

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

**Pilotuntersuchung zur Anwendbarkeit
einer Phonations-Artikulations-Interaktionsanalyse
zur Charakterisierung artikulatorischer Mechanismen
in kanonischen Babbellauten von Säuglingen
mit hochgradiger sensorineuraler Hörminderung**

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

**vorgelegt von
Johanna Keck
aus Aschaffenburg**

Würzburg, März 2017

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

Koreferentin: Prof. Dr. ET Wafaa Shehata-Dieler

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 08.12.2017

Die Promovendin ist Ärztin.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Spracherwerb als Ergebnis physiologischer Reifungs- und komplexer Lernprozesse und die Bedeutung einer frühen Diagnose und Therapie Sensorineuraler Hörstörungen	1
1.2.	Begründung der Auswahl des Beobachtungszeitraums: Die Rolle der kanonischen Babbelphase bei der vorsprachlichen Entwicklung auf dem Weg zur reifen Artikulation.....	8
1.3.	Die Testung der PAI-Methode zur Untersuchung der artikulatorischen Aktivität in der kanonischen Babbelphase bei Kindern mit sensorineuraler Hörbeeinträchtigung	12
1.4.	Zielsetzung.....	14
2.	Material und Methoden	16
2.1.	Testmaterial (Vokalisationen)	16
2.2.	Probanden (HI-Kinder und Referenzproband R-GG)	17
2.3.	Erstellung vorsprachlicher Entwicklungsprofile und Identifikation der kanonischen Babbelphase.....	21
2.4.	Datenbasis, Einzelsignalauswahl und Datenbearbeitungsschritte	25
2.5.	Qualitative und quantitative Analyse von Artikulationsphänomenen mithilfe der PAI-Methode.....	31
2.6.	Statistische Verfahren.....	37
3.	Ergebnisse	38
3.1.	Testung der Anwendbarkeit der PAI-Methode zur Charakterisierung artikulatorischer Vorgänge in kanonischen Babbellauten	38
3.2.	Entwicklung einer geeigneten Messroutine zur Charakterisierung artikulatorischer Vorgänge in kanonischen Babbellauten anhand der PAI-Methode	47
3.3.	Entwicklung spezieller Parameter zur Untersuchung kanonischer Babbellaute mithilfe der PAI-Methode.....	52
3.4.	Deskriptive Analyse akustischer Kenngrößen der untersuchten Vokalisationen ...	55
3.4.1.	Analyse der mittleren Grundfrequenz F_{0_gM} der Vokalisationen.....	56
3.4.2.	Analyse der mittleren Resonanzfrequenz R_{1_gM} der Vokalisationen.....	60

3.5.	Deskriptive Analyse temporaler Kenngrößen zur Charakterisierung der artikulatorischen Aktivität in kanonischen Babbelsilben	63
3.5.1.	Analyse der aktiven Vokalartikulationszeit (AVT [ms]) zur Beschreibung artikulatorischer Vorgänge bei der Bildung vokalischer Silbenelemente	69
3.5.2.	Analyse der exakten Babbelsilbendauer (exakte Silbendauer [ms])	72
3.5.3.	Analyse der mittleren Babbelsilbendauer (mittlere Silbendauer [ms])	74
3.5.4.	Analyse der mittleren Anzahl der Babbelsilben pro Sekunde ([Silben/s]) als Maß für die Artikulationsgeschwindigkeit	77
3.5.5.	Analyse der Resonanzübergangszeit RÜ [ms] zur Charakterisierung konsonantischer Silbenelemente	78
3.5.6.	Analyse der Dauer der Segmentierungspausen	84
4.	Diskussion	86
4.1.	Vergleich der individuellen vorsprachlichen Entwicklungsprofile und des zeitlichen Ablaufs beim Erwerb kanonischer Merkmale.....	86
4.2.	Interpretation der deskriptiven Datenanalyse für akustische Kenngrößen	88
4.2.1.	Diskussion der Analyse der mittleren Grundfrequenz F_{0_gM}	88
4.2.2.	Diskussion der Analyse der mittleren Resonanzfrequenz R_{1_gM}	92
4.3.	Interpretation der Testergebnisse für die temporalen Kenngrößen	95
4.3.1.	Diskussion der Analyse der Dauer der vokalischen Silbenelemente (aktive Vokalartikulationszeit)	96
4.3.2.	Diskussion der Analyse der exakten und der mittleren Babbelsilbendauer	97
4.3.3.	Diskussion der Analyse der mittleren Anzahl der Babbelsilben pro Sekunde ([Silben/s]) als Maß für die mittlere Artikulationsgeschwindigkeit.....	99
4.3.4.	Diskussion der Analyse der Resonanzübergangszeit zur Charakterisierung konsonantischer Silbenelemente und zur Definition der Kanonizität	101
4.3.5.	Diskussion des Konsonantrepertoires	103
4.3.6.	Diskussion der Dauer der Pausenelemente	105
4.4.	Eignet sich die PAI-Methode zur Evaluation der Artikulationsentwicklung bei sensorineural hörbeeinträchtigten Säuglingen und Kleinkindern?	106
5.	Zusammenfassung	109
6.	Literaturverzeichnis.....	111

Abkürzungsverzeichnis

AABR	englisch für automatisierte Hirnstammaudiometrie (automated auditory brainstem response)
AVT	aktive Vokalartikulationszeit (T für englisch „time“)
BERA	englisch für Hirnstammaudiometrie (brainstem evoked response audiometry)
C	konsonantisches Silbenelement
CI	Cochleaimplantat
CHC	Comprehensive Hearing Center der Universitätsklinik Würzburg
d	englisch für Tag (day)
HDO	„hinter dem Ohr“ getragenes Hörgerät
HI	englisch für hörbeeinträchtigt (hearing impaired)
LCP	linear predictive coding (Verfahren zur Audiosignal-/ Sprachverarbeitung)
aM	arithmetischer Mittelwert
gM	geometrischer Mittelwert
Max	Maximum
Med	Median
Min	Minimum
N	Anzahl (englisch „number“)
Nuk	Vokalnukleus
PAI	Phonations-Artikulations-Interaktion
RA	Resonanzabgangszeit
RÜ	Resonanzübergangszeit
std	Standardabweichung (englisch „standard deviation“)
TEOAE	transitorisch evozierte otoakustische Emission
V	vokalisches Silbenelement
ZVES	Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklungsprofil für Proband HI-GA.....	23
Abbildung 2: Entwicklungsprofil für Proband HI-GB.....	24
Abbildung 3: Entwicklungsprofil für Proband HI-GD.....	24
Abbildung 4: Entwicklungsprofil für Proband HI-GH.....	25
Abbildung 5: Vorgehensweise bei der Datenanalyse und Methodentestung	28
Abbildung 6: Maske des Moduls Formant/Melodie-Interaktion im CDAP-Programm.....	33
Abbildung 7: Einschwingen (E)	34
Abbildung 8: Übergang nach oben (Uno)	35
Abbildung 9: Übergang nach unten (Unu)	35
Abbildung 10: Freilauf (F) und Noise (N)	36
Abbildung 11: Testsignal des hörgesunden Probanden R-GG (280. Lebensstag)	40
Abbildung 12: Testsignal des hörgesunden Probanden R-GG (333. Lebensstag)	41
Abbildung 13: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GA (352. Lebensstag)	42
Abbildung 14: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GB (345. Lebensstag)	43
Abbildung 15: Neunsilbiger kanonischer Babbellaut, Proband HI-GB (439. Lebensstag)	44
Abbildung 16: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GD (445. Lebensstag)	45
Abbildung 17: Tuningdiagramm eines kanonischen Babbellautes von Proband HI-GD	45
Abbildung 18: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GH (259. Lebensstag)	46
Abbildung 19: Tuningdiagramme für kanonische Babbellaute von Proband HI-GH.....	47
Abbildung 20: Tuningdiagramme kanonischer / präkanonischer Laut im Vergleich	49
Abbildung 21: PAI-Diagramm mit Bezug auf die Silbenstruktur eines Babbellautes	52
Abbildung 22: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für F_0_gM , Kategorie 1	58
Abbildung 23: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für F_0_gM , Kategorie 2	58
Abbildung 24: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für F_0_gM , Kategorie 3	59
Abbildung 25: Verteilungseigenschaften für F_0_gM , Kategorie 3, Einzelkindvergleich	60
Abbildung 26: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für $R1_gM$, Kategorie 3	62
Abbildung 27: Verteilungseigenschaften für $R1_gM$, Kategorie 3, Einzelkindvergleich	63
Abbildung 28: Verteilungseigenschaften der aktiven Vokalartikulationszeit AVT[ms]	71
Abbildung 29: Verteilungseigenschaften der aktiven Vokalartikulationszeit AVT [ms] im Einzelkindvergleich.....	71

Abbildung 30: Verteilungseigenschaften der AVT [ms] bezogen auf die Anzahl der Babbelsilben je Vokalisation.....	71
Abbildung 31: Verteilungseigenschaften der exakten Silbendauer (RÜ+Nuk+RA) im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b).....	73
Abbildung 32: Verteilungseigenschaften der exakten Silbendauer (RÜ+Nuk+RA) aller kanonischer Babbelsilben im Einzelkindvergleich	73
Abbildung 33: Verteilungseigenschaften der mittleren Silbendauer der untersuchten kanonischen Babbelsilben im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b)	75
Abbildung 34: Verteilungseigenschaften der mittleren Silbendauer im Einzelkindvergleich ...	76
Abbildung 35: Verteilungseigenschaften der mittleren Artikulationsgeschwindigkeit im Einzelkindvergleich.....	78
Abbildung 36: Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b)	80
Abbildung 37: Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit im Einzelkindvergleich.....	81
Abbildung 38: Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit differenziert nach dem jeweiligen konsonantischen Elementen der Silben	82
Abbildung 39: Scatterplot mit Auftragung der mittleren Silbendauer und der Resonanzübergangszeit.....	83
Abbildung 40: Verteilungseigenschaften der Dauer der Segmentierungspausen aus den Babbelvokalisationen im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b).....	85
Abbildung 41: Verteilungseigenschaften der Dauer der Segmentierungspausen im Einzelkindvergleich	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einschlusskriterien der Probanden (HI-Kinder).....	19
Tabelle 2: Hörleistung und Hörgeräteversorgung der Probanden.....	20
Tabelle 3: Übersicht über die Datenbasis.....	26
Tabelle 4: Einschlusskriterien der Vokalisationen für die PAI-Analyse.....	26
Tabelle 5: Messgrößen für die Analyse kanonischer Babbelsilben mit der PAI-Methode...	54
Tabelle 6: Deskriptive Statistik für die mittlere Grundfrequenz F_0_gM	56
Tabelle 7: Deskriptive Statistik für die mittlere erste Resonanzfrequenz R_1_gM	60
Tabelle 8: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GA	64
Tabelle 9: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GB	65
Tabelle 10: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GD.....	66
Tabelle 11: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GH.....	67
Tabelle 12: Deskriptive Statistik für die aktive Vokalartikulationszeit AVT.....	69
Tabelle 13: Deskriptive Statistik für die exakte Babbelsilbendauer ($R\ddot{U}+Nuk+RA$).....	72
Tabelle 14: Deskriptive Statistik für die mittlere Babbelsilbendauer.....	74
Tabelle 15: Deskriptive Statistik für die mittlere Artikulationsgeschwindigkeit (AG).....	77
Tabelle 16: Deskriptive Statistik für die Resonanzübergangszeit ($R\ddot{U}$).....	79
Tabelle 17: Analyse der Resonanzübergangszeit in Abhängigkeit von den konsonantischen Elementen C der Silbe (Gesamtkorpus der Babbelsilben).....	81
Tabelle 18: Deskriptive Statistik für die Dauer der Segmentierungspausen der untersuchten kanonischen Babbellaute.....	84

1. Einleitung

1.1. Spracherwerb als Ergebnis physiologischer Reifungs- und komplexer Lernprozesse und die Bedeutung einer frühen Diagnose und Therapie sensorineuraler Hörstörungen

Sprache ist ein zentrales Mittel menschlicher Kommunikation – nicht oder nur eingeschränkt hören und sprechen zu können stellt in einer zu großen Anteilen verbal kommunizierenden Lern- und Arbeitsumgebung ein großes Hindernis dar. Wie rasant der Sprachentwicklungsprozess bei Kindern verläuft, zeigt die Tatsache, dass hörgesunde Kinder im Durchschnitt bis zu einem Alter von 18 Monaten ein Sprachstadium erreicht haben, in dem sie etwa 100-150 Wörter und einfache Sätze verstehen können und in dem sie in der Lage sind, etwa 20-30 Wörter selbst zu produzieren (Grimm, 2003). Die schließlich am Ende des Sprachentwicklungsprozesses erlangte Sprachfähigkeit setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die drei Kompetenzbereichen zugeordnet werden können (Grimm, 2008): Der prosodischen Kompetenz, charakterisiert durch ihre suprasegmentalen Komponenten wie Melodie, Betonung, Rhythmus, Frequenz und Pausenregime, der linguistischen Kompetenz mit Merkmalen wie Phonologie, Morphologie, Syntax, Wort- und Satzbedeutung, und der pragmatischen Kompetenz, die sich in Fähigkeiten wie Sprachhandlung, Konversationssteuerung und der Möglichkeit des Diskurses ausdrückt. Nach heutigem Stand der Forschung sind der Erwerb und die Beherrschung der sprachrelevanten Kompetenzen weder ausschließlich durch Konditionierung erlernt, wie von Skinner postuliert (Skinner, 1957), noch liegen sie allein als eine Art angeborene Phonetik oder Universalgrammatik vor, wie Chomsky vermutete (Chomsky, 1959). Vielmehr beeinflussen in diesem Evolutionsprozess sowohl Lernstrategien als auch die Spezifika der auditorischen Verarbeitung das Wesen des Spracherwerbs: Säuglinge bringen kognitive Strategien zum Erkennen zielsprachlicher Muster mit, die zusammen mit der auditiven Wahrnehmung und Rückkopplung einen Spracherwerb möglich machen (Kuhl, 2000).

Dabei stellt sich die Entwicklung sprachlicher Kompetenzen und der Erwerb der Eigenschaften und Besonderheiten der späteren Zielsprache nach heutiger Erkenntnis als mehrstufiger Prozess dar, der bereits vor der Geburt eines Kindes in utero mit dem Erlernen erster prosodischer Merkmale als Grundlage menschlicher Sprache beginnt und anschließend das Durchlaufen der weiteren vorsprachlichen Entwicklungsschritte voraussetzt. Zu Beginn des dritten Trimenons der Schwangerschaft sind beim Feten die

anatomischen und physiologischen Voraussetzungen für die auditive Wahrnehmung so weit ausgereift, dass Melodie und Rhythmus als prosodische Elemente der mütterlichen Sprache über die Knochenleitung intrauterin wahrgenommen und akustisch evozierte Potentiale hervorgerufen werden können (Ullal-Gupta, Vanden Bosch der Nederlanden, Tichko, Lahav & Hannon, 2013; Moore & Linthicum, 2007; Eggermont & Moore, 2012; Gerhardt et al., 1996; Starr, Amlie, Martin & Sanders, 1977). So sind Frühgeborene ab einem Gestationsalter von 30 Wochen in der Lage, verschiedene Vokale wahrzunehmen (Cheour-Luhtanen et al., 1996), Feten ab der 32. Schwangerschaftswoche können die Stimme ihrer Mutter von anderen Stimmen unterscheiden (Kisilevsky & Hains, 2011), und Neugeborene erbringen bereits erstaunliche Leistungen bei der Erkennung von melodischen Variationen in der Musik (Perani et al., 2010). Ebenfalls als Ergebnis dieser frühen Lernprozesse zeigt sich, dass hörgesunde Neugeborene bereits kurz nach der Geburt prosodische Elemente ihrer Muttersprache nicht nur erkennen, sondern diese auch in ihren eigenen frühesten Lautäußerungen reflektieren: Durch eine vergleichende Studie von Mampe und Wermke (Mampe, Friederici, Christophe & Wermke, 2009) an Neugeborenen deutsch- und französischsprachiger Mütter konnte erstmals gezeigt werden, dass Säuglinge schon ab dem Zeitpunkt der Geburt Elemente der für die jeweilige Umgebungssprache typischen Intonationsmuster bei der eigenen Lautproduktion in ihren Weinauten bevorzugen.

Ab dem Zeitpunkt der Geburt durchlaufen Säuglinge dann verschiedene vorsprachliche Lautproduktionsphasen, die in der Literatur im Detail variieren, jedoch hinsichtlich der sequentiellen Abfolge einheitlich charakterisiert werden (siehe Vihmann, 1996; Stoel-Gammon & Menn, 1997; infraphonologisches Modell / Oller, 2000). Das Durchlaufen dieser Entwicklungsphasen ist ein essentieller Schritt zum Erwerb der Zielsprache, da neben universellen Grundlagen der Phonation und Artikulation spezifische zielsprachliche Elemente erworben werden, welche die Kinder während dieser Zeit aus ihrer Umgebung aufnehmen (Oller, 2000). Für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit, wie auch bereits bei vorhergehenden Analysen am Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES) der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg¹ in Kooperation mit der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen der Universität Würzburg, diente die folgende, allgemein gebräuchliche Phasenvorstellung als Grundlage für die Klassifikation der untersuchten Komfortlaute (siehe Shehata-Dieler et al., 2013): Auf

¹<http://www.kieferorthopaedie.ukw.de/zentrum-fuer-vorsprachliche-entwicklung-und-entwicklungsstoerungen.html>, 06.03.2017

eine Phase überwiegender Phonation im Alter von 0-2 Monaten folgt im Alter von etwa 3 Monaten, jedoch mit großer interindividueller Variabilität und teilweise sogar schon früher, die Phase der primitiven Artikulation, gekennzeichnet durch das typische Gurren als vorherrschenden Vokalisationstyp. Im Alter von etwa 4-8 Monaten tritt bei gesunden Kindern die Phase des marginalen / präkanonischen Babbelns auf, das durch primitive Silbenbildungen gekennzeichnet ist. Danach folgt die Phase des kanonischen Babbelns, charakterisiert durch die Bildung wohlgeformter Silben und repetitiver Silbenfolgen mit teils unterschiedlichen konsonantischen Anteilen. Der Zeitpunkt des Beginns der kanonischen Babbelphase mit Silben, die bereits zeitliche Eigenschaften der Umgebungssprache aufweisen, variiert interindividuell sehr stark und liegt in einer Altersspanne von etwa 5-10 Monaten. Im Alter von etwa 10 - 18 Monaten wird häufig eine Jargon-Phase beobachtet, die durch Babbelvokalisationen charakterisiert ist, die bereits viele sprachspezifische prosodische Merkmale, jedoch noch keine in der Zielsprache existenten Wörter enthält. Die Produktion erster Wörter erfolgt in der Regel ab dem 10.-11. Lebensmonat und ist durch spontanen und situationsgerechten Wortgebrauch charakterisiert. Voraussetzung für das ungehinderte Ablaufen dieser Entwicklungsprozesse auf dem Weg zum Spracherwerb im engeren Sinne sind das Hören und die auditive Rückkopplung, also die Fähigkeit der auditiven Wahrnehmung sowohl der spezifischen prosodischen Elemente der Umgebungssprache als auch der prosodischen Elemente der eigenen Lautproduktionen (Möller & Schönweiler, 1999; W. Shehata-Dieler et al., 2013). Nach heutigem Stand der Forschung spielt diese bereits während der vorsprachlichen Entwicklungsphasen eine wichtige Rolle und beeinflusst sowohl zeitliche als auch frequenzkorrelierte Kenngrößen frühester Vokalisationen: So konnten Wermke et al. in ihrer Studie zeigen, dass die Stabilität der Grundfrequenz der Lautproduktionen mit dem Alter der untersuchten hörgesunden Säuglinge zunahm und schließlich einer solchen ähnelte, wie sie auch beim intentionalen Singen eines Tons beobachtet werden kann – ein Lernprozess, der ohne auditive Rückkopplung schwer denkbar scheint (Wermke, Mende, Manfredi & Brusciaglioni, 2002). Einen Hinweis auf die Beeinflussung der frühestens Lautäußerungen durch die auditive Rückkopplung liefert vor allem auch der Vergleich der Vokalisationen hörgesunder und hörbeeinträchtigter Säuglinge: Möller und Schönweiler demonstrierten in einer Studie an 29 Säuglingen im Alter zwischen 2,5 und 12 Monaten mithilfe von Hörversuchen und Spektralanalysen, dass sich die Lautproduktionen sensorineural hörbeeinträchtigter Säuglinge von denen nicht hörbeeinträchtigter Säuglinge hinsichtlich

ihres Frequenzspektrums, ihres Rhythmus und ihrer Melodie unterscheiden (Möller & Schönweiler, 1999).

