Untersuchung bei 2000 Probanden in 11 Allgemeinpraxen. *Zeitschrift für Allgemeinmedizin*, 77(3), 143–147.

Soltis, J. (2004). The signal functions of early infant crying. *Behavioral and Brain Sciences*, 27(4), 443–458.

Spencer, P. E. (1993). The Expressive Communication of Hearing Mothers and Deaf Infants. *American Annals of the Deaf*, 138(3), 275–283.

- Spitzer, M. (2014). *Musik im Kopf. Hören, Musizieren, Verstehen und Erleben im neuronalen Netzwerk* (2. Auflage). Stuttgart, Germany: Schattauer.
- Stark, R. E. (1980). Stages of speech development in the first year of life. In G. H. Yeni-Komshian, J. F. Kavanagh & C. A. Ferguson (Hrsg.), *Child phonology* (Perspectives in neurolinguistics, neuropsychology and psycholinguistics, S. 73–92). New York: Acad. Press.
- Stark, R. E., Rose, S. N. & McLagen, M. (1975). Features of infant sounds: the first eight weeks of life. *Journal of child language*, 2(2), 205–221.
- Stark, R. E., Talkin, Heinz, J. M. & Bond, J. (1982). Emergence of vocants in infant utterances. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(S1), S34-S34.
- Stoel-Gammon, C. (1988). Prelinguistic Vocalizations of Hearing-Impaired and Normally Hearing Subjects. *The Journal of speech and hearing disorders*, 53(3), 302–315.
- Stoel-Gammon, C. & Otomo, K. (1986). Babbling development of hearing-impaired and normally hearing subjects. *The Journal of speech and hearing disorders*, 51(1), 33–41.
- Uffelmann, J. (1890). Das zentrale Nervensystem des Kindes und das Seelenleben desselben. *Handbuch der Hygiene*, 700–715.
- Vihman, M. M. (1996). *Phonological development: The origins of language in the child*. Cambridge: Blackwell.
- Wendlandt, W. (Hrsg.). (2011). *Sprachstörungen im Kindesalter. Materialien zur Früherkennung und Beratung* (Forum Logopädie, 6., aktualisierte Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Wendler, J., Seidner, W. & Eysholdt, U. (2015). *Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie* (5., unveränderte Auflage). Stuttgart: Thieme.
- Wermke, K. (2002). *Untersuchung der Melodieentwicklung im Säuglingsschrei von monozygoten Zwillingen in den ersten 5 Lebensmonaten*. Habilitation. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin.
- Wermke, K. & Friederici, A. D. (2004). Developmental changes of infant cries – the evolution of complex vocalizations. *Behavioral and Brain Sciences*, 27(4), 474–475.