Ist die auditive Wahrnehmung und Rückkopplung in den frühen Phasen der vorsprachlichen und sprachlichen Entwicklung durch eine sensorineurale Hörminderung beeinträchtigt, wirkt sich dies auf den Prozess des Spracherwerbs aus. So zeigte sich in einer frühen Studie von Szagun bereits, dass die Sprachleistungen bei Kindern, die ihr Cochleaimplantat vor Erreichen eines Alters von vier Jahren erhielten, besser waren als die später implantierter Kinder (Szagun, 2001). Die Hörleistung des Restgehörs vor der Versorgung mit einem Cochleaimplantat stellte sich dabei als zuverlässigerer Vorhersagewert für die Sprachentwicklung nach Implantation dar, als das bloße Alter eines Kindes bei Cochleaimplantation: Eine bessere Hörleistung vor Implantation führte zu einem rascheren Fortschritt beim Erwerb von Wörtern und Grammatik, was die Wichtigkeit früher auditiver Rückkopplungsprozesse unterstreicht. Auch in einer späteren Studie von Hehar et al. konnte gezeigt werden, dass Kinder, die vor dem zweiten Lebensjahr ein Cochleaimplantat erhielten, zwei Jahre später ein mindestens ebenso gutes wenn nicht besseres Ergebnis in ihren Sprachleistungen erzielen konnten als Kinder, die erst zwischen dem zweiten bis fünften Lebensjahr implantiert wurden (Hehar, Nikolopoulos, Gibbin & O'Donoghue, 2002). Mit der komplexen Beziehung zwischen der Trainingsmethode (gesprochene Sprache, Gebärdensprache oder beide), dem Alter bei Implantation, der Dauer der Nutzung eines Cochleaimplantates und dem erzielten Sprachergebnis beschäftigt sich eine Studie von Connor et al.: Das Alter bei Cochleaimplantation scheint dabei für den Spracherwerb entscheidender als die reine Nutzungsdauer eines Implantates. So erlebten Kinder, die vor einem Alter von 2,5 Jahren implantiert wurden, sowohl in Bezug auf artikulatorische Fertigkeiten als auch auf die Entwicklung des Wortschatzes einen Entwicklungssprung, der bei Implantation in erst höherem Lebensalter weniger ausgeprägt war. Im Längsschnitt zeigte sich zudem ein besseres Sprachergebnis bei insgesamt längerer Tragedauer aufgrund der frühen Implantation (Connor, Craig, Raudenbush, Heavner & Zwolan, 2006). Yoshinaga-Itano et al. fanden signifikant bessere Sprachentwicklungsergebnisse für Kinder, die vor einem Alter von 6 Monaten diagnostiziert und mit Hörhilfen versorgt wurden als für Kinder, die erst nach dem 6. Lebensmonat versorgt wurden. Selbst das Erkennen geringgradiger Hörstörungen vor Erreichen dieses Alters und die nachfolgende Versorgung mit Hörhilfen zeigten in dieser Studie einen nachweislichen Vorteil für die Sprachentwicklung (Yoshinaga-Itano, Sedey, Coulter & Mehl, 1998). Die Ergebnisse einer detaillierten Längsschnittstudie von Shehata-Dieler et al. am Comprehensive Hearing

Center (CHC) und am Zentrum für vorsprachliche Entwicklung- und Entwicklungsstörungen Würzburg (ZVES) an drei Säuglingen mit hochgradiger Hörminderung legen nahe, dass unzureichende auditive Erfahrungen die sprachliche Entwicklung bereits lange vor Erreichen der kanonischen Babbelphase beeinflussen: Der individuelle zeitliche Ablauf beim Erreichen der verschiedenen (vor-) sprachlichen Entwicklungsstufen vom Gurren bis zur Produktion erster Wörter zeigte sich abhängig von der Länge des Zeitraums, in dem die Kinder ohne adäquate auditorische Stimulation waren (W. Shehata-Dieler et al., 2013). Dies bestätigt die Annahme, dass hörbeeinträchtigte Kinder durch eine möglichst frühe Diagnose und eine bereits während der vorsprachlichen Entwicklung beginnende adäquate Hörhilfenversorgung in ihrem Spracherwerb gefördert werden können. Die frühe Diagnosestellung einer Hörbeeinträchtigung und die frühzeitige, individuell optimierte Anpassung adäquater Hörhilfen leisten also einen essentiellen Beitrag zur Vermeidung von Langzeitfolgen einer Störung auditiver Rückkopplungsmechanismen.

Das Alter bei Diagnosestellung einer Hörbeeinträchtigung und bei der Erstversorgung mit Hörhilfen hat sich in den letzten Jahren, dank einer Weiterentwicklung der diagnostischen Möglichkeiten zur Früherkennung bereits bei jungen Säuglingen und Neugeborenen, immer weiter nach vorn verschoben. So lag in einer Erhebung von Finck-Krämer et al. mit Daten aus Deutschland das Alter bei Diagnosestellung einer schweren Innenohrschwerhörigkeit im Jahr 1998 noch bei durchschnittlich 19 Lebensmonaten (Finckh-Krämer, Spormann-Lagodzinski, Nubel, Hess & Gross, 1998), für mittelgradige bis leichte Schwerhörigkeit sogar deutlich höher bei bis zu sechs Jahren (Schade, 2008). Bei der Analyse der Patientendaten der Klinik für Phoniatrie und Pädaudiologie der Universitätsklinik Marburg zeigte sich, dass das durchschnittliche Diagnosealter bei Kindern mit Hörbeeinträchtigung im Jahr 2000 noch bei 64 Monaten lag und nach Einführung eines regionalen Neugeborenenhörscreenings im Jahr 2005 auf 8,6 Monate gesenkt werden konnte (Berger et al., 2012). Mithilfe objektiver Diagnoseverfahren wie dem Messen transitorisch evozierter otoakustischer Emissionen (TEOAE), der automated auditory brainstem response (AABR) oder brainstem evoked response audiometry (BERA) ist es möglich, eine Hörstörung ohne die aktive Mitarbeit des Patienten bzw. auch beim schlafenden oder sedierten Patienten sehr zuverlässig und genau zu diagnostizieren. Die Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen der Universität Würzburg war die erste Einrichtung deutschlandweit, die ab 1997 ein zweistufiges, BERA-basiertes Neugeborenenhörscreening einsetzte (Shehata-Dieler, Dieler, Keim & von Deuster, 2002).

Damit konnte das Alter bei Diagnosestellung für Kinder, die primär über das Würzburger Screeningprogramm erfasst wurden, auf durchschnittlich 3 Monate gesenkt werden (Shehata-Dieler et al., 2008). Seit Einführung des universellen Neugeborenenhörscreenings in Deutschland zum 01.01.2009 konnte in einer ersten Multicenteranalyse aus vier Bundesländern für die Daten bis zum Jahr 2012 gezeigt werden, dass das durchschnittliche Alter der Kinder bei Diagnosestellung aus den berücksichtigten Kohorten von durchschnittlich 4,8 Monaten im Jahr 2009 auf 4,2 Monate im Jahr 2012 zurückgegangen war. Das durch das universelle Neugeborenenhörscreening angestrebte Ziel einer Diagnosestellung spätestens bis zum Alter von drei Monaten und einer Hörhilfenversorgung spätestens bis zum Alter von sechs Monaten wurde damit noch nicht erreicht, es konnte jedoch bereits ein deutlicher Zeitgewinn verzeichnet werden (Matulat et al., 2014).

Nach erfolgter Diagnosestellung und Hörgeräteanpassung oder CI-Implantation stellt sich mit dem Adjustieren der Hörhilfen zur Optimierung der individuellen Hörleistung gerade bei Kindern unter 12 Monaten jedoch eine schwierige Aufgabe: Wie kann der individuelle Nutzen einer angepassten Hörhilfe objektiv festgestellt werden, wenn Kriterien wie beispielsweise der Umfang des Wortschatzes oder das Sprachverständnis aufgrund des vorsprachlichen Entwicklungsstadiums des Kindes noch nicht greifen, und bisher nur wenig Kenntnisse über Normwerte oder Pathologien vorsprachlicher Vokalisationen vorliegen? Ein Grund für diesen unbefriedigenden Forschungsstand ist die Schwierigkeit, Hörleistung und deren direkten Einfluss auf die vorsprachlichen Lautproduktionen von Säuglingen messbar zu machen. Weltweit existieren bisher nur 14 publizierte Studien, die vorsprachliche Vokalisationen hörgeminderter Säuglinge in einem Alter unter 12 Monaten untersucht haben: Die bereits erwähnte Studie von Möller und Schönweiler stellt die bisher systematischste Studie an den frühestens Weinlauten hörbeeinträchtigter Säuglinge im Vergleich zu normalhörenden Säuglingen mit deutscher Umgebungssprache dar. Sie basiert allerdings auf Vokalisationen von Säuglingen sehr unterschiedlichen Alters und vernachlässigt dadurch bei der Auswertung den Einfluss vorsprachlicher Entwicklungsprozesse auf die Lauteigenschaften. Die drei Studien an normalhörenden und hörbeeinträchtigten Säuglingen mit ungarischer Umgebungssprache von Várallyay et al. untersuchen Melodiebögen und Grundfrequenzspektren von Weinlauten (Schmerzschreien), allerdings wurden auch hier durch einen breiten Altersbereich Alterseffekte und Entwicklungsphänomene vernachlässigt und die zugrundeliegende Hörleistung pädaudiologisch unzureichend berücksichtigt (Várallyay Jr., 2004; Várallyay Jr., Benyó &

Illényi, 2007; Várallyay Jr., Illényi, Benyó, Farkas & Katona, 2005). Die weiteren vorliegenden vergleichenden Studien schlossen teils Kleinkinder >12 Monate und generell Säuglinge einer sehr breiten Altersspanne ein oder untersuchten die vorsprachlichen Vokalisationen mittels der für dieses Alter sehr fehlerbehafteten Transkriptionsmethode oder aber gingen rein deskriptiv vor. Dabei zeigten sich vor allem Verzögerungen des Beginns und der Dauer vorsprachlicher Phasen. Akustische Eigenschaften der vokalischen Elemente sowie die zeitliche Organisation konsonantischer und vokalischer Elemente und der jeweiligen Übergänge wurden bisher nicht systematisch untersucht (Oller, Eilers, Bull & Carney, 1985; Stoel-Gammon & Otomo, 1986; Stoel-Gammon, 1988; Koopmans-van Beinum, Clement & van den Dikkenberg-Pot, 2001; Clement, 2004; Schauwers, Gillis, Daemers, De Beukelaer & Govaerts, 2004; Scheiner, Hammerschmidt, Jürgens & Zwirner, 2004; Moeller et al., 2007; Nathani, Oller, & Neal, 2007; Schauwers, Gillis & Govaerts, 2008; Iyer & Oller, 2008).

Am Universitätsklinikum Würzburg wird im Rahmen gemeinsamer Projekte zwischen dem ZVES am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kiefergesundheit und dem Comprehensive Hearing Center (CHC) an der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen des Universitätsklinikums Würzburg daran gearbeitet, Normwerte und Pathologien früher Säuglingsvokalisationen durch die Analyse ausgesuchter akustischer Merkmale zu ermitteln, indem akustische Eigenschaften dieser Vokalisationen in Abhängigkeit von der individuellen Hörfähigkeit untersucht werden: Durch die enge Kopplung des auditiv-vokalen Systems scheint es wahrscheinlich, dass sich eine auditive Beeinträchtigung und/oder eine nicht ausreichende Versorgung mit einer Hörhilfe bereits frühzeitig anhand akustischer Merkmalskonstellationen identifizieren lassen. Die Vokalisationen hochgradig sensorineural hörgeminderter Säuglinge weisen, wie in der Pilotstudie von Shehata-Dieler et al. gezeigt werden konnte, teilweise akustische Eigenschaften auf, die möglicherweise geeignete Parameter für die Entwicklung von Risikomarkern darstellen (Shehata-Dieler et al., 2013). Die Bedeutung der Entwicklung solcher Risikomarker oder Frühindikatoren liegt darin, zukünftig die teilweise subjektiven pädaudiologischen Verfahren bei der individuellen Optimierung von Hörhilfen für sensorineural hörbeeinträchtigte Säuglinge eventuell durch ein objektives Zusatzverfahren ergänzen zu können. Ein Kooperationsprojekt zwischen dem ZVES und dem CHC des Universitätsklinikums Würzburg, in dessen Rahmen auch die vorliegende Arbeit entstanden ist, geht daher der Frage nach, ob und wie sich eingeschränkte Hörleistungen in messbaren akustischen Eigenschaften von

Säuglingsvokalisationen widerspiegeln. Die vorliegende Arbeit ist in diese Projekte eingebettet.

Ziel dieser Arbeit war es, die Methode der Phonations-Artikulations-Interaktionsanalyse (kurz PAI-Methode) – eine am ZVES entwickelte und etablierte Methode zur Analyse der Interaktion zwischen der Melodie und ihren Resonanzfrequenzen, die bereits in einer Arbeit von Kempf zur Untersuchung der Vokalisationen von Säuglingen mit orofazialer Spaltbildung zum Einsatz kam (Kempf, 2008) – als mögliche objektive Methode zur Artikulationsanalyse auf ihre Anwendbarkeit bei Säuglingen mit sensorineuraler Hörminderung zu testen und spezifische Artikulationscharakteristika dieser Vokalisationen herauszuarbeiten. Dies soll es in Zukunft ermöglichen, den Stand der Artikulationsentwicklung zu evaluieren und dadurch objektive Kriterien zur Optimierung der Feineinstellung von Hörhilfen bei Säuglingen und Kleinkindern bereits während der so wichtigen vorsprachlichen Entwicklungsphasen zu finden.

Im Weiteren wird zuerst die Auswahl des Beobachtungszeitraumes begründet, die Methode beschrieben und sodann die Auswahl der Testprobanden dargelegt. Es folgt die Beschreibung der Ermittlung der vorsprachlichen Entwicklungsphasen jedes einzelnen Probanden und, daraus hervorgehend, die Auswahl der zu untersuchenden Testsignale. Die Ergebnisse der Methodentestung und der Messungen werden im Ergebnisteil beschrieben und schließlich im letzten Kapitel der Arbeit diskutiert.

1.2. Begründung der Auswahl des Beobachtungszeitraums: Die Rolle der kanonischen Babbelphase bei der vorsprachlichen Entwicklung auf dem Weg zur reifen Artikulation

Für die Testung der Phonations-Artikulations-Interaktionsanalyse an Vokalisationen hörbeeinträchtigter Säuglinge als Gegenstand dieser Arbeit war es in dieser Pilotstufe der Testung notwendig, eine vorsprachliche Entwicklungsphase auszuwählen, in der bereits hinreichend stabile und reproduzierbare Artikulationsereignisse vorkommen. Die Phase des sogenannten kanonischen Babbelns, charakterisiert durch ihre repetitiven Silbenfolgen, stellt bezüglich des Erwerbs koordinierter Phonations- und Artikulationsmechanismen eine bereits sehr reife Phase dar. Nach der Frame/Content-Theorie von McNeilage und Davis ist die Grundvoraussetzung für das Sprechen die Fertigkeit, rhythmische Silbensequenzen produzieren zu können (B. L. Davis & McNeilage, 2004). Diese Fertigkeit entstand evolutionär aus einer Kombination rhythmischer, öffnender und schließender Kieferbewegungen, wie sie auch bei funktionellen Vorgängen wie Kauen und Saugen vorkommen, und einer gleichzeitig stattfindenden Phonation. In der frühen

Sprachentwicklung setzt das koordinierte Zusammenspiel von Phonation und Artikulation vorhergehende physiologische Reifungsprozess voraus. Frühere vorsprachliche Phasen werden unter kontinuierlicher Reifung zugrundeliegender morphologischer und neurophysiologischer Strukturen und Mechanismen als präartikulatorische Trainingsphasen durchlaufen (K. Wermke & Mende, 2011). Mit etwa dreieinhalb Monaten erwerben Säuglinge die physiologische und neuromuskuläre Kontrolle über die Interkostalmuskulatur und das Zwerchfell und sind damit in der Lage, willkürliche Phonation über einen bestimmten Zeitraum mit der Produktion von Konsonanten zu kombinieren (Giesbrecht, 2002). Die Reifung der Vokaltraktfunktionen als wichtige Voraussetzung für die Artikulation ist ab diesem Alter also sowohl bei Säuglingen mit einer Hörstörung als auch bei normalhörenden Säuglingen so weit fortgeschritten, dass die physiologischen Voraussetzung für die Produktion einfach artikulierter Babbelsilben erfüllt sind (Vorperian, et al., 2009). Als markantes und zuverlässiges Merkmal einer inadäquaten Hörhilfenversorgung im Stadium der vorsprachlichen Entwicklung gilt bisher zudem ein verzögertes Einsetzen dieser Phase (siehe Oller, Eilers, Neal, & Cobo-Lewis, 1998, Koopmans-van Beinum et al., 2001; Schauwers, et al., 2004; Moeller, et al., 2007), und zwischen dem Alter, in dem ein Kind die Babbelphase erreicht, und dem Alter, in dem Hörhilfen angepasst wurden, zeigte sich in einer Studie von Eilers & Oller eine positive Korrelation (Eilers & Oller, 1994). Dies weist darauf hin, dass insbesondere die Entwicklung der Artikulation eng an die Funktion der auditiven Rückkopplungsmechanismen gebunden ist. Für potentiell klinisch relevante Untersuchungen erscheint die kanonische Babbelphase zum jetzigen Stand der Forschung also besonders geeignet, den Einfluss der Hörleistung auf frühe artikulatorische Fähigkeiten zu prüfen.

Die kanonische Babbelphase geht der Produktion erster Wörter unmittelbar voraus, begleitet die Phase des Sprechens erster Wörter bis zum Alter von ca. 18 Monaten (Fagan, 2009), (Oller, et al., 2013), und lässt zudem bereits Phänomene beobachten, die von den Umgebungseinflüssen der Zielsprache geprägt sind, beispielsweise bei der Häufigkeit der verwendeten Vokale (Singleton & Ryan, 2004). Damit eignet sie sich unter den vorsprachlichen Phasen besonders für die Untersuchung vorsprachlicher artikulatorischer Kompetenzen auf dem Weg zum Erwerb der Zielsprache. Die Untersuchung früher Silbensequenzen ist auch deshalb besonders interessant, weil die Silbe die kleinste sprachliche Einheit darstellt, die artikulatorisch gebildet und auditiv wahrgenommen werden kann (Röber, 2009) und die in allen Sprachen gleichermaßen in verschiedenen Variationen

als Struktur existiert (Davis & McNeilage, 2004; Oller, 1986). Aus der Perspektive der Evolution der Sprache ist die Produktion von Silben nach der Frame/Content-Theorie das Resultat rhythmischer Mandibularoszillationen. Der Einsatz von Lippen und Zunge wird danach im Babbeln als nur wenig bedeutsam angesehen und die Silbe stellt bei diesem Konzept eine Art „Rahmen“ dar, charakterisiert durch die rhythmische und repetitive Struktur, während die Vokale und Konsonanten den Inhalt bilden (Davis & MacNeilage, 1995; Davis, MacNeilage & Matyear, 2002; Giulivi, Whalen, Goldstein, Nam, & Levitt 2011). McNeilage und Davis leiteten ihre Theorie aus statistischen Erhebungen bei babbelnden Säuglingen im Alter von ca. 7 Monaten ab, die in ihren Beobachtungen eine Präferenz für ganz bestimmte Silbenformen, Konsonant-Vokal-Kombinationen (CV), zeigten. Nach der F/C-Theorie erzeugt die Auf- und Abbewegung des Kiefers CV-ähnliche Laute, wenn die Unterlippe die Oberlippe oder die Zunge den Gaumen berührt. Vokale entstehen durch die Abwärtsbewegung des Kiefers nach der konsonanterzeugenden Verengung (Konstriktion). Damit werden Babbelsilben vorrangig durch motorische Aktionen des Kiefers erklärt, während eine Kontrolle der Zungenbewegungen als nicht vorhanden angesehen wird. Der Befund, dass jedoch bereits 3 Monate alte Säuglinge vom Stamm der Nso Schnalzlaute mit der Zunge erzeugen, spricht gegen eine passive Rolle der Zunge im Babbeln (Wermke, Pachtner, Lamm, Voit, Hain, Kärtner, Keller, 2013). Auch Serkhane et al. betonen die frühe Bedeutung der Zungenbewegungen in frühkindlichen Äußerungen (Serkhane, Schwartz, Boë, Davis & Matyear, 2007). Babelmodelle mithilfe von Computersimulationen zeigen ebenfalls, dass die F/C-Theorie nicht ausreicht, um die Produktion von Babbelsilben zu erklären (Nam, Goldstein, Giulivi, Levitt & Whalen, 2013). Auch die Befunde aus dem Bereich der Sprachperzeptionsforschung sprechen gegen eine vorrangig motorische Motivation zur Produktion von Babbelsilben: In verschiedenen Studien an Säuglingen konnte gezeigt werden, dass diese als Grundeinheiten von Sprache keine phonetischen Segmente, sondern Silben wahrnehmen und erinnern (Jusczyk & Bertoncini, 1988), und dass Silben bei der Strukturierung von segmentalen und suprasegmentalen Charakteristika während der frühen Sprachwahrnehmung eine wichtige Rolle spielen (Jusczyk, Bertoncini, Bijeljic-Babic, Kennedy & Mehler, 1990). Im Spracherwerbsprozess scheinen Säuglinge diese Segmentierungsmerkmale bereits sehr früh zu identifizieren, wobei zwischen dem vierten und sechsten Lebensmonat prosodische Merkmale der Muttersprache wie Rhythmus und Intonation erkannt werden und ab dem neunten Lebensmonat auch bedeutungstragende, untergeordnete Einheiten von Sprache als solche wahrgenommen werden (Papoušek, 1998). Durch die vorsprachliche, jedoch bereits

an die Zielsprache angelehnte Silbenbildung in der kanonischen Babbelphase zeigt sich dann auch in der Sprachproduktion eine Bevorzugung zielsprachennaher Lautmuster (Bredel, 2007). Die kanonische Babbelphase scheint damit ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zum Erwerb der Muttersprache, bei dem Sprachperzeption und -produktion eng ineinandergreifen und eine Beeinträchtigung der auditiven Rückkopplung – wie beispielsweise durch eine sensorineurale Hörbeeinträchtigung – sich erwartungsgemäß erkennbar auf die spätere Sprachproduktion auswirken müsste.

Ziel dieser Arbeit war ausdrücklich keine linguistisch-phonetische, subjektive Transkriptionsanalyse mit Fokus auf für die Erwachsenensprache typische Kenngrößen, sondern eine objektive, akustisch-phonetische Analyse, da es sich bei den hier untersuchten Vokalisationen um noch unreife, phonatorisch-artikulatorische Realisierungen im Rahmen eines komplexen mehrstufigen Erwerbsprozesses handelt. Wie Oller in seinem metaphonologischen Konzept beschreibt (Oller, 1986; Oller, 2000), bestehen zwischen frühkindlichen Babbelsilben und Silben reifer Erwachsenensprache zwar starke Ähnlichkeiten, sie unterscheiden sich jedoch bezüglich temporaler und spektraler Merkmale. Bei der Analyse frühkindlicher Vokalisationen können phonetische Kenngrößen reifer Sprache deshalb nicht uneingeschränkt angewandt werden. Ziel dieser Arbeit war es daher, temporale Parameter spontaner Lautäußerungen aus der kanonischen Babbelphase mithilfe der Phonations-Artikulations-Interaktionsanalyse (PAI-Methode) objektiv zu untersuchen und dabei ein besonderes Augenmerk auf die Silbenebene der Vokalisationen zu legen. Um die Unterscheidung zwischen Silben reifer Erwachsenensprache und Silben aus Phasen der vorsprachlichen Entwicklung zu verdeutlichen und den beiden Analyseebenen reifer Sprache, zum einen der phonetischen Transkription von Silben und zum anderen der Bestimmung akustischer und temporaler Parameter, eine Ebene hinzuzufügen, die die Besonderheiten frühkindlicher Vokalisationen als Vorläufer reifer Sprache erfasst, führt Oller die metaphonologische Ebene ein. Deren Grundlage bildet die Annahme von der Wohlgeformtheit als Erkennungsmerkmal der „reifen“ Silbe – der kleinsten phonetischen Einheit aller gesprochenen Sprachen – und auch als Erkennungsmerkmal der vorsprachlichen Silben. Bei der Programmentwicklung und der Auswahl der zu untersuchenden Parameter wurde auf diesen Sachverhalt Rücksicht genommen und es wurden nach gründlicher Literaturrecherche die nachfolgenden Kriterien von Oller zur Identifikation kanonischer Babbelsilben für die Analyse verwendet:

Laut Ollers Modell sind kanonische Babbelsilben auch durch den ungeübten Hörer als sprachähnliche Äußerung zu identifizieren, die den späteren reifen Silben der

Erwachsenensprache bereits sehr ähnlich sind. Als Definition werden das Vorliegen eines Resonanzkerns (Nukleus) gefordert, der dem vokalischen Silbenanteil entspricht und der sich durch die Phonation bei geöffnetem Vokaltrakt ergibt, und das Vorliegen mindestens einer konsonantischen Begrenzung (konsonantisches Element) am Anfang (C-V) oder Ende (V-C) der Silbe, die durch das Öffnen oder Schließen des Vokaltraktes entsteht. Zwischen diesen beiden Elementen, quasi auf dem Weg vom offenen zum geschlossenen Vokaltrakt oder umgekehrt, liegt ein schneller Formantübergang, der den Wechsel zwischen konsonantischem und vokalischem Element darstellt. Oller postuliert für diesen kanonischen Formantübergang eine Dauer zwischen 25-120ms (Oller 1986, S. 86), die beim Hörer den Eindruck einer „wohlgeformten“ Silbe hervorruft. Der Kernbereich der Silbe sollte laut Oller eine Dauer von etwa 100-500ms nicht über- oder unterschreiten (Oller 1986, S. 62, S. 86), um den Höreindruck einer bereits zielsprachennahen Vokalisation aufrechtzuerhalten.

Diese Referenzgrößen sollten mithilfe der zu testenden PAI-Methode ebenfalls in Lautäußerungen von Säuglingen mit sensorineuraler Hörminderung ermittelt werden.

1.3. Die Testung der PAI-Methode zur Untersuchung der artikulatorischen Aktivität in der kanonischen Babbelphase bei Kindern mit sensorineuraler Hörbeeinträchtigung

Durch die Beobachtung des Verlaufs von Formantfrequenzen (Resonanzfrequenzen) lassen sich die artikulatorischen Vorgänge im Vokaltrakt gut beschreiben. Besonders die Frequenzen des ersten und zweiten Formanten charakterisieren die in der Erwachsenenprache vorkommenden Vokale (Pickett, 1999) und geben Hinweise auf artikulatorische Vorgänge im Vokaltrakt. Bis heute liegen jedoch nur wenige Daten zu Resonanzfrequenzcharakteristika vorsprachlicher Laute vor. Für Formantfrequenzen vorsprachlicher vokalischer Lautäußerungen gibt es nur eine Studie mit Referenzwerten für normalhörende Säuglinge mit deutscher Umgebungssprache (Dahnken, 2006). Bei Dahnken erfolgt jedoch keine Trennung nach den jeweiligen Vokalisationstypen, was zu einer Maskierung solcher Effekte führt, die sich zum ersten Mal in der kanonischen Babbelphase zeigen. Die im Rahmen dieser Arbeit getestete PAI-Methode zur Interaktionsanalyse zwischen phonatorischen und artikulatorischen Vorgängen erlaubt hingegen eine objektive Beurteilung vorherrschender Artikulationsaktivitäten bei der Produktion vorsprachlicher Laute:

Wie das Entwicklungsmodell von Wermke und Mende beschreibt, kommt der Melodie in der Phonationsphase – der ersten Phase der vorsprachlichen Entwicklung – eine besondere Rolle zu, da sie nicht nur einer der ersten prosodischen Grundbausteine ist, die erworben werden, sondern gleichzeitig auch ein essentielles Grundgerüst für den Einstieg in die artikulatorische Entwicklung ab dem dritten Lebensmonat darstellt (Wermke & Mende, 2011). Basierend auf diesem Ansatz haben Wermke und Mende ein spezielles Phonations-Artikulations-Interaktionsmodell konzipiert und an hörgesunden Säuglingen getestet (Wermke et al., 2002; Wermke et al. 2005). Durch die gleichzeitige Berechnung und graphische Darstellung sowohl der Grundfrequenz (Melodie) eines Signals als auch der Harmonischen dieser Grundfrequenz und der Formanten, also der Resonanzfrequenzen des Vokaltraktes, die durch die anatomischen Veränderungen im Vokaltrakt im Rahmen der Artikulationsbewegungen entstehen (Reetz, 2003), kann die Interaktion der Resonanzfrequenzen mit der Melodie und ihren Harmonischen als Vorstufe der reifen Artikulation graphisch dargestellt werden. In einer Arbeit von Kempf hat sich diese Methode erstmals im Rahmen der Analyse vorsprachlicher Entwicklungsverläufe bei durch orofaziale Spaltbildung betroffenen Säuglingen bewährt (Kempf, 2008). Dort konnte eine Entwicklungsverzögerung bezüglich der präartikulatorischen Aktivitäten der Kinder mit orofazialer Spaltbildung im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe erstmals mittels der angewandten Methode nicht nur beschrieben, sondern auch quantifiziert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde nun die Eignung der PAI-Methode für die Charakterisierung kanonischer Babbellaute sensorineural hörbeeinträchtigter Säuglinge erstmals getestet. Neben der Durchführung einer Frequenzanalyse für die Grundfrequenz und die erste Resonanzfrequenz wurden in dieser Arbeit spezielle Parameter eingeführt und angewandt, die spezifische artikulatorische Vorgänge in kanonischen Babbelsilben mittels der zu testenden Methode messbar und damit objektivierbar machen sollen. Dabei ist die Arbeit auf temporale Parameter (Zeitorganisation) bei der Artikulation kanonischer Babbellaute fokussiert und untersucht als Korrelate früher artikulatorischer Aktivität Tuning- und Nichttuningelemente (siehe Kapitel 2.5) der ersten Resonanzfrequenz mit der Melodie und ihren Harmonischen von Säuglingen mit hochgradiger Hörstörung unter Versorgung mit Hörhilfen und/oder einem Cochleaimplantat.

1.4. Zielsetzung

Kindliche Vokalisationen in der Phase der vorsprachlichen Entwicklung zeichnen sich aufgrund der Unreife der beteiligten Systeme und aufgrund kontinuierlicher Veränderungen durch Reifungsprozesse durch eine hohe Variabilität aus. Da es sich um noch unreife Lautproduktionsmechanismen handelt, können Verfahren aus der phonetischen Analyse der Erwachsenensprache bei ihrer Untersuchung nicht zur Anwendung kommen (Oller, 2000). Dennoch sind einfache Artikulationsphänomene analysierbar und Entwicklungsvorgänge identifizierbar (Wermke, et al., 2002; Wermke, et al., 2005; Kempf, 2008; Shehata-Dieler et al., 2013). Mende und Kollegen haben dafür eine spezielle Methode (Phonations-Artikulations-Interaktionsmodell, PAI-Modell) sowie ein spezielles Diagramm zur Visualisierung dieser Interaktion (Tuningdiagramm) entworfen, das bei normalhörenden Säuglingen die Charakterisierung des Beginns und Verlaufs der artikulatorischen Entwicklung ermöglicht (Wermke et al., 2005; Wermke et al., 2002). Diese PAI-Methode soll hier erstmalig auf kanonische Babbellaute von sensorineural hörbeeinträchtigten Säuglingen angewandt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es damit, an geeigneten Signalen zu testen, ob die von Wermke und Mende (2002, 2005, 2011) für normalhörende Säuglinge entwickelte Methode zur Analyse der Phonations-Artikulations-Interaktion auch zur Untersuchung vorsprachlicher Spontanvokalisationen von hochgradig hörbeeinträchtigten Säuglingen geeignet ist. Diese Untersuchung liefert einen Beitrag dazu, zukünftig Zusammenhänge zwischen Artikulationsleistung und Hörleistungen objektiv charakterisieren zu können.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine explorative Pilotstudie, in der anhand der retrospektiven Analyse der vorsprachlichen Vokalisationen von vier sensorineural hörbeeinträchtigten Kindern und der darauf basierenden Auswahl geeigneter spontaner Vokalisationen (kanonische Babbellaute) artikulatorische Vorgänge beschrieben und objektiv messbar gemacht werden sollen. Anhand einer komplexen signalanalytischen Untersuchung kanonischer Babbellaute sollte getestet werden, ob sich die bei gesunden Säuglingen gefundenen Phänomene der Interaktion zwischen der Melodie (Zeitfunktion der Grundfrequenz) und der tiefsten Resonanzfrequenz des Vokaltraktes (R1, entspricht F1; Reetz, 2003), also phonatorischer und artikulatorischer Aktivität, auch in den Lautproduktionen hochgradig sensorineural hörbeeinträchtigter Säuglinge zeigen. Die Testung der hier erstmalig auf hörbeeinträchtigte Kinder (im Folgenden „HI-Kinder“ für hearing impaired) angewandten Methode erfolgte anhand von vier Säuglingen, deren

Auswahlkriterien in Kapitel 2.2 aufgeführt sind. Von diesen Säuglingen wurden alle in der Datenbank des ZVES pseudonymisiert vorliegenden Vokalisationen untersucht, die vorsprachlichen Entwicklungsstufen daraus bestimmt, der Untersuchungszeitraum festgelegt und dann die relevanten kanonischen Babbellaute mit der zu testenden Methode analysiert. Dazu war eine aufwendige Vorarbeit nötig, ohne die die hier dargestellten Analysen keine verwertbaren Ergebnisse geliefert hätten. Die Schwierigkeit bestand darin, für die Testphase solche Probanden zu finden, die trotz ihrer hochgradigen sensorineuralen Hörbeeinträchtigung in der Langzeitbeobachtung eine sehr gute sprachliche Entwicklung zeigten, um an qualitativ möglichst homogenen Vokalisationen ihrer vorsprachlichen Entwicklung retrospektiv die hier im Fokus stehenden Feinanalysen durchzuführen. Diese Vokalisationen waren im Rahmen von ZVES-CHC-Kooperationsprojekten aufgezeichnet worden und standen im Archiv zur Verfügung. Es wurden mehr als 20.000 Einzelsignale ausgewertet, die von vier geeigneten Probanden im Längsschnitt vorlagen. Eine ausführliche Beschreibung dieses Prozesses findet sich im Methodenteil in Kapitel 2.4. Die detaillierte Begründung für die Auswahl der Probanden, deren Vokalisationen hier die Datenbasis der Methodentestung bildeten, sowie deren pädaudiologische und entwicklungsphysiologische Charakterisierung findet sich in Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3. Die vorliegende Untersuchung basiert auf folgenden Fragestellungen:

1. Ist es mit der PAI-Methode möglich, kanonische Babbellaute von Kindern mit sensorineuraler Hörbeeinträchtigung geeignet zu analysieren?
2. Können mit der PAI-Methode die Messgrößen vorhergehender Untersuchungen an Weinlauten bzw. präkanonischen Vokalisationen verwendet werden, oder muss diese modifiziert werden?
3. Zeigen die anhand der Testsignale ermittelten Messgrößen zur Charakterisierung der kanonischen Babbelphase eine hinreichende Übereinstimmung mit den in der Fachliteratur berichteten Größen?

2. Material und Methoden

2.1. Testmaterial (Vokalisationen)

Im Zentrum für Vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES) der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg wird auch die vorsprachliche und frühe sprachliche Entwicklung von Säuglingen untersucht, die im Comprehensive Hearing Center (CHC) der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen des Universitätsklinikums Würzburg betreut werden und die mit einem Cochleaimplantat (CI) oder einem Hörgerät versorgt wurden. Im Rahmen einer Kooperation der beiden Institute wurden von diesen Säuglingen wiederholt im Verlauf ihrer Versorgung mit Hörhilfen spontan geäußerte Vokalisationen aufgenommen, die für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit in pseudonymisierter Form als Rohdatenbasis zur Verfügung gestellt wurden. Die ursprüngliche Datenerhebung erfolgte nach Prüfung der Vorgehensweise durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Universität Würzburg (Ethiknummer 143/04). Die Arbeit wurde nach den Kriterien der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Für alle Kinder, deren Daten für diese Arbeit verwendet wurden, lag die entsprechende Einverständniserklärung der Sorgeberechtigten vor.

Bei den Testvokalisationen, die für diese Arbeit verwendet wurden, handelt es sich ausschließlich um Komfortlaute, die von den Probanden während der spielerischen Interaktion mit ihren Eltern und / oder einer Versuchsperson spontan geäußert wurden. Die Lautaufnahmen wurden teils im Comprehensive Hearing Center (CHC) des Universitätsklinikums Würzburg von Mitarbeitern des ZVES / CHC vorgenommen, wenn die Kinder dort im Rahmen der Sprechstunde zur Untersuchung und zur Anpassung von Hörhilfen vorgestellt wurden; zum größten Teil wurden die Aufnahmen jedoch von Mitarbeitern des ZVES und von den Eltern der Probanden zu Hause während Situationen der Eltern-Kind-Interaktion in gewohnter Umgebung angefertigt.

Die Aufnahme der Signale erfolgte mit digitalen Recordern (DAT-Rekordern) der Firma Tascam (Tascam DA-P1) und einem externen Earthworks Mikrophon. Die DAT-Aufnahmen wurden im ZVES manuell nach dem dort üblichen Routineverfahren der vorsprachlichen Diagnostik ausgelesen, interaktiv in einzelne Vokalisationen (Einzelsignale) segmentiert und pseudonymisiert im Archiv abgelegt. Ein Einzelsignal entspricht dabei der Lautäußerung, die während eines Expirationsvorgangs von einem

Probanden getätigt wird, inklusive der nachfolgenden Inspiration. Der Einschluss der Inspirationsgeräusche dient dabei der Kontrolle, dass die Identifikation der Einzellaute und das Segmentieren der Tonaufnahmen fehlerfrei erfolgten. Bei den Analysen werden die Inspirationsgeräusche nicht mit ausgewertet. Die Einzellaute wurden anschließend mit Programmen des Computerized Speech Lab (CSL, Modell 4500 der Firma Pentax) weiterbearbeitet.