- Wermke, K., Leising, D. & Stellzig-Eisenhauer, A. (2007). Relation of melody complexity in infants' cries to language outcome in the second year of life: a longitudinal study. *Clinical linguistics & phonetics*, 21(11-12), 961-973.
- Wermke, K. & Mende, W. (2006). Melody as a primordial legacy from early roots of language. *Behavioral and Brain Sciences*, 29(3), 300.
- Wermke, K. & Mende, W. (2011). From Emotion to Notion: The Importance of Melody. In J. Decety & J. T. Cacioppo (Hrsg.), *The Oxford Handbook of Social Neuroscience* (p. 624-648). Oxford University Press.
- Wermke, K., Mende, W., Kempf, A., Manfredi, C., Brusciaglioni, P. & Stellzig-Eisenhauer, A. (2005). Interaction patterns between melodies and resonance frequencies in infants' pre-speech utterances. *Proceedings of the 4th International Workshop. Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*, 187–190.
- Wermke, K., Mende, W., Manfredi, C. & Brusciaglioni, P. (2002). Developmental aspects of infant's cry melody and formants. *Medical Engineering & Physics*, 24(7-8), 501–514.
- Wermke, K., Pachtner, S., Lamm, B., Voit, V., Hain, J., Kärtner, J. et al. (2013). Acoustic properties of comfort sounds of 3-month-old Cameroonian (Nso) and German infants. *Speech, Language and Hearing*, 16(3), 149–162.
- Wermke, K., Shehata-Dieler, W., Ehrmann-Mueller, D., Wermke, P., Voit, V. & Cebulla, M. (2013). Pre-speech diagnosis in hearing-impaired infants: How auditory experience affects early vocal development. *Speech, Language and Hearing*, 16(2), 99-106.
- Wermke, K., Teiser, J., Yovsi, E., Kohlenberg, P. J., Wermke, P., Robb, M. et al. (2016). Fundamental frequency variation within neonatal crying: Does ambient language matter? *Speech, Language and Hearing*, 19(4), 211–217.
- Wirth, G., Ptok, M. & Schönweiler, R. (2000). *Sprachstörungen, Sprechstörungen, kindliche Hörstörungen. Lehrbuch für Ärzte, Logopäden und Sprachheilpädagogen* (5. Aufl.). Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.
- Witt, G., Landgraf, S. & Pau, H. W. (2003). Die aktive Sprachentwicklung hochgradig hörgeschädigter und gehörloser Kinder in Abhängigkeit von der hörtechnischen Versorgung. *HNO*, 51(10), 839–844.

World Health Organization. (1991). *Report of the Informal Working Group on Prevention of Deafness and Hearing Impairment Programme Planning, Geneva, 18-21 June 1991* (World Health Organization, ed.). Geneva. Verfügbar unter <https://apps.who.int/iris/handle/10665/58839>

World Health Organization. (2010). *Newborn and infant hearing screening. Current issues and guiding principles for action*. Geneva, Switzerland: outcome of a WHO informal consultation held at WHO headquarters 2009.

World Health Organization. (2019). *Deafness and hearing loss*. Verfügbar unter <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>

Zahnert, T. (2011). The differential diagnosis of hearing loss. *Deutsches Ärzteblatt International*, 108(25), 433-43.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt zunächst Frau Professorin Dr. Angelika Stellzig-Eisenhauer, der Direktorin der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universitätsklinik Würzburg und Frau Professorin Dr. Kathleen Wermke, Leiterin des Zentrums für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES). Diese haben mir die Promotion am Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen der Poliklinik für Kieferorthopädie überhaupt erst ermöglicht.

Frau Professorin Dr. Kathleen Wermke hat mich während der gesamten Promotionszeit mit großem zeitlichem Engagement betreut. Ihr gilt mein ganz besonderer Dank für die unermüdliche und geduldige Unterstützung sowie für die vielen fachlichen und persönlichen Gespräche, die mich immer wieder herausgefordert und vorangebracht haben.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau Professorin Dr. Shehata-Dieler, Leitende Ärztin der Audiologie, Pädaudiologie, Elektrophysiologie und Phoniatrie der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen der Universität Würzburg, durch deren Kooperation mit dem ZVES das der Arbeit zugrundeliegende Projekt ermöglicht wurde.

Herrn Peter Wermke danke ich für die kompetente Unterstützung vor allem im EDV-Bereich. Danke für die stetige, zuverlässige Hilfsbereitschaft bei der Datenauswertung und -aufbereitung.

Den MitarbeiterInnen des ZVES danke ich für die Zusammenarbeit, insbesondere möchte ich hier Fabian Clad, meinem Projektmitstreiter danken, ohne den die Promotionszeit nicht halb so schön gewesen wäre. Danke für die angenehme Zeit die wir so, trotz vieler Höhen und Tiefen, gemeinsam hatten.

Tausend Dank an meinen Freund Max, der mir in unzähligen Stunden liebevoll und tatkräftig zur Seite stand. Danke, dass du immer an mich glaubst.

Von ganzem Herzen möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich immer unterstützen und mir diesen Weg ermöglicht haben.