Für die Testung der PAI-Methode zur Artikulationsanalyse bei kanonischen Babbellauten als Zielstellung dieser Arbeit war es notwendig, das vorhandene Datenkorpus aller Einzelvokalisationen der eingeschlossenen Probanden (HI-Kinder) einer aufwändigen Voruntersuchung zu unterziehen. Es ist bekannt, dass die Variabilität kindlicher Lautäußerungen sehr hoch ist, sodass eine messmethodische Testung unter Einschluss aller im Beobachtungszeitraum von den Kindern geäußerten Vokalisationen hier nur schwer realisierbar gewesen wäre. Durch die strenge Selektion geeigneter Vokalisationen sollte ein für die erste Phase der Methodentestung ausreichend homogenes Datensample entstehen. Es ergab sich dadurch jedoch, im Vergleich zum Gesamtkorpus der für die Probanden vorliegenden Einzelsignale, eine deutlich geringere Anzahl an Vokalisationen, die hier untersucht wurden. Die Kriterien zur Auswahl der Einzelsignale werden in Kapitel 2.4 ausführlich dargelegt.

2.2. Probanden (HI-Kinder und Referenzproband R-GG)

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit war es notwendig, Probanden auszuwählen, von denen geeignete Lataufnahmen im Längsschnitt über die ersten Lebensmonate vorlagen und von denen gleichzeitig alle relevanten medizinischen und entwicklungsdiagnostischen Daten verfügbar waren. Da der Fokus der Arbeit nicht auf der Untersuchung von Probandengruppen lag, sondern darauf, durch eine retrospektive Feinanalyse mithilfe des PAI-Modells die phonatorisch-artikulatorische Interaktion in kanonischen Babbellauten sehr gut versorgter, sensorineural hörbeeinträchtigter Säuglinge zu untersuchen, kam es darauf an, möglichst repräsentative Fälle auszuwählen, die sich durch eine sehr gute nachfolgende Sprachentwicklung auszeichneten (Tabelle 1). Alle untersuchten HI-Kinder (hearing impaired) waren von Geburt an hörbeeinträchtigt und litten unter einer hochgradigen Schallempfindungsschwerhörigkeit. Ihre Hörbeeinträchtigung wurde bereits zu einem frühen Zeitpunkt diagnostiziert, sodass sie bereits früh in das ZVES-CHC-Kooperationsprojekt aufgenommen und vorsprachliche Vokalisationen, insbesondere Babbellaute, von ihnen aufgezeichnet werden konnten. Keines der Kinder zeigte oder

entwickelte im weiteren Verlauf Hinweise auf eine syndromale Grunderkrankung oder psychomotorische Retardierung (W. Shehata-Dieler, et al., 2013). Diese retrospektive Vorgehensweise war notwendig, um die Anzahl möglicher Einflussfaktoren auf die Sprachentwicklung zu reduzieren und Maskierungseffekte, wie sie beispielsweise bei einer psychomotorischen Retardierung vorliegen können, weitgehend auszuschließen.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Hörschwellenwerte in Dezibel zur Einteilung der Grade einer Hörminderung, ermittelt durch Tonaudiogramm und ohne Hörhilfen. Beispielsweise definieren Möller und Schönweiler eine noch normale Hörschwelle bei kleiner oder gleich 35dB, eine geringgradige Hörminderung bei 35-60dB, eine mittelgradige Hörminderung bei einer Hörschwelle kleiner 60dB und eine hochgradige Hörminderung für eine Hörschwelle größer 60 dB für alle Frequenzen gesprochener Sprache (Möller & Schönweiler, 1999). Als Referenzwerte liegen dieser Arbeit die Angaben der *EU Concerted Action on Genetics of Hearing Impairment* zugrunde (Streppel, Walger, von Wedel, & Gaber, 2006): Eine geringgradige Hörminderung liegt demnach bei einer Hörschwelle zwischen 20 und 40dB vor, eine mittelgradige Hörminderung bei einer Hörschwelle zwischen 40 und 70dB, eine hochgradige Hörminderung bei 70 bis 95dB sowie eine Resthörigkeit bei einer Hörschwelle größer 95dB. Diese Angaben gelten jeweils für das besser hörende Ohr. Bei den Probanden, deren Vokalisationen für diese Arbeit verwendet wurden, wurde die Hörschwelle im Rahmen der Betreuung am CHC mittels Click-BERA und Tiefton-BERA (brainstem evoked response audiometry) bestimmt. Dabei ergab sich bei allen Probanden eine hochgradige Hörminderung. Bei Proband GD wurde eine für die Hörminderung verantwortliche Genmutation festgestellt (homozygot CX 26 (c.35 del G)); es liegt eine hereditäre sensorineurale Schwerhörigkeit vor. Bei den anderen Probanden ist die Ursache der Hörminderung idiopathisch. Die Hörminderung lag bei keinem der Kinder im Rahmen eines Syndroms vor und es waren keine sonstigen neurologischen oder kognitiven Beeinträchtigungen bei den Probanden festgestellt worden.

Proband GA (weiblich) trug im Beobachtungszeitraum, also dem Zeitraum, in dem kanonische Babbellaute auftraten, im rechten Ohr das CI-Modell C40+ der Firma ‚med el‘ und war auf dem linken Ohr mit einem Hörgerät des Modells S2P+/Connexx 4.4a des Herstellers Siemens mit einer maximalen Verstärkung von 68dB versorgt. Der Proband GD (männlich) trug im Beobachtungszeitraum im rechten Ohr das CI-Modell PULSARci 100 der Firma ‚med el‘ und ein Hörgerät der Firma Siemens für das linke Ohr. Die Probanden GB und GH (beide männlich) trugen im Beobachtungszeitraum beidseits Hörgeräte, wobei GH Hörgeräte der Firma Siemens trug und GB mit Hörgeräten vom Modell Phonak Maxx 311

forte des Herstellers Phonak versorgt war. In Tabelle 1 sind die Charakteristika der Probanden der vorliegenden Untersuchung zusammengefasst. Aus Tabelle 2 sind die Untersuchungsergebnisse der Hörschwellenbestimmung mittels BERA, die individuelle Hörleistung im Untersuchungszeitraum sowie die Diagnosen und der weitere Verlauf der Versorgung mit CI oder Hörgerät ersichtlich.

Tabelle 1: Einschlusskriterien der Probanden (HI-Kinder)

- Diagnose einer hochgradigen Hörminderung (Hörschwelle >70-95 dB für das besser hörende Ohr (Streppel et al., 2006))
- Indikation zur Versorgung mit HDO-Hörgerät oder CI
- Vorhandensein verwertbarer kanonischer Babbellaute im Datenarchiv
- Hörbeeinträchtigung nicht im Rahmen einer syndromalen Grunderkrankung
- keine sonstigen kognitiven oder neurologischen Beeinträchtigungen
- Langzeit-Follow-Up der Sprachentwicklung bis zum Alter von mind. 3 Jahren
- Einwilligung der Eltern zur Teilnahme an der Studie

Das Ziel der Arbeit bestand darin, die Anwendbarkeit der PAI-Methode zur Analyse kanonischer Babbellaute von hörbeeinträchtigten Kindern zu untersuchen. Dazu zählen auch die Analyse der ermittelten Messgrößen und deren deskriptive statistische Aufarbeitung. Diese Ergebnisse wurden genutzt, um die ermittelten Resultate mit Referenzwerten normalhörender Kinder aus der Fachliteratur zu vergleichen. Teilweise lagen Referenzwerte normalhörender Säuglingen bereits vor (K. Wermke et al., 2002; K. Wermke, et al. 2005; W. Shehata-Dieler et al., 2013) bzw. konnten aus einer zeitgleich am ZVES entstandenen Dissertationsarbeit (Pachtner, 2017) als Referenzwerte herangezogen werden. Zur Validierung der zu testenden Methode war es für die vorliegende Arbeit zudem notwendig, ein Vergleichssample aus den typischen kanonischen Babbellauten eines hörgesunden Kindes zu bilden, von dem geeignete Lautaufnahmen im Archiv des ZVES vorlagen. So ließ sich die Anwendbarkeit der PAI-Methode auf Vokalisationen von hörbeeinträchtigten Säuglingen besser demonstrieren und evaluieren. Nach systematischen Voranalysen in Vorbereitung der vorliegenden Arbeit wurde das hörgesunde Mädchen mit dem Probandenpseudonym „R-GG“ aus der Datenbank des ZVES als Referenzproband ausgewählt. Proband GG durchlief eine für hörgesunde Kinder typische Sprachentwicklung, die von Mitarbeitern des ZVES bis zum sechsten Lebensjahr beobachtet und dokumentiert wurde. Der Autorin der vorliegenden Arbeit wurden die Vokalisationen von GG in anonymisierter Form zur Verfügung gestellt. In Tabelle 3 sind die Vokalisationen des Kindes GG mit aufgeführt.

Tabelle 2: Hörleistung und Hörgeräteversorgung der Probanden*

Kind / Geschlecht, Amplifikation s-methode	Beobachtungszeitraum (Höralter)	Diagnose (Ursache)	Verlauf der Versorgung mit Hörhilfen	Hörschwelle
HI-GA / w - CI rechts - HDO links	352.-469. LT (223.-340.d)	hochgradige SES (idiopathisch)	- ab 132.LT: HDO beidseits (Siemens S2P+/Connex 4.4a, max. Verstärkung 68 dB) - ab 260.LT: CI rechts (med el, C40+) - ab 1137.LT: CI links (med el, PULSARci 100)	<u>158.LT:</u> keine Antworten li / re bis 100dB (Click-BERA) re bis 80 dB, li bis 90 dB (Tiefen-BERA)
HI-GB / m - HDO beidseits	345.-477. LT (175.-307. d)	hochgradige SES (idiopathisch)	- ab 170.LT HDO beidseits (Phonak Maxx 311 forte) - ab 636.LT CI rechts (med el PULSARci 100) - ab 1584.LT CI links (med el PULSARci 100)	<u>174. Tag:</u> li bis 80dB, re bis 90dB (BERA) <u>277.Tag:</u> re nur bei 100 dB, li nur bei 70 dB (BERA) re 90 dB, li fraglich 60 dB (Tiefen-BERA)
HI-GD / m - CI rechts	445.-563. LT (365.-483.d)	hochgradige SES (hereditär)	- ab 80.LT HDO beidseits - ab 403.LT CI rechts (med el PULSARci 100) - ab 703.LT CI links (med el PULSARci 100)	<u>276.Tag:</u> re 100 dB / li 90 dB (Tiefen-BERA)
HI-GH / m - HDO beidseits	210.-317.LT (133.-240. d)	hochgradige SES, linksbetont (idiopathisch)	- ab 77.Tag HDO beidseits (Siemens) - ab 115. Tag neue HDO-Geräte bds. (Siemens)	<u>315.Tag:</u> re / li sicher bis 90 dB. fragl. bis 80dB (Tiefen-BERA) re sicher bis 90 dB, fraglich bis 80dB li nicht sicher bei 100 dB(BERA)

*Bei der Versorgung mit CI ist jeweils der Tag der Erstaktivierung angegeben. Höralter = Zeitdauer in Tagen ab der ersten Hörhilfenversorgung.
w = weiblich, m = männlich, SES = Schallempfindungsschwerhörigkeit, CI = Cochleaimplantat, HDO = Hinter-dem-Ohr-Gerät, LT = Lebenstag, d = Tag*

2.3. Erstellung vorsprachlicher Entwicklungsprofile und Identifikation der kanonischen Babbelphase

Von allen Säuglingen mit sensorineuralen Hörstörungen, die in Kooperation des ZVES mit dem CHC der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen des Universitätsklinikums Würzburg hinsichtlich ihrer vorsprachlichen und frühen sprachlichen Entwicklung in Abhängigkeit von ihrer Hörleistung untersucht werden, werden im ZVES individuelle Entwicklungsprofile erstellt. Anhand einer Längsschnittanalyse der vorliegenden Daten werden dabei für jedes Kind die individuellen Zeitpunkte des Eintritts in die unterschiedlichen Phasen der vorsprachlichen Entwicklung identifiziert, die in Kapitel 1.1 beschrieben wurden. Die so generierten Entwicklungsprofile bildeten die methodische Basis der für diese Arbeit notwendigen Selektion geeigneter Spontanäußerungen zur Analyse mithilfe der PAI-Methode.

Wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, war die Grundvoraussetzung bei der Auswahl der Probanden für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit das Vorliegen geeigneter Längsschnittdaten im Archiv des ZVES, d.h. speziell das Vorliegen kanonischer Babbellaute. Aus den Pilotstudien der ZVES-CHC-Projekte lagen Längsschnittdaten von sieben prinzipiell geeigneten Kindern vor, bei denen der individuelle Verlauf ihrer vorsprachlichen Entwicklung mit den Eintrittszeitpunkten in die verschiedenen Phasen bestimmt werden konnte (siehe W. Shehata-Dieler, et al., 2013). Bei der im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Überprüfung dieser Entwicklungsprofile zeigte sich, dass nur die Längsschnittdaten von vier der anfänglich sieben untersuchten Probanden sowohl qualitativ als auch quantitativ als Testmaterial für die PAI-Methode geeignet waren (siehe Kriterien in Tabelle 1). Als Testmaterial für diese Arbeit wurde das Lautrepertoire der kanonischen Babbelphase von drei Jungen (GB, GD, GH) und einem Mädchen (GA) verwendet, die in Kapitel 2.2 näher charakterisiert sind.

In den folgenden Abbildungen sind die vorsprachlichen Entwicklungsprofile der vier Probanden dargestellt. Die Entwicklungsprofile von zwei der Probanden aus der vorliegenden Arbeit finden sich ebenfalls in einer bereits publizierten Studie aus einem ZVES-CHC-Projekt (W. Shehata-Dieler et al., 2013). Zur reproduzierbaren Identifizierung der kanonischen Babbelphase und zum Ausschluss größerer untersucherabhängiger Schwankungen bei der Festlegung der Eintrittszeitpunkte in die jeweilige vorsprachliche Entwicklungsphase wurden alle vier Entwicklungsprofile durch die Autorin der vorliegenden Arbeit neu erstellt. Dazu wurden insgesamt ca. 20.000 Einzelsignale aller vier untersuchten Kinder von 312 Aufnahmetagen ausgewertet, um die einzelnen

vorsprachlichen Entwicklungsphasen nachzuvollziehen. In den Entwicklungsprofilen in den Abbildungen 1-4 ist für jeden Probanden der jeweils zugrundeliegende Untersuchungszeitraum, in dem kanonische Babbellaute auftraten, durch Pfeile markiert. Mit in diesen Zeitraum gerechnet werden Lautäußerungen, die durch Variation des konsonantischen Silbenanteils innerhalb eines Signals als variiertes Babbeln (variegated babbling) klassifiziert werden können. Diese sind in der Statistik nicht gesondert gekennzeichnet und werden als Vokalisationsvariante der fortgeschrittenen kanonischen Babbelphase zugerechnet. Zusätzlich sind in den Diagrammen die Zeitpunkte der Versorgung mit Hörhilfen eingezeichnet. Als Eintrittszeitpunkt in die nächstfolgende Entwicklungsphase wurde für diese Arbeit jeweils der Zeitpunkt gewertet, zu dem zum ersten Mal eine typische Vokalisationsform aus der entsprechenden Phase mindestens zweimal an einem Aufnahmetag identifiziert werden konnte. Die Untersucherabhängigkeit dieser Vorgehensweise wurde durch den Vergleich der so entstandenen Sprachentwicklungsprofile mit den bereits im Rahmen einer anderen Studie für einige der Probanden ermittelten Profile überprüft (W. Shehata-Dieler, et al., 2013; von Spiegel zum Diesenberg-Hanxleden, 2009), wobei Schwankungen um etwa einen Untersuchungstag beobachtet wurden und sich somit eine ausreichende Reproduzierbarkeit zeigte. Da nicht täglich Aufnahmen erfolgten, kann der jeweilige Übergang in eine andere vorsprachlich Entwicklungsphase unter Umständen zu einem nicht dokumentierten Zeitpunkt stattgefunden haben, sodass dies eine gewisse zeitliche Unsicherheit mit sich bringt, die für die vorliegende Arbeit jedoch nicht relevant ist. Durchschnittlich erfolgte während der vorsprachlichen Phase der vier untersuchten Kinder alle zehn Tage eine Aufnahmesequenz, allerdings mit großer interindividueller Variabilität (für GA im Mittel alle 13 Tage, für GB alle 12 Tage, für GD alle 9 Tage und für GH alle 6 Tage) und mit unterschiedlich langen Zeitintervallen ohne Aufnahmen. In den Entwicklungsprofilen in den Abbildungen 1 – 4 markiert eine durchgehende blaue Vertikale mit blauer Altersangabe in Tagen die Erstversorgung mit einem Hörgerät. Kurze blaue Vertikallinien stehen für stattgehabte Adjustierungen an den HDO-Hörhilfen. Eine durchgehende rote Vertikale markiert die Erstanpassung eines Cochleaimplantates (CI), soweit ein CI implantiert wurde. Die in der Literatur angegebene typische Altersspanne für das Auftreten der kanonischen Babbelphase bei normalhörenden Säuglingen ist mit einem grauen Feld unterlegt. Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass systematische Studien bezüglich des Eintrittsalters und der Dauer der Phasen bisher nicht vorliegen und eine relativ hohe interindividuelle Variabilität zu erwarten ist. Die Datenbasis ist mit schwarzen Punkten markiert, wobei ein Punkt für einen

Aufnahmetag steht. Daraus wird ersichtlich, in welchen Zeiträumen keine Lautaufnahmen stattfanden und um wie viele Tage die Dokumentation des Eintritts in die nächste Entwicklungsphase deshalb verpasst worden sein kann. Der Untersuchungszeitraum für diese Arbeit, die kanonische Babbelphase, ist mit roten Pfeilen markiert. Aus den spontanen Lautäußerungen in diesem Zeitraum wurden die kanonischen Babbellaute als Testmaterial selektiert. Die vorsprachlichen Entwicklungsphasen wurden in Kapitel 1.1 des Einleitungsteils eingeführt. Zur besseren Lesbarkeit sind hier nochmals die jeweiligen Abkürzungen der Beschriftung der y-Achse aufgeführt:

- PA = primitives Artikulationsstadium (hervorgehend aus der Phonationsphase)
- PB = präkanonische Babbelphase
- KB = kanonische Babbelphase
- JA = Jargon-Phase
- WO = Phase des Sprechens erster Wörter

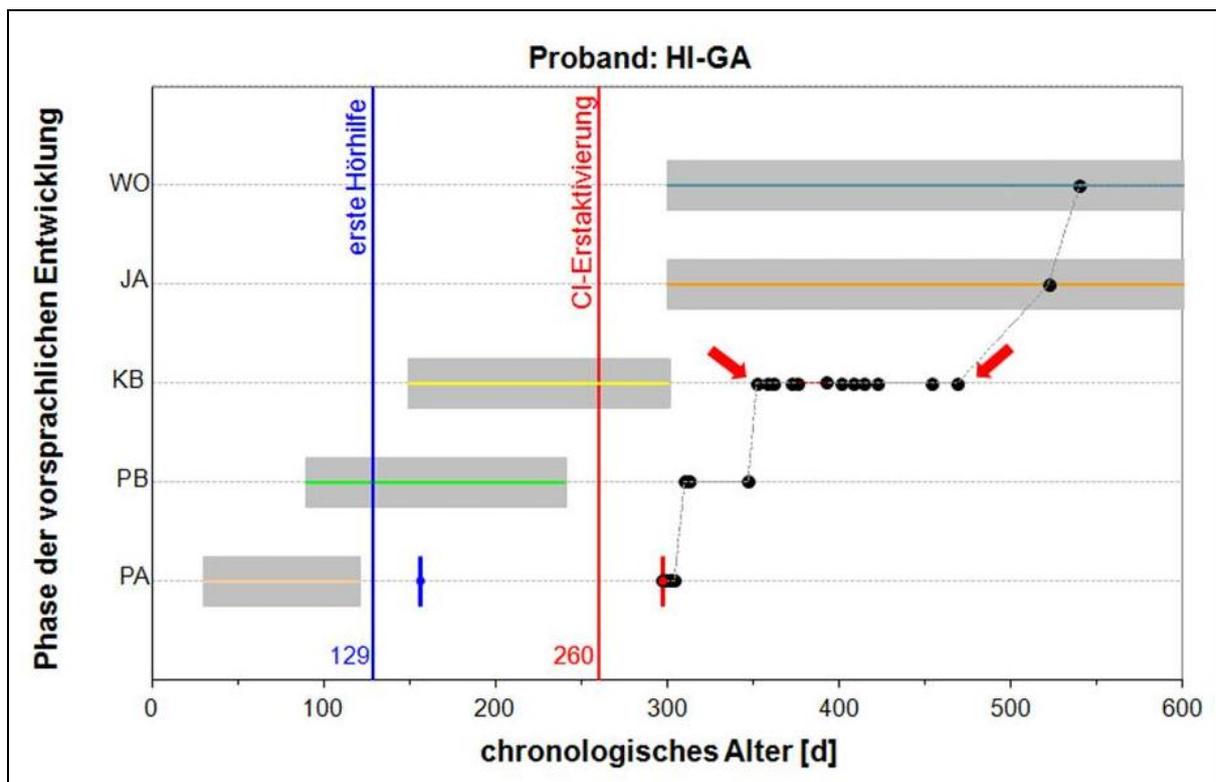


Abbildung 1: Entwicklungsprofil für Proband HI-GA

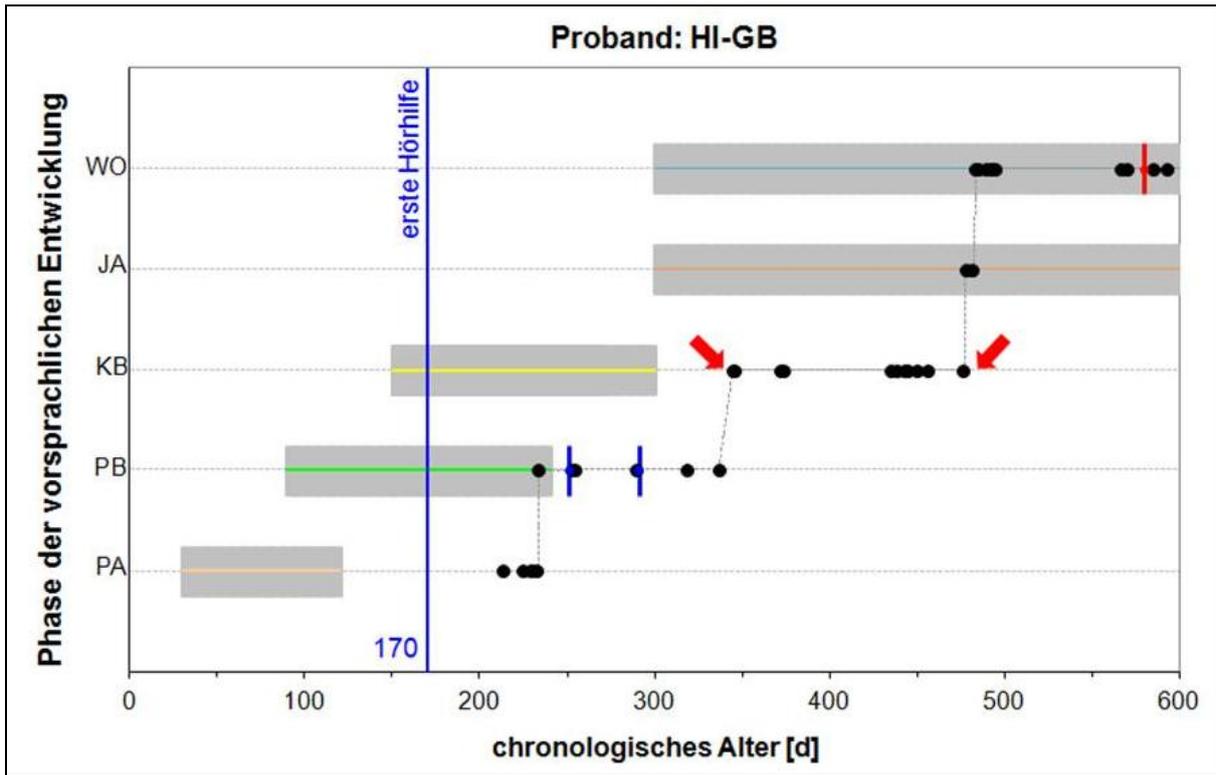


Abbildung 2: Entwicklungsprofil für Proband HI-GB

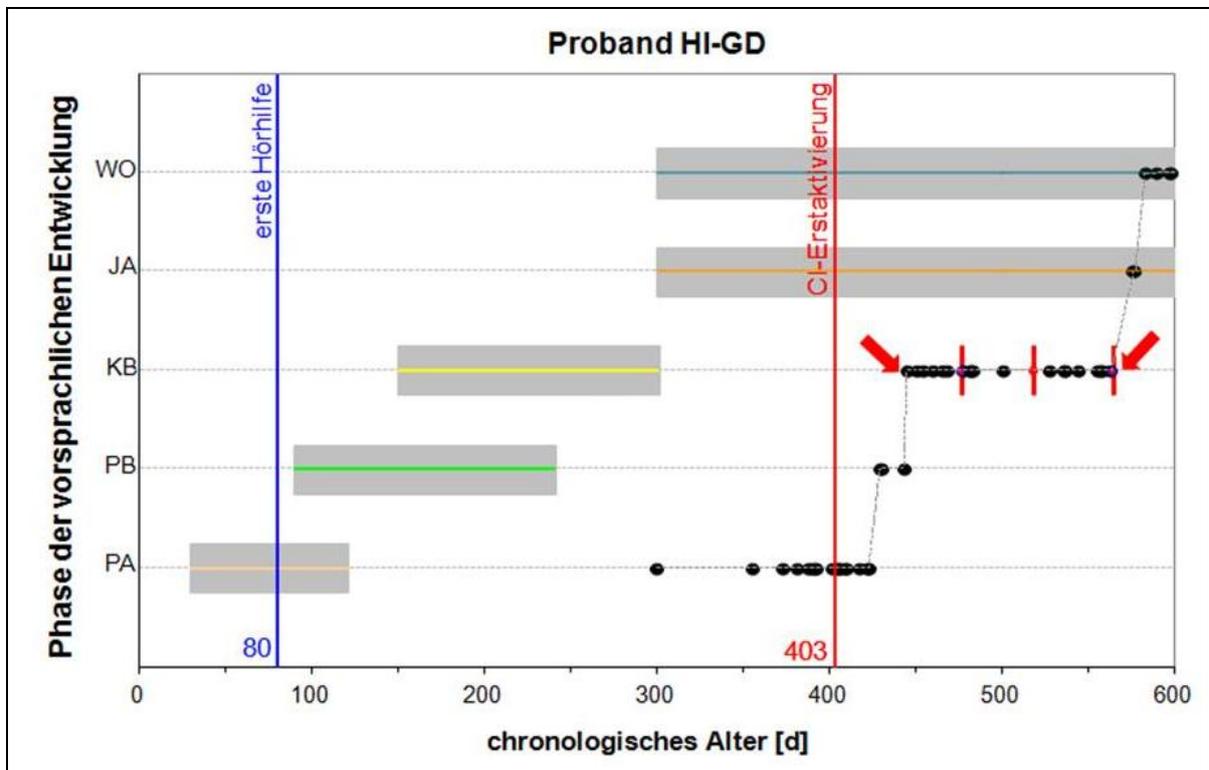


Abbildung 3: Entwicklungsprofil für Proband HI-GD

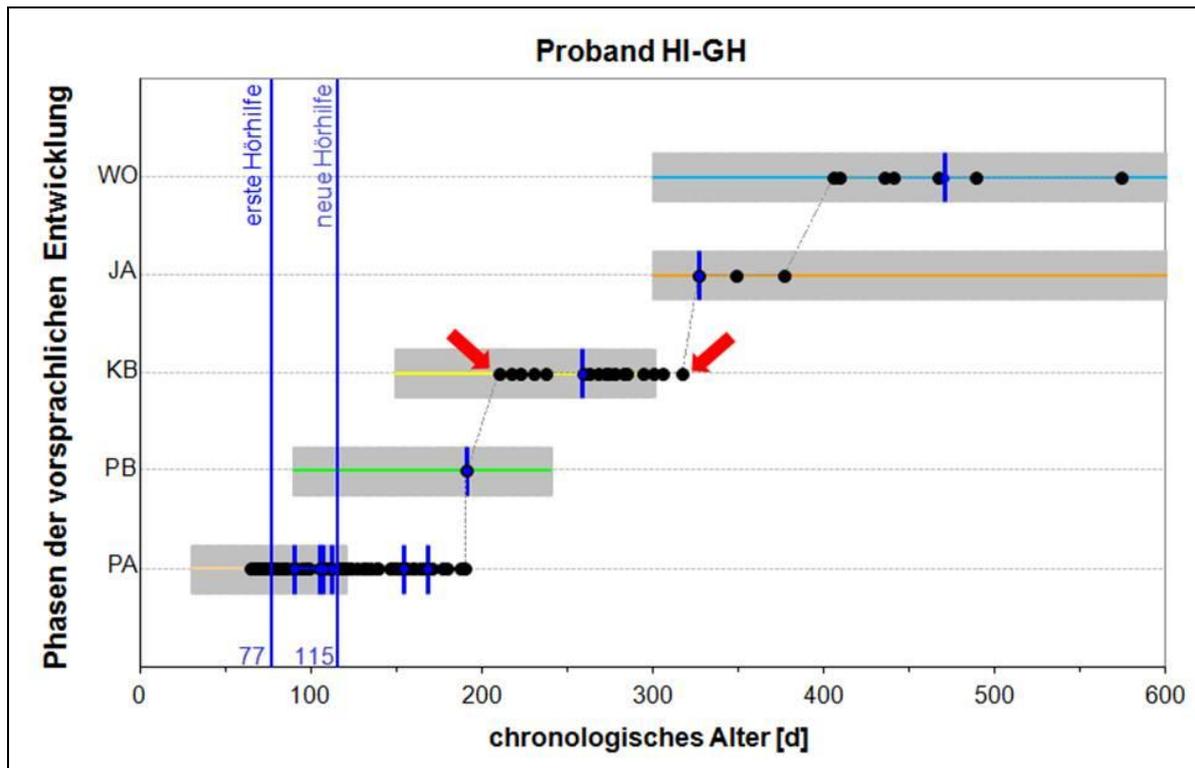


Abbildung 4: Entwicklungsprofil für Proband HI-GH

2.4. Datenbasis, Einzelsignalauswahl und Datenbearbeitungsschritte

Die Auswahl der in Kapitel 2.1 beschriebenen Einzelvokalisationen zum Erhalt eines für die Methodentestung ausreichend homogenen Datensamples und die Datenbearbeitung bis hin zur Methodentestung und zur anschließenden Vermessung der Signale mit der speziell für kanonische Babbellaute modifizierten Methode erforderten mehrere aufeinander aufbauende Schritte. Besonders die Selektion eines geeigneten Datensamples war eine wesentliche Vorarbeit der hier beschriebenen Untersuchungen und nahm einen erheblichen zeitlichen Anteil der Arbeiten zu vorliegender Dissertation in Anspruch. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte in ihrer chronologischen Abfolge erläutert. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die zugrundeliegende Signalanzahl bei den einzelnen Bearbeitungsschritten, Tabelle 4 fasst die Auswahlkriterien der Vokalisationen für die Analyse mit der PAI-Methode zusammen. Abbildung 5 veranschaulicht die einzelnen Schritte des Datenverarbeitungs- und Analyseprozesses der Methodentestung in einem Flussdiagramm. Die Methodik wichtiger Schritte wird in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

Tabelle 3: Übersicht über die Datenbasis

Legende: *LT = Alter in Lebenstagen, AT = Anzahl der Aufnahme tage, SBS = Schmalbandspektrogramm, PAI = PAI-Diagramm, KB = kanonischer Babbellaut, TU = Tuningdiagramm, M1 = Messvorgang 1, M2 = Messvorgang 2, qual. = „nach qualitativer Datenanalyse“*

Proband (Kategorie)	Aufnahmezeitraum (AT)	Untersuchungszeitraum (AT) N_SBS	N_SBS (qual.)	N_TU	N_PAI (qual.) M1	N_PAI (AT) M2 KB	N_PAI M2 Silben
GA (HI)	297.-1520.LT (54d)	352.-469.LT (12d) 624	156	90	44	25 (10d)	63
GB (HI)	214.-963.LT (46d)	345.-477.LT (11d) 588	171	103	53	45 (7d)	134
GD (HI)	300.-1850.LT (105d)	445.-563.LT (19d) 1662	441	146	23	6 (4d)	12
GH (HI)	65.-1357.LT (107d)	210.-317.LT (17d) 1515	745	393	72	57 (14d)	126
GG* (R)	5.-838.LT (49d)	280.-333.LT (5d) 292	76	43	29	22 (4d)	52
N_Signale HI gesamt	~ 20000	4389	1513	732	192	133	335

Tabelle 4: Einschlusskriterien der Vokalisationen für die PAI-Analyse

PAI-Analyse, Messvorgang 1:
<ul style="list-style-type: none"> - Vokalisation aus der kanonischen Babbelphase - Frequenz der zu vermessenden Signalbereiche $\leq 500\text{Hz}$ - Signal frei von Hintergrundgeräuschen - Intentionales Tuning (kein vegetativer Laut, Lachen oder dysphoner Laut) - klare Struktur der Harmonischen, keine Subharmonischen - klare Struktur der Resonanzfrequenz R1
PAI-Analyse, Messvorgang 2:
<ul style="list-style-type: none"> - alle Punkte wie Messvorgang 1 - Vokalisation klassifizierbar als kanonischer Babbellaut

** die Vokalisationen des Referenzprobanden GG wurden nicht in die Gesamtheit des Datenkorpus einberechnet, da sie lediglich zu Vergleichszwecken dienten und bei der statistischen Aufarbeitung der Ergebnisse nicht mit berücksichtigt wurden*

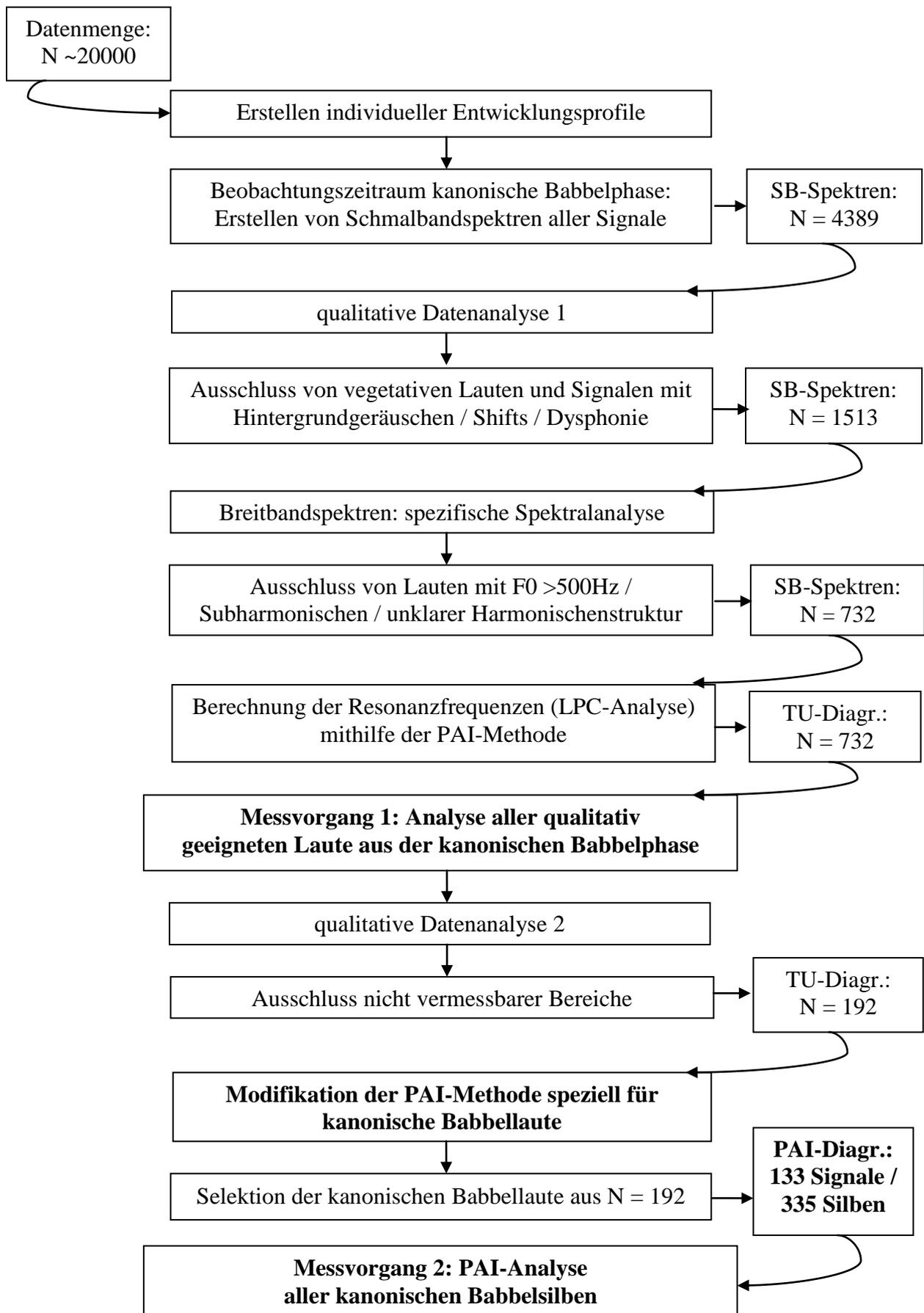


Abbildung 5: Vorgehensweise bei der Datenanalyse und Methodentestung

Legende: SB = Schmalbandspektrogramm, TU = Tuning-Diagramm, PAI = PAI-Diagramm

Nach der für jeden Probanden individuell bestimmten Zeitspanne der kanonischen Babbelphase aus den im Archiv gespeicherten Vokalisationen (N~20000) wurden von allen Vokalisationen aus dem Untersuchungszeitraum (N = 4389) Schmalbandspektrogramme erstellt, anhand derer eine erste Vorauswahl unter den Einzelsignalen getroffen werden konnte: Signale, die aufgrund von Störungen durch Hintergrundgeräusche, Übersteuerung und instabile Grundfrequenzen nicht den qualitativen Mindestanforderungen entsprachen, wurden hier ausgeschlossen. Vegetative Laute wurden bei diesem Schritt ebenfalls identifiziert und ausgeschlossen, da in diesen Vokalisationen keine intentionale Artikulation erwartet wird, die mit der zu testenden Methode untersucht werden sollte. Von den verbleibenden 1513 Einzelvokalisationen wurden zusätzlich zu den Schmalbandspektrogrammen vergleichend Breitbandspektrogramme erstellt. Zu deren Berechnung wurde ebenfalls das CSL-System (Computerized Speech Lab, Modell 4500) der Firma Pentax (früher Kay Elemetrics) verwendet. Anhand der beiden Spektrogramme ließen sich durch die Visualisierung spektraler Eigenschaften jene Laute identifizieren, die Subharmonische, Rauschbanden und plötzliche Melodiesprünge (Shifts) enthielten und die keine klare Struktur der Harmonischen aufwiesen. Diese Laute wurden ausgeschlossen, da sie sich aus technischen Gründen nicht für die anschließende Untersuchung mit der PAI-Methode eignen. Außerdem musste als Vorbereitung auf die spätere Phonations-Artikulations-Interaktionsanalyse der Verlauf der Grundfrequenz überprüft werden. Anhand der Spektrogramme kann der Verlauf der Grundfrequenz selbst nur grob abgeschätzt werden, jedoch ließen sich anhand der höheren Harmonischen jene Laute identifizieren, deren Grundfrequenz in den zu vermessenden Bereichen deutlich über 500Hz lag. Für diese Signalbereiche ist bei der PAI-Analyse keine ausreichend zuverlässige Resonanzfrequenzberechnung gewährleistet (Begründung siehe S.30), sodass diese Laute aus methodischen Gründen ausgeschlossen werden mussten. Vokalisationen, die nur einzelne Shifts der Grundfrequenz in Bereichen enthielten, die für die spätere Analyse nicht relevant waren, zum Beispiel wenn ein Signal mit einem Shift der Grundfrequenz endete, am Signalbeginn aber qualitativ ausreichende Bereiche enthielt, wurden im Datensatz belassen und die fraglichen Bereiche bei der Vermessung nicht berücksichtigt. Unter den eingeschlossenen Einzelvokalisationen aus dem Beobachtungszeitraum der kanonischen Babbelphase waren sowohl präkanonische und kanonische Babbellaute als auch Übergangslaute, variiertes Babbeln sowie vereinzelte Weinlaute. Zwischen diesen einzelnen Vokalisationstypen wurde bei der Datenbearbeitung hier noch nicht näher differenziert, da es sich um Lautäußerungen aus der kanonischen Babbelphase handelt, während der das

Stattfinden intentionaler artikulatorischer Aktivität angenommen wird. Von den 1513 mittels Spektralanalyse überprüften Lautäußerungen der Probanden wurden auf diese Weise 732 Testlaute identifiziert, die zusätzlich zu den qualitativen Mindestkriterien folgende Kriterien erfüllten: Eine anzunehmende intentionale artikulatorische Aktivität, eine Grundfrequenz $<500\text{Hz}$ in für die Vermessung relevanten Signalbereichen sowie eine klar ersichtliche Struktur der Harmonischen.

An diesem Datensample ($N=732$), das nach strenger Vorauswahl gemäß der oben genannten Qualitätskriterien zur Verfügung stand, wurden in der nun folgenden Phase der Testung der Phonations-Interaktions-Analysemethode die Interaktionsmuster zwischen der Melodie, ihren Harmonischen und der ersten Resonanzfrequenz (R_1) mittels Tuning-Diagramm dargestellt und anschließend messtechnisch untersucht (siehe Abbildung 6): Die Ermittlung der Grundfrequenzverläufe (Melodie) und der tiefsten drei Resonanzfrequenzen (Formanten) mit ihren zeitlichen Variationen für alle 732 Einzelsignale erfolgte unter Verwendung des LPC-Algorithmus (Linear Predictive Coding) des Computerized Speech Lab (Firma Pentax, USA) als Standardverfahren der Resonanzfrequenzanalyse. Es handelt sich hierbei um eine adaptive Autokorrelationsmethode bzw. Kovarianzmethode. Der LPC-Algorithmus generiert dabei aus einer Folge von Abtastwerten eine lineare Voraussage für den Verlauf der Resonanzfrequenz. Das Programm geht dabei in Schritten von 5ms bei einer Fensterlänge von 10-20ms vor. Mit der LPC-Analyse soll eine Vorhersage des Resonanzfrequenzverlaufs mit möglichst wenigen Koeffizienten erreicht werden. Die Melodie, also der von den Stimmlippen ausgehende Signalanteil einer Vokalisation, wird bei der LPC-Analyse von der Resonanzfrequenz, die eine Funktion des Vokaltraktes darstellt, mithilfe eines Filters getrennt. Dieser Filter wird durch spektrale Peaks festgelegt, die als Polstellen des Filters angenommen werden (Markel & Gray, 1982). Bei Grundfrequenzen $>500\text{Hz}$ besteht bei der automatischen Analyse mit dem LPC-Algorithmus jedoch die Gefahr, dass nahe beieinanderliegende Resonanzfrequenzen nicht korrekt voneinander getrennt werden können, besonders wenn die Grundfrequenz F_0 bei hochfrequenten vokalischen Anteilen wie [i] und [u] in die Nähe der ersten Resonanzfrequenz R_1 rückt. Aus diesem Grund wurden solche Signale bereits, wie oben beschrieben, bei der Spektralanalyse aus dem Datensatz aussortiert. Trotzdem lieferte die PAI-Methode nicht für alle Signale, die anhand der Analyse der Schmal- und Breitbandspektrogramme geeignet erschienen, auch vermessbare Resonanzfrequenzverläufe, da es aufgrund von teils zuvor nicht erkennbarer, zu geringer Signalintensität zu partiellen Abbrüchen der Resonanzfrequenz kam oder das Programm

keine nachvollziehbaren Resonanzfrequenzverläufe errechnen konnte. Die entsprechenden Signale wurden deshalb nach der Berechnung der Resonanzfrequenzverläufe und der Begutachtung der PAI-Diagramme aussortiert (N = 192).

In den meisten Signalen wurden mittels LPC-Algorithmus bis zu einem Frequenzbereich von 4kHz drei Hauptresonanzbänder gefunden, die Resonanzfrequenzen R_1 - R_3 . R_1 verlief meist zwischen 1-2kHz und stellte sich als gut vermessbar da, während der Verlauf von R_2 (meist zwischen 2-3kHz) in fast allen Signalen für eine Vermessung nicht mehr ausreichend genau ermittelt werden konnte bzw. zu wenig ausgeprägt war. R_3 war in keinem Signal ausreichend deutlich erkennbar. Aus diesem Grund wurde auf eine Analyse von R_2 und R_3 für alle Signale verzichtet.

Von den anfangs 732 potentiell geeigneten Vokalisationen aus der kanonischen Babbelphase mit Grundfrequenzen kleiner oder gleich 500Hz zeigten sich nach der Erstellung der Tuning-Diagramme also noch 192 Einzelsignale als potenziell mit der zu untersuchenden PAI-Methode vermessbar. Laute mit einzelnen Grundfrequenzbereichen >500Hz wurden im Datensatz belassen, wenn sie vermessbare Signalbereiche enthielten, die bei einer Grundfrequenz <500Hz lagen. Gemittelt wurde bei der Bestimmung der mittleren Grundfrequenz jedoch über das gesamte Signal, was sich bei der Analyse der mittleren Grundfrequenz (siehe Ergebnisse Kapitel 3.4) niederschlägt.

Mit dem nun vorhandenen Datensample (N = 192, Einschlusskriterien siehe auch Tabelle 4) erfolgte eine erste Methodentestung (Messvorgang 1) mit den in Kapitel 2.5 beschriebenen Messkriterien der Resonanzfrequenzanalyse, die ursprünglich für den Vokalisationstyp „Schrei“ definiert wurden und in der Arbeit von Kempf zum ersten Mal zur Anwendung kamen (Kempf, 2008). Aufgrund der während des **Messvorgangs 1** festgestellten und in Kapitel 3.1 beschriebenen methodischen Restriktionen war im letzten Analyseschritt eine weitere Reduktion der Datenmenge notwendig: Wie sich zeigte, waren die verwendeten Messkriterien nicht uneingeschränkt auf ein derart inhomogenes Datensample anwendbar, wie es bei der Zusammenfassung unterschiedlicher Vokalisationstypen (präkanonische und kanonische Babbellaute, Übergangslaute, Weinlaute) entsteht, obwohl diese zeitgleich während der kanonischen Babbellaute auftreten können. Für den letzten Schritt der Methodentestung, **Messvorgang 2**, wurden ausschließlich kanonische Babbellaute analysiert.

Von ursprünglich fast 4400 voranalysierten Einzelsignalen aus dem gewählten Beobachtungszeitraum gingen somit in den endgültigen Methodentestvorgang noch 133 geeignete Einzelsignale (kanonische Babbellaute) bzw. 335 einzelne Babbelsilben ein.

Diese strenge Datenreduktion war erforderlich, um geeignete Testsignale zu identifizieren und mit der gewählten Methode reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

2.5. Qualitative und quantitative Analyse von Artikulationsphänomenen mithilfe der PAI-Methode

Grundlage der durchgeführten Resonanzfrequenzanalyse waren die in der Arbeit von Kempf definierten Messkriterien für den Vokalisationstyp „Schrei“ von Kindern im dritten und vierten Lebensmonat (Kempf, 2008). Basierend auf diesen Interaktionsmustern können Artikulationsvorgänge qualitativ und quantitativ charakterisiert werden (K. Wermke & Mende, 2011). Sie bildeten die Grundlage für die nachfolgende Testung der PAI-Methode bei der Analyse der Interaktionsmuster zwischen der Grundfrequenz und ihren Harmonischen in kanonischen Babbellauten.

Abbildung 6 zeigt die interaktive PAI-Messroutine am Tuningdiagramm eines Signals im Analysemodul Formant/Melodie-Interaktion des CDAP-Programms (pw-project) am ZVES: Im PAI-Diagramm sind der Verlauf der Grundfrequenz bzw. Melodie (schwarz, fettgedruckt) und der ihrer Harmonischen (schwarz, dünner gedruckt) über die Zeit aufgetragen. Im selben Diagramm kommen, farblich als rote (Tuning) und blaue Punkte (Nichttuning) abgesetzt, die mit dem LPC-Algorithmus ermittelten Resonanzfrequenzen mit ihrem Verlauf zwischen den Harmonischen hinzu (hier abgebildet: R_1 und R_2 , ein Farbpunkt entspricht 5ms). Die roten Cursors werden per Mausklick manuell an den Anfang bzw. das Ende der gewünschten Signalabschnitte gesetzt. Dabei wird die Zeitdauer des Elements zwischen den beiden Cursors automatisch in einer Exceltabelle erfasst und die Interaktionsart der Resonanzfrequenz mit der Melodie und ihren Harmonischen während des markierten Signalabschnitts über die Eingabemaske manuell charakterisiert. Die Klassifikation der Interaktionsmuster erfolgt nach den unten beschriebenen Kriterien und wird über die Eingabemaske ebenfalls automatisch in einer Exceltabelle gespeichert. Die manuelle Bestimmung der Interaktionselemente für alle untersuchten Signalbereiche ist äußerst zeitintensiv, kann jedoch aufgrund der jeweils individuellen Signalstruktur in der Testphase noch nicht automatisiert werden.

Abbildung 6 zeigt an einem Beispiellaut die Vermessung des zweiten Tuningelementes der Resonanzfrequenz R_1 auf der zweiten Harmonischen H_2 (rote Punkte zwischen den Cursors). Insgesamt sind drei Tuningelemente auf den Harmonischen H_{1-3} vorhanden.

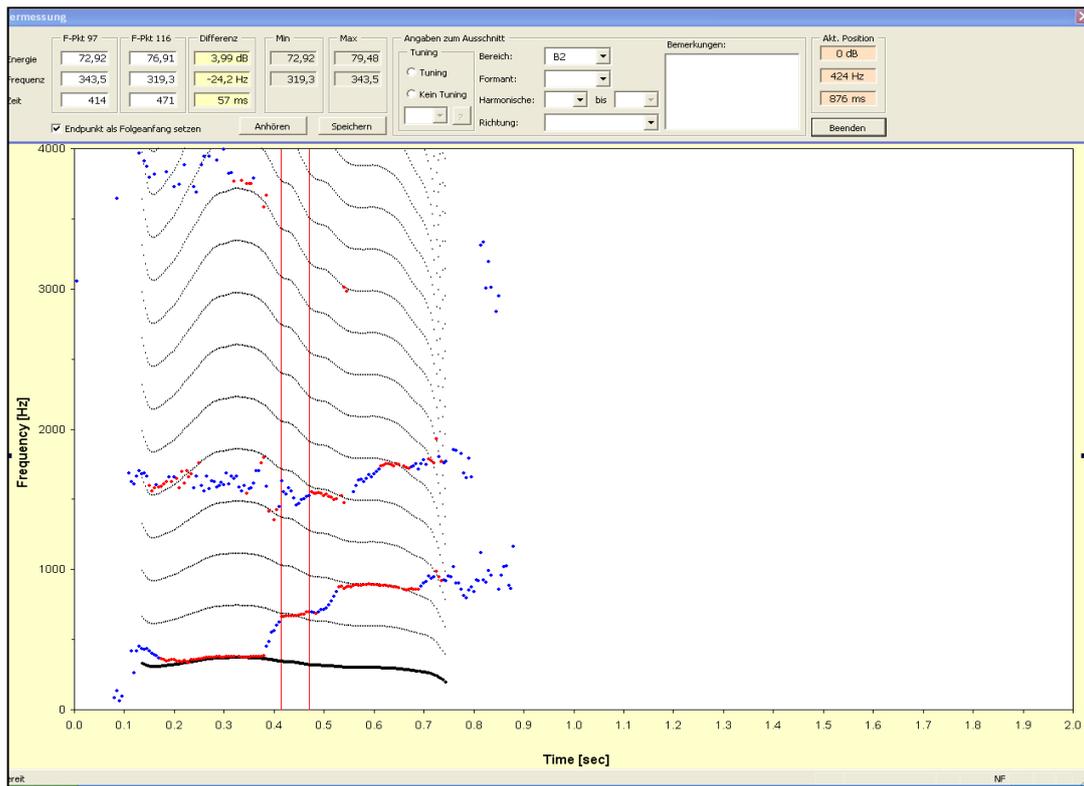


Abbildung 6: Maske des Moduls Formant/Melodie-Interaktion im CDAP-Programm

Im Folgenden sind die Interaktionsmöglichkeiten der Resonanzfrequenz mit der Melodie bzw. ihren Harmonischen, die bei der Vermessung erfasst werden können, näher charakterisiert (K. Wermke, et al., 2002; K. Wermke, et al., 2005):

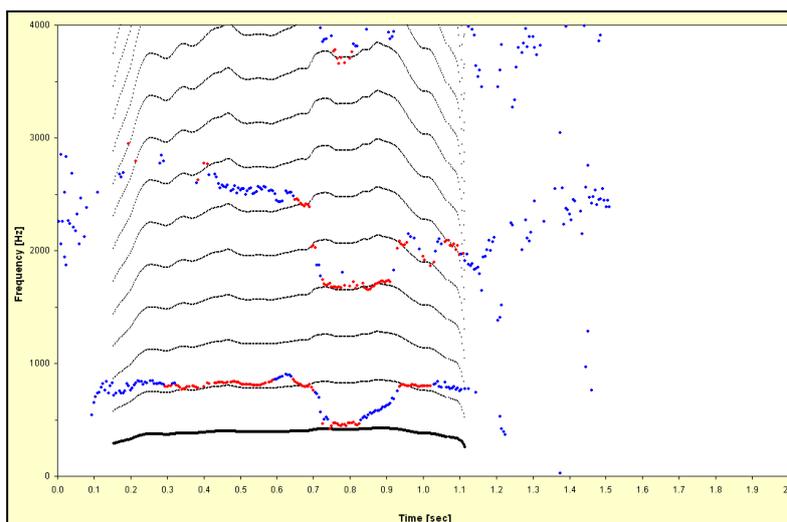
Tuning:

Als Tuning (T) einer Resonanzfrequenz, hier der tiefsten Resonanzfrequenz R_1 , wird der Verlauf der Resonanzfrequenz in einem Bereich von maximal 9% ober- oder unterhalb des Frequenzbereichs einer Harmonischen bezeichnet, also der Verlauf von R_1 innerhalb eines Frequenzbandes von 18% um eine Harmonische. Im PAI-Diagramm sind alle Tuningbereiche mit roten Punkten markiert. Ein Punkt entspricht der Dauer von 5ms. Über die Eingabemaske werden nach dem Setzen der Cursors zur Vermessung des Signalabschnittes weitere Charakteristika des Tuningelementes festgehalten, wie etwa die Harmonische, auf der getunt wird. In dem in Abbildung 6 dargestellten Beispiel grenzen die Vermessungscursoren den zweiten Tuningbereich des Lautes ein (R_1 zeigt Tuning auf der zweiten Harmonischen). Danach folgt ein Übergangsbereich (Nichttuning, blaue Punkte), gefolgt von einem weiteren Tuningbereich von R_1 auf der dritten Harmonischen H_3 . R_2 zeigt in diesem Bereich kurzzeitiges Tuning auf H_5 und H_6 .

Als Nichttuning werden die Signalbereiche klassifiziert, in denen sich die Resonanzfrequenz R_1 außerhalb eines Frequenzbandes von 18% um die jeweilige Harmonische befindet. Solche Abschnitte der Resonanzfrequenz markiert das Interaktionsanalyseprogramm mit blauen Punkten, von denen ein Punkt ebenfalls der Zeitdauer von 5ms entspricht. Nichttuning kann in verschiedene Kategorien unterteilt werden:

Einschwingen:

Als Einschwingen (Abbildung 7) wird der ungerichtete Resonanzfrequenzverlauf vom Beginn des Signals bis zum ersten Tuning auf einer Harmonischen bezeichnet. Es ist oft noch keine eindeutige Tendenz des Resonanzfrequenzverlaufs nach oben oder nach unten in Richtung einer bestimmten Harmonischen zu erkennen. Nach dem Setzen der Cursoren erfasst das Programm automatisch die entsprechende Zeitdauer sowie nach dem Beenden der Vermessung die Information „Signal mit Einschwingen“ oder „Signal ohne Einschwingen“ in einer Exceltabelle.



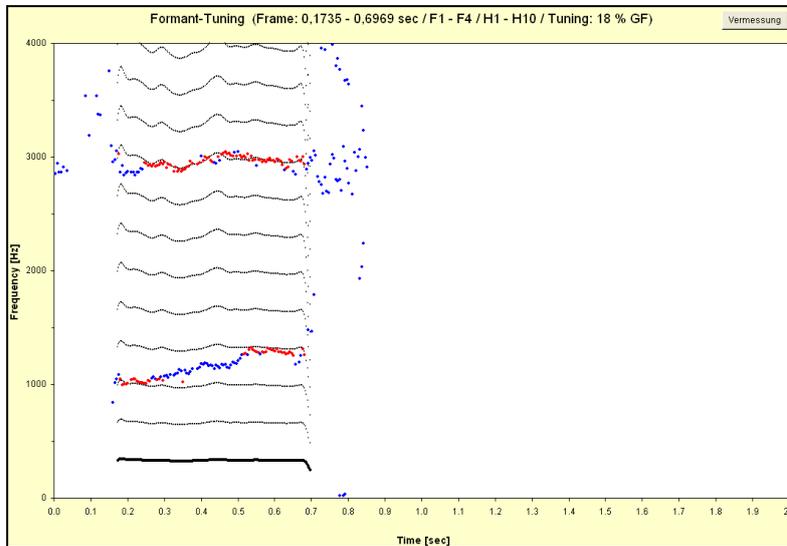
Beispiel für das Auftreten eines Einschwingvorgangs von R_1 am Beginn des Signals, bevor R_1 ein Tuningelement auf der zweiten Harmonischen zeigt.

Abbildung 7: Einschwingen (E)

Übergang:

Bei einem Übergang wechselt die Resonanzfrequenz im zeitlichen Verlauf von einer Harmonischen auf eine andere, entweder nach oben (H_x nach H_{x+n} , „Uno“ abgekürzt für Üebergang nach oben) oder nach unten (H_x nach H_{x-n} , „Unu“ abgekürzt für Üebergang nach unten). Dabei können beliebig viele Harmonische zwischen Ausgangs- und Zielharmonischer übersprungen werden (Anzahl n). Das Interaktionsanalyseprogramm erfasst die Dauer des vermessenen Abschnitts, sodass die mittlere Übergangsdauer

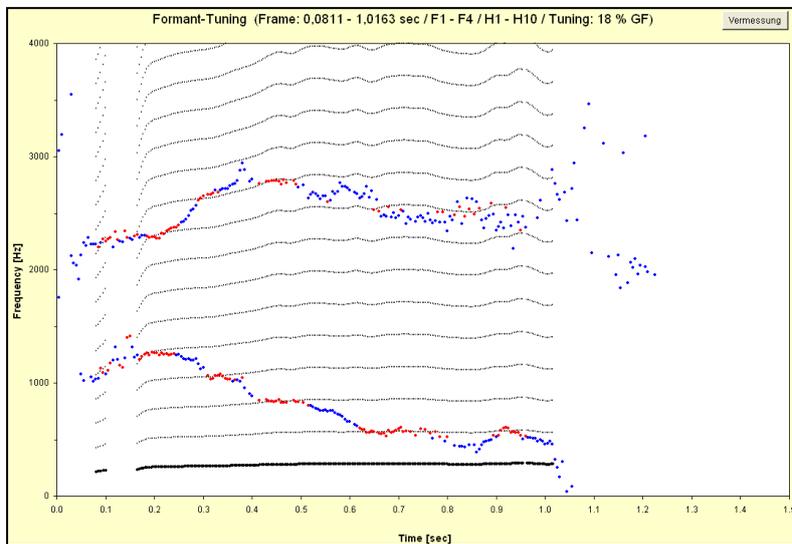
berechnet werden kann. Die Anzahl der dabei übersprungenen Harmonischen wird manuell erfasst (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9).



Beispiel für einen Übergang nach oben, bei dem R_1 zuerst Tuning auf der dritten Harmonischen zeigt und nach einem Übergang nach oben auf der vierten Harmonischen tunt.

R_2 zeigt Tuning auf H_9 .

Abbildung 8: Übergang nach oben (Uno)



Beispiel für drei aufeinanderfolgende Übergänge nach unten über jeweils eine Harmonische mit nachfolgenden Tuningbereichen. Zu Beginn des Signals Einschwingen, nach dem dritten und vierten Tuningelement Freilauf.

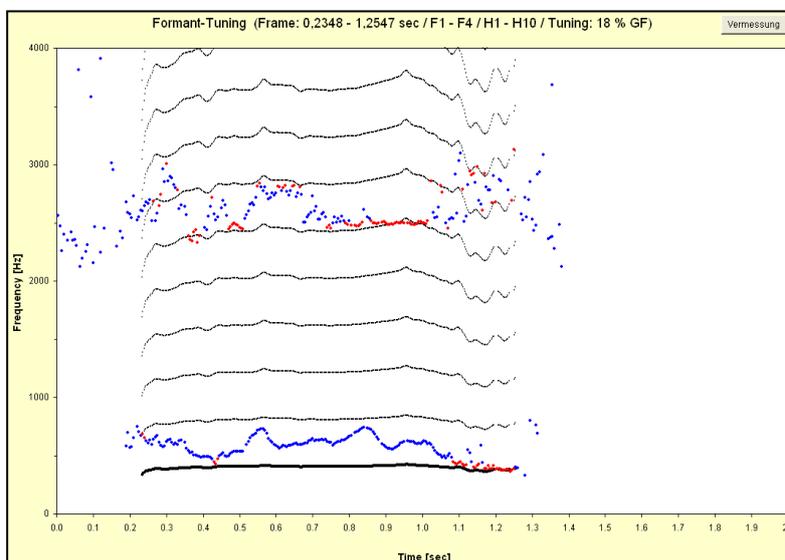
Abbildung 9: Übergang nach unten (Unu)

Freilauf:

Mit Freilauf (Abbildung 10) werden Resonanzfrequenzbereiche klassifiziert, in denen kein Tuning, kein gerichteter Übergang zwischen verschiedenen Harmonischen und kein Einschwingen vorliegen. Mit Freilauf werden auch solche Resonanzfrequenzbereiche bezeichnet, in denen sichtbar wird, dass intentional von einer Harmonischen auf eine andere gewechselt werden sollte, diese jedoch nicht erreicht wurde und R_1 wieder zum Tuning auf die ursprüngliche Harmonische zurückkehrt. Freilauf kann innerhalb oder am Ende eines Signals stattfinden (vergleichbare Resonanzfrequenzverläufe zu Signalbeginn werden als Einschwingen klassifiziert).

Noise:

Als Noise (N) werden alle Bereiche bezeichnet, die durch das Interaktionsanalyseprogramm im Tuning-Diagramm als Punktwolke dargestellt werden, für die also die Signalintensität oder Signalgüte nicht für eine genaue Berechnung der Resonanzfrequenz ausreichen, wie in Abbildung 10 am Beispiel von R_2 deutlich wird.



Beispiel für Freilauf der ersten Resonanzfrequenz R_1 zwischen der Grundfrequenz und der zweiten Harmonischen mit kurzem Tuningbereich auf F_0 am Ende des Signals. $R_2 = \text{Noise}$.

Abbildung 10: Freilauf (F) und Noise (N)

Nach Ende der Bearbeitung einer Einzelvokalisation berechnet eine dem CDAP-Analyseprogramm hinterlegte Excelfunktion automatisch die durchschnittliche Dauer der einzelnen Tuningelemente für den analysierten Laut und das Verhältnis von Tuningzeit und Nichttuningzeit, also den T/NT-Quotienten, und fasst die absolute Dauer von Tuning und Nichttuning je Signal zusammen.

In der Arbeit von Kempf (2008) wurden als spezielle Messgrößen präartikulatorischer Aktivität in Weinlauten von Säuglingen mit orofazialer Spaltbildung der Tuning/Nichttuning-Quotient, das Interaktionsmuster „Tuning-Übergang-Tuning“ der ersten beiden Resonanzfrequenzen R_1 und R_2 sowie die mittlere Tuningzeit und die mittlere Resonanzfrequenzübergangszeit untersucht. Zur weiteren Differenzierung untersuchte Kempf auch das Verhältnis von Tuningbereichen vor einem Übergang zum nachfolgenden Übergangsbereich (Tv/U-Quotient) sowie das Verhältnis der Übergangsbereiche zu nachfolgendem Tuning (U/Tn-Quotient).

Da zur Analyse vorsprachlicher Artikulationsvorgänge in Säuglingslauten aus der kanonischen Babbelphase in der Literatur bisher kaum Daten oder Kenngrößen vorliegen, war es Teil der vorliegenden Arbeit, in einer Pilotuntersuchung die PAI-Methode zur Beschreibung und Quantifizierung dieser Artikulationsvorgänge zu testen. Dies erfolgte in Messvorgang 1 primär anhand der in diesem Kapitel beschriebenen und von Kempf untersuchten Größen zur qualitativen und quantitativen Charakterisierung von Artikulationsphänomenen in Weinlauten (Kempf, 2008). Dabei zeigte sich jedoch, dass diese Messgrößen nicht uneingeschränkt zur Untersuchung kanonischer Babbellaute geeignet waren, sodass die Methode durch die Autorin vorliegender Arbeit speziell für die Analyse kanonischer Babbelsilben modifiziert und erweitert wurde. Da dies ein wesentliches Ergebnis der vorliegenden Arbeit war, wird dieser Prozess im Ergebnisteil in den Kapiteln 3.1 – 3.3 weiter ausgeführt.

2.6. Statistische Verfahren

Mithilfe von Microsoft Excel 2000 wurden die gemessenen Größen automatisiert in Tabellen erfasst. Die Errechnung der Quotienten und Mittelwerte erfolgte mit Microsoft Excel 2007, wobei auf die Kompatibilität der Programme geachtet wurde. Die deskriptive Statistik erfolgte mit IBM SPSS Statistics 21 und 22 für Windows. Für alle Probanden wurden mittels deskriptiver Statistik Auswertungsprofile für die vermessenen Signalbereiche über die einzelnen Aufnahmetage erstellt. Zum Vergleich der Messwerte der einzelnen Kinder wurden die Daten mittels Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung überprüft (Signifikanzniveau $p=0,05$). Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden Boxplotdiagramme erstellt. In der Box ist der Medianwert mit einem schwarzen Querbalken markiert; innerhalb der Box befinden sich 50% der Werte. Die Whiskers bilden Werte bis zu einer maximalen Entfernung von 1,5-Interquartilsabständen ab. Extremwerte zwischen 1,5 und 3 Interquartilsabständen sind mit Kreisen, solche >3 Interquartilsabständen mit Sternen markiert.

Obwohl die Testergebnisse auch in Form deskriptiver Statistiken und, soweit möglich, in Form von Interferenzstatistiken berichtet wurden, war der Nachweis der Anwendbarkeit der PAI-Methode vorrangiges Ziel der Arbeit. Die statistischen Tests stellen ein untergeordnetes Element dieser Anwendungsuntersuchungen dar, da bisher kaum Referenzwerte vorliegen, um die Tests geeignet zu interpretieren, und das Testsampel der untersuchten Kinder sehr klein war.

3. Ergebnisse

3.1. Testung der Anwendbarkeit der PAI-Methode zur Charakterisierung artikulatorischer Vorgänge in kanonischen Babbellauten

Zentraler Bestandteil dieser Arbeit war die Testung der Phonations-Artikulations-Interaktionsanalysemethode (PAI-Methode) zur Charakterisierung artikulatorischer Vorgänge in kanonischen Babbellauten bei Kindern mit sensorineuraler Hörbeeinträchtigung.

Im ersten Schritt wurden die Testsignale des hörgesunden Probanden R-GG dazu verwendet, zunächst die Zuverlässigkeit der PAI-Methode bei der Anwendung auf die Vokalisationen eines hörgesunden Kindes durch eine vergleichende CSL-Analyse (Computerized Speech Lab, Kay / Pentax, USA) zu überprüfen. Dazu wurden mit dem CSL-Programm von verschiedenen Audiofiles (.wav-Dateien) Breitbandspektrogramme erstellt. Die in den Breitbandspektren erkennbaren Formanten (Resonanzfrequenzen) wurden dann mit den im Tuningdiagramm des Formantanalyseprogramms gefundenen Werten und Verläufen verglichen. In Abbildung 11 sind beispielhaft für ein Testsignal des hörgesunden Probanden R-GG die Zeitdarstellung, das Schmal- und Breitbandspektrogramm sowie das dazugehörige Tuning-Diagramm abgebildet. Es handelt sich hier um einen viersilbigen, kanonischen Babbellaut.

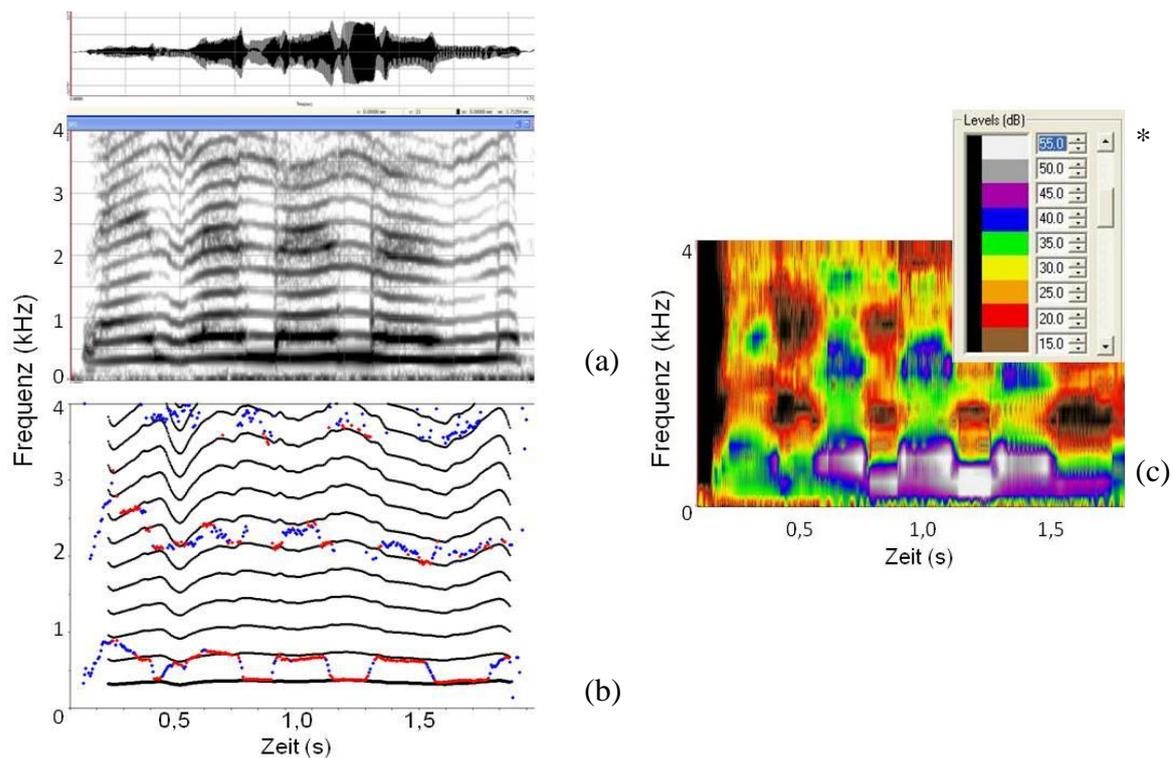


Abbildung 11: Testsignal des hörgesunden Probanden R-GG (280. Lebensstag)

Schmalband- (a)/ Breitbandspektrogramm (c) und Tuningdiagramm (b) eines kanonischen Babbellautes, Farbpalette (*) zur Kodierung der Intensität der einzelnen Frequenzbereiche

Das Tuningdiagramm (Abbildung 11 (b)) zeigt einen bogenförmigen Verlauf des ersten Formanten mit einem Wechsel des Tunings zwischen der zweiten und ersten Harmonischen. Diese Wechsel entsprechen den Silbenstrukturen der Babbelvokalisationen. Die beiden Spektrogramme (Abbildung 11 (a) und (c)) verdeutlichen sowohl den Silbencharakter des Signals als auch die stärksten Resonanzen auf H_1 (entspricht der Grundfrequenz F_0) und H_2 . Das Breitbandspektrogramm (Abbildung 11 (c)) demonstriert, dass das im Tuningdiagramm erkennbare Interaktionsmuster zwischen Phonation und Artikulation, also zwischen Melodie / F_0 und der ersten Resonanzfrequenz R_1 , korrekt ermittelt wurde. In Abbildung 12 zeigt sich anhand eines Ausschnittes aus einem kanonischen Babbellaut von R-GG, dass auch die ausgeprägten Resonanzmuster besonders starker artikulatorischer Aktivität (R_1 und R_2) im Tuningdiagramm deutlich erkennbar sind. Alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit analysierten Testsignale des gesunden Kindes R-GG lieferten ähnliche Ergebnisse und belegten damit die prinzipielle Eignung der PAI-Methode zur Darstellung und Untersuchung der Phonations-Artikulations-Interaktion kanonischer Babbellaute.

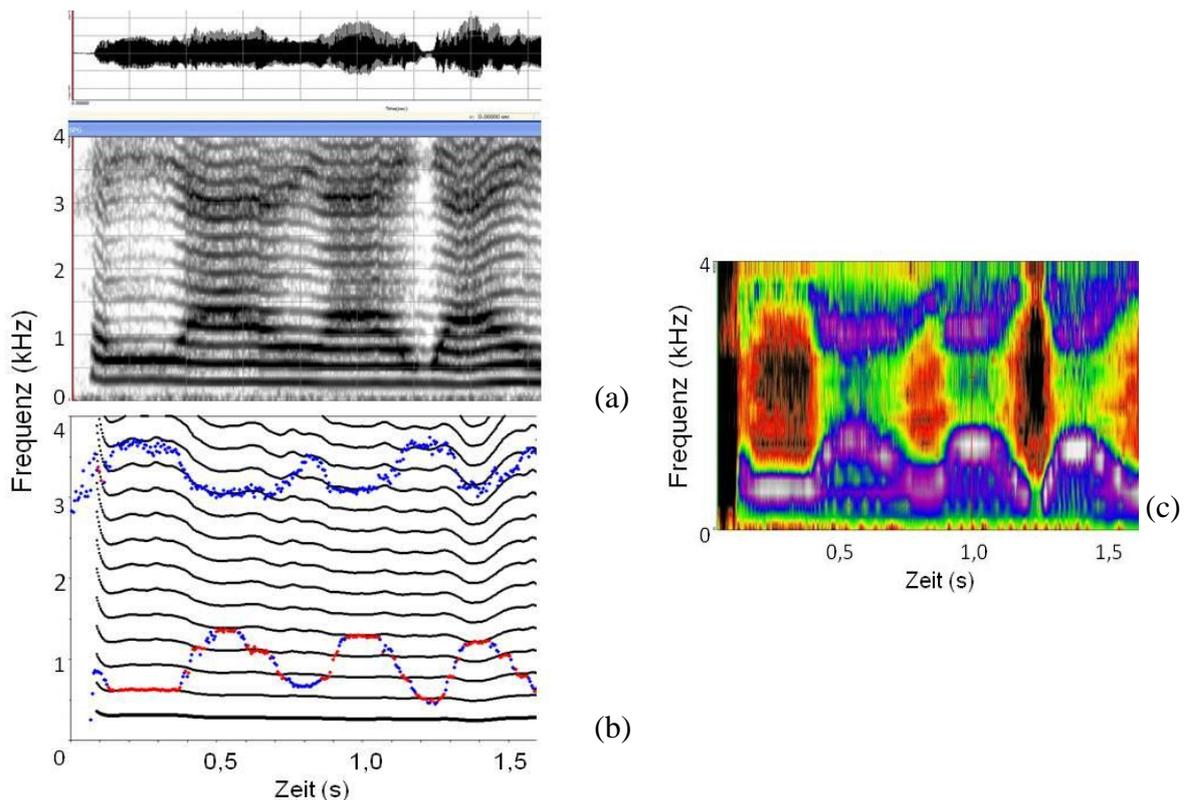


Abbildung 12: Testsignal des hörgesunden Probanden R-GG (333. Lebensstag)

Schmalband- (a) und Breitbandspektrogramm (c) sowie Tuningdiagramm (b) eines kanonischen Babbellautes mit ausgeprägter artikulatorischer Aktivität

In einem nächsten Schritt der Testung musste geprüft werden, ob kanonische Babbellaute von sensorineural hörbeeinträchtigten Kindern mit der gewählten Methode in gleicher Weise untersucht werden können. Es stellte sich dabei die Frage, ob sich die Lauteigenschaften der Babbellaute hörbeeinträchtigter Kinder durch deren partielle auditive Deprivation so stark von den Lauten hörgesunder Kinder unterscheiden, dass sich die Methode als unzureichend für das Aufzeigen und Vermessen der relevanten Merkmale dieser Vokalisationen erweisen würde. Nach eingehender Testung zeigte sich, dass dies nicht der Fall ist: In den nachfolgenden Abbildungen sind typische Beispiele kanonischer Babbelmuster der hörbeeinträchtigten Probanden dargestellt – diese zeigen große Ähnlichkeiten mit den Darstellungen der Babbelmuster des hörgesunden Mädchens R-GG.

Abbildung 13 zeigt ein typisches Beispiel von Proband HI-GA am 352. Lebensstag, dem ersten Tag der kanonischen Babbelphase (siehe Entwicklungsprofil in Abbildung 1). Ca. 3 Monate nach Erstaktivierung des Cochleaimplantates zeigt GA bereits wohlgeformte kanonische Babbelsilben mit ausgeprägten Tuningbereichen der Resonanzfrequenz R_1 in den vokalischen Anteilen der Silben:

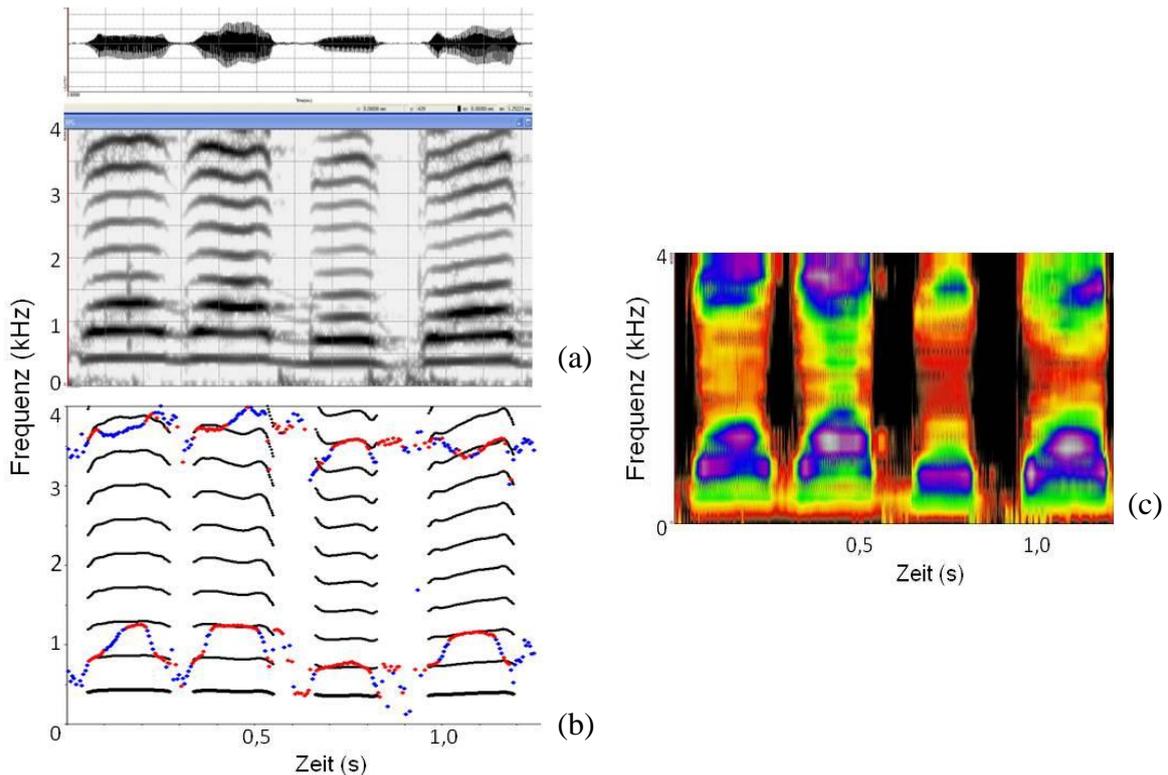


Abbildung 13: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GA (352. Lebensstag)

Schmal- (a) und Breitbandspektrogramm (c) sowie Tuningdiagramm (b) eines viersilbigen kanonischen Babbellautes, Länge der Tuningbereiche ca. 200ms

Hervorzuheben ist, dass das Tuning unmittelbar an den Rändern der Silben erreicht wird und sowohl auf der zweiten Harmonischen als auch der dritten Harmonischen stattfindet, was unterschiedlichen Resonanzfrequenzen für unterschiedliche Vokale entspricht. Man erkennt eine deutliche Segmentierung der einzelnen Silben (Rhythmisierung), die sowohl durch Melodiepausen als auch durch die Bildung von konsonantischen Silbenanteilen erreicht wird (siehe auch Kapitel 3.2).

Die Darstellung zeigt damit eine gut entwickelte artikulatorische Leistung. Die Zeitdauer des Tunings fällt ebenfalls in einen ähnlichen Bereich wie in dem ersten Beispielsignal des hörgesunden Kindes R-GG. Die detaillierte Auswertung der Vermessung der zeitlichen Kenngrößen sowie die Auswertung der Frequenzbereiche von F_0 und R_1 ist in den nachfolgenden Kapiteln berichtet.

Abbildung 14 zeigt einen Beispiellaut von Proband GB, ebenfalls am ersten Tag des Erreichens der kanonischen Babbelphase. Das Kind war zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit einem Cochleaimplantat versorgt, sondern trug beidseits HDO-Hörgeräte. Es handelt sich um einen sechssilbigen Babbellaut mit dem für diese Laute typischen Tuning-/Nichttuning-Wechselmuster:

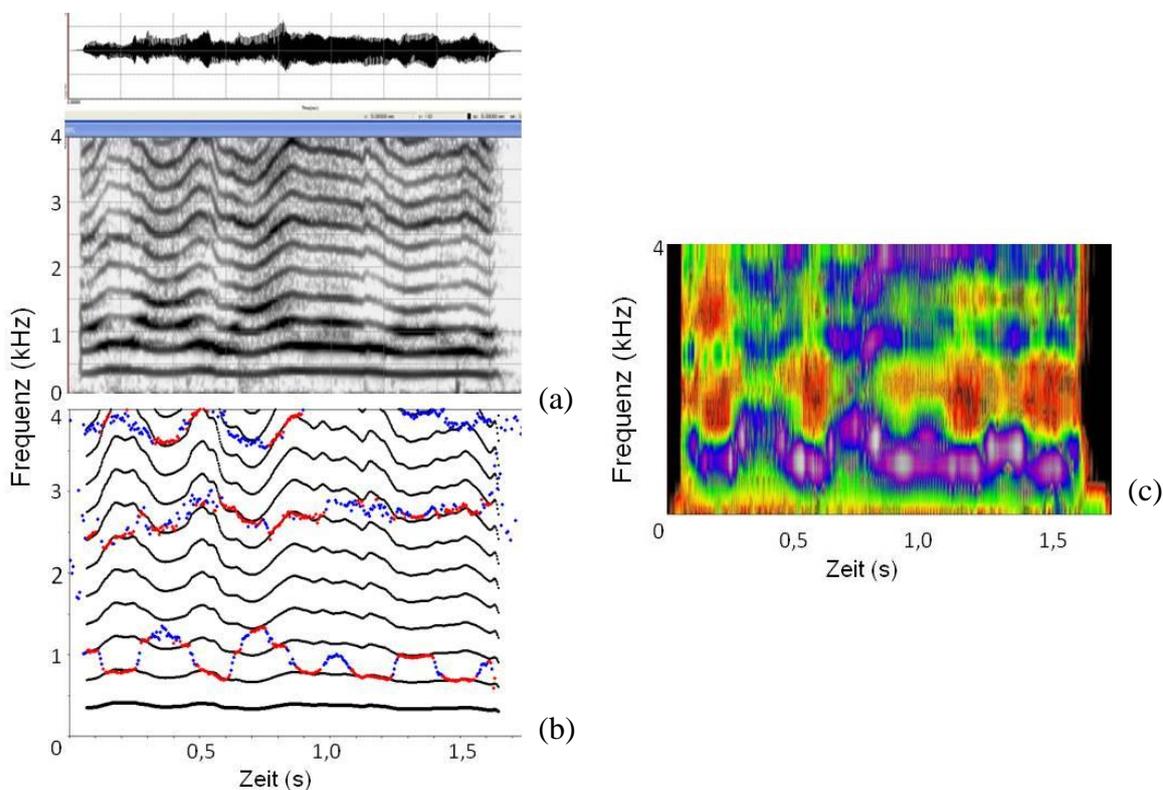


Abbildung 14: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GB (345. Lebenstag)

Schmal- (a) und Breitbandspektrogramm (c) sowie Tuningdiagramm (b) eines sechssilbigen kanonischen Babbellautes

Das Tuning wechselt zwischen H_2 - H_4 . Silbe 2 und 4 erreichen im vokalischen Element kein Tuning. Die zweite Resonanzfrequenz R_2 verläuft noch relativ starr und zeigt noch keine Interaktion mit den Harmonischen. Das vokalische Tuningmuster ist hier insgesamt etwas schlechter als in dem Beispiel der Probandin GA, da für den Nukleus des Vokals nicht immer ein Tuning mit der entsprechenden Harmonischen erreicht wird. Allerdings zeigt sich die artikulatorische Leistungsfähigkeit dieses Probanden dadurch, dass er in der Lage ist, in einem etwa drei Sekunden langen Babbellaut neun Silben zu artikulieren (Abbildung 15). Bei sieben der neun Silben ist Tuning im vokalischen Bereich zu beobachten:

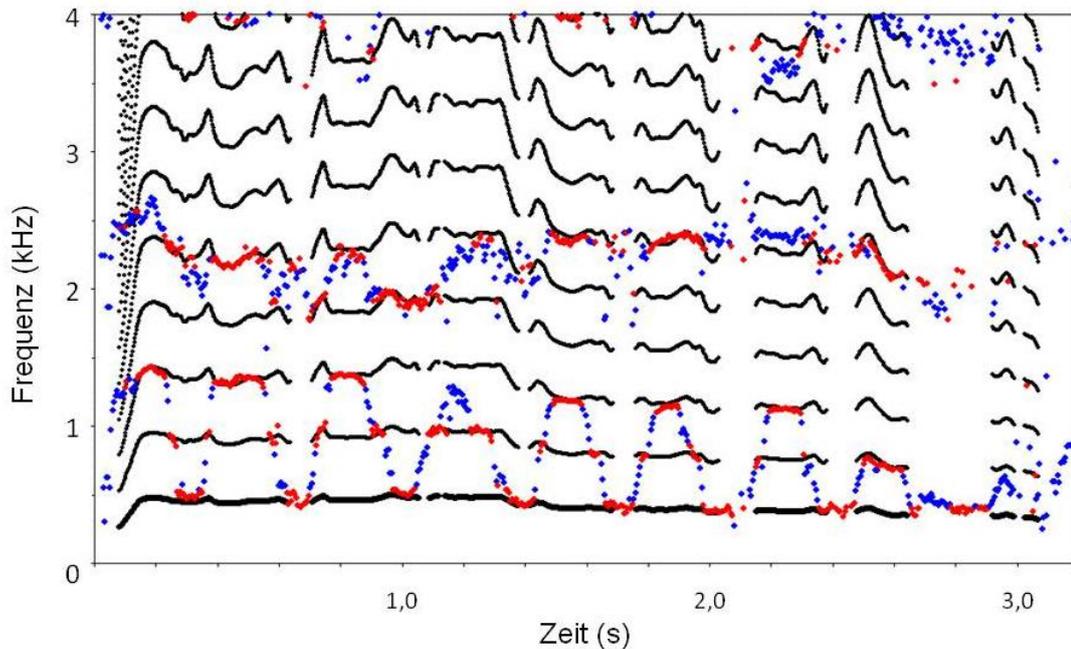


Abbildung 15: Neunsilbiger kanonischer Babbellaut, Proband HI-GB (439. Lebensstag)

Die Testsignale des Probanden HI-GD lieferten bei der Untersuchung mithilfe der PAI-Methode einen deutlichen Unterschied zu denen der beiden vorhergehend dargestellten Probanden. Die kanonische Babbelphase beginnt bei diesem Probanden zwar bereits 1,5 Monate nach CI-Erstaktivierung, allerdings ist das Kind zu diesem Zeitpunkt bereits 13 Monate alt. Die kanonischen Babbellaute des Probanden GD zeigen vorwiegend vokalische Silbenanteile. Konsonantische Elemente waren kaum zu beobachten. Die hörbare Segmentierung und Rhythmisierung der Silben erfolgt nicht durch konsonantische Silbenanteile, sondern durch kurze Unterbrechungen der Phonation, in den Schmal- und Breitbandspektrogrammen und im Tuningdiagramm sichtbar als Abbrüche der Grundfrequenz. Abbildung 16 zeigt das Schmal- und das Breitbandspektrogramm sowie das Tuningdiagramm eines typischen Lautes von Proband GD am 445. Lebensstag. Die Resonanzfrequenzen des Vokaltraktes stehen nicht in Interaktion mit den ausgeprägten rhythmischen Phonationen ([a]-[a]-[a]-...), sondern sind als starre Resonanzen über dem durch Melodieabbrüche segmentierten Laut erkennbar. Auch der Laut in Abbildung 17 drei Monate später zeigt nur den Versuch des typischen Tuning- / Nichttuning-Wechselmusters eines Babbellautes, ohne jedoch die für diese Laute bei den anderen Probanden charakteristischen Tuningsequenzen für die vokalischen Silbenelemente zu erreichen. Die artikulatorische „Fitness“ ist hier nach der PAI-Methode deutlich schlechter zu bewerten als bei den beiden zuvor beschriebenen Probanden. Dies zeigt sich auch bei der Vermessung der Laute, die nachfolgend berichtet werden.

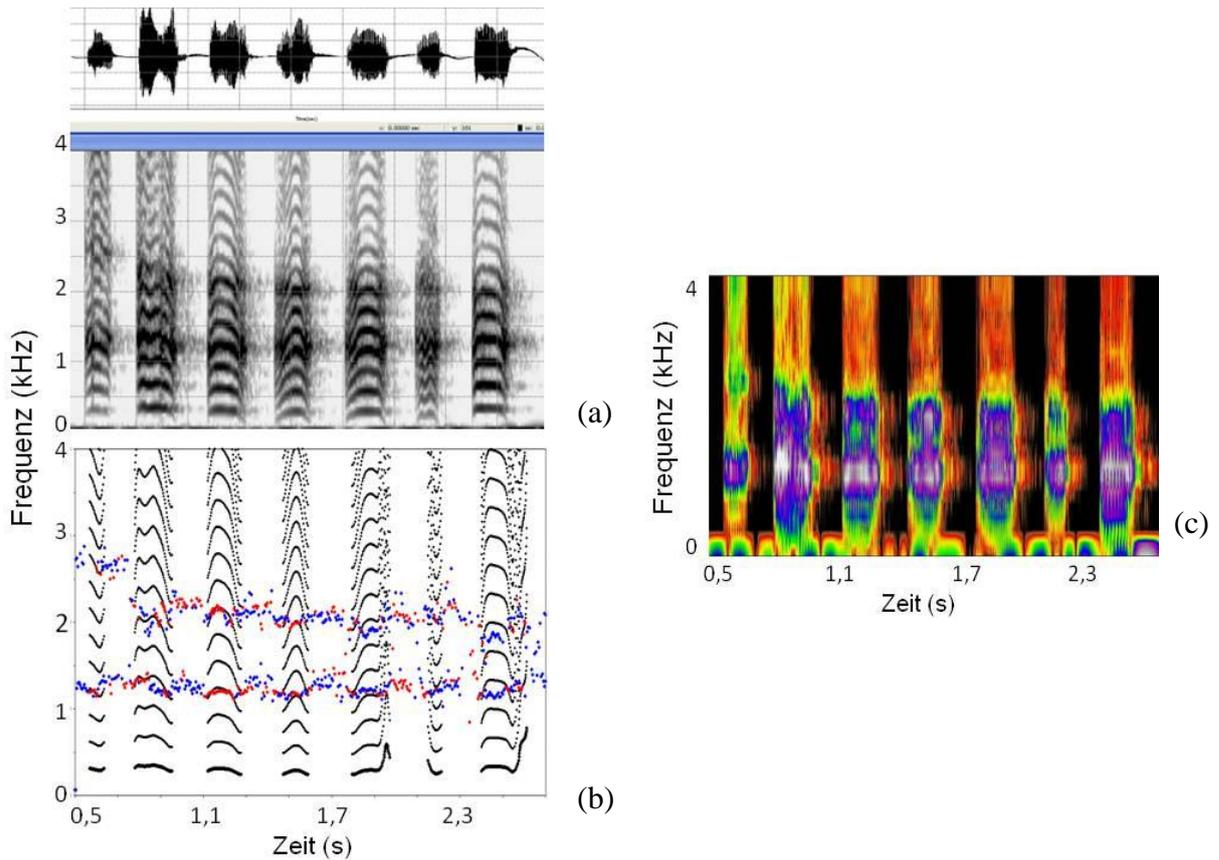


Abbildung 16: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GD (445. Lebensstag)

Schmal- (a) und Breitbandspektrogramm (c) sowie Tuningdiagramm (b) eines siebensilbigen kanonischen Babbellautes

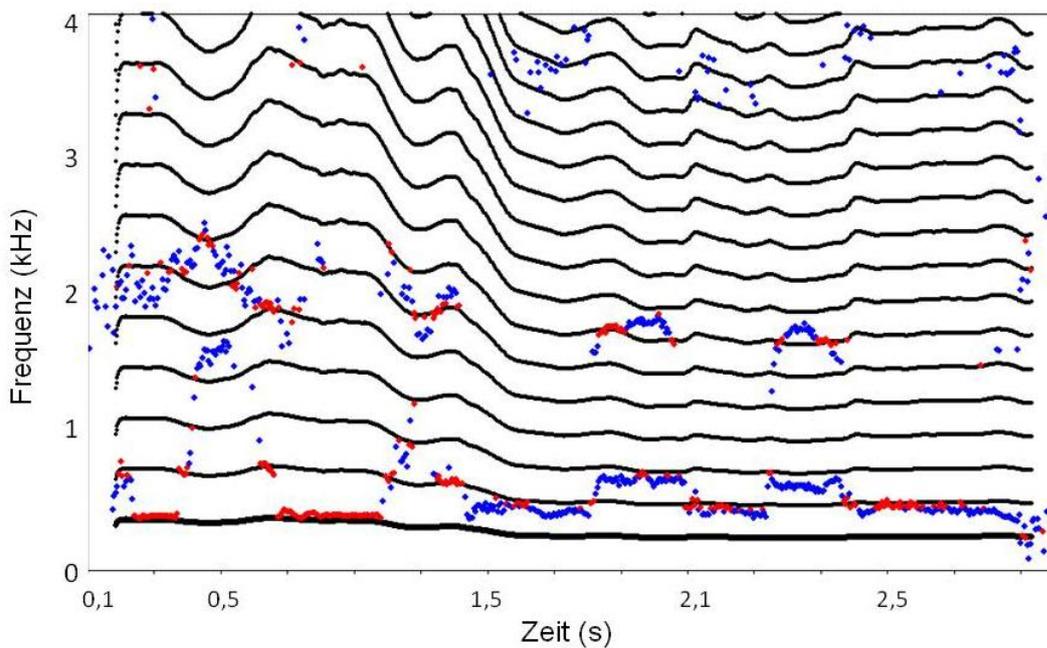


Abbildung 17: Tuningdiagramm eines kanonischen Babbellautes von Proband HI-GD (555. Lebensstag, kein Tuning im Bereich der vokalischen Silbenelemente)

Abbildung 18 von Proband GH zeigt bereits im Alter von 259 Tagen ein typisches Interaktionsmuster mit ausgeprägten Tuningbereichen im vokalischem Anteil der Silben. Dieser Proband war nur mit Hörhilfen versorgt und erreichte die kanonische Babbelphase im Altersbereich hörgesunder Kinder (siehe Entwicklungsprofil in Abbildung 4). Auch dieser Proband zeigt, wie Proband GD, hauptsächlich durch Melodieabbrüche rhythmisierte Babbellaute. Vergleicht man allerdings die Tuningdiagramme in Abbildung 18 und Abbildung 19 (a) / (b) mit den Tuningdiagrammen von Proband GD, erkennt man deutliche Unterschiede der artikulatorischen Leistung beider Probanden: Bei Proband GH ist eine deutliche R_1 -Interaktion mit den Harmonischen und der Melodie ersichtlich, während R_1 bei Proband GD starr verläuft. Abbildung 19 (b) zeigt eine Verlängerung der Tuningbereiche bei Proband GH im vokalischem Silbenbereich nach Neueinstellung der Hörhilfen am 268. Lebensstag (siehe Abbildung 4).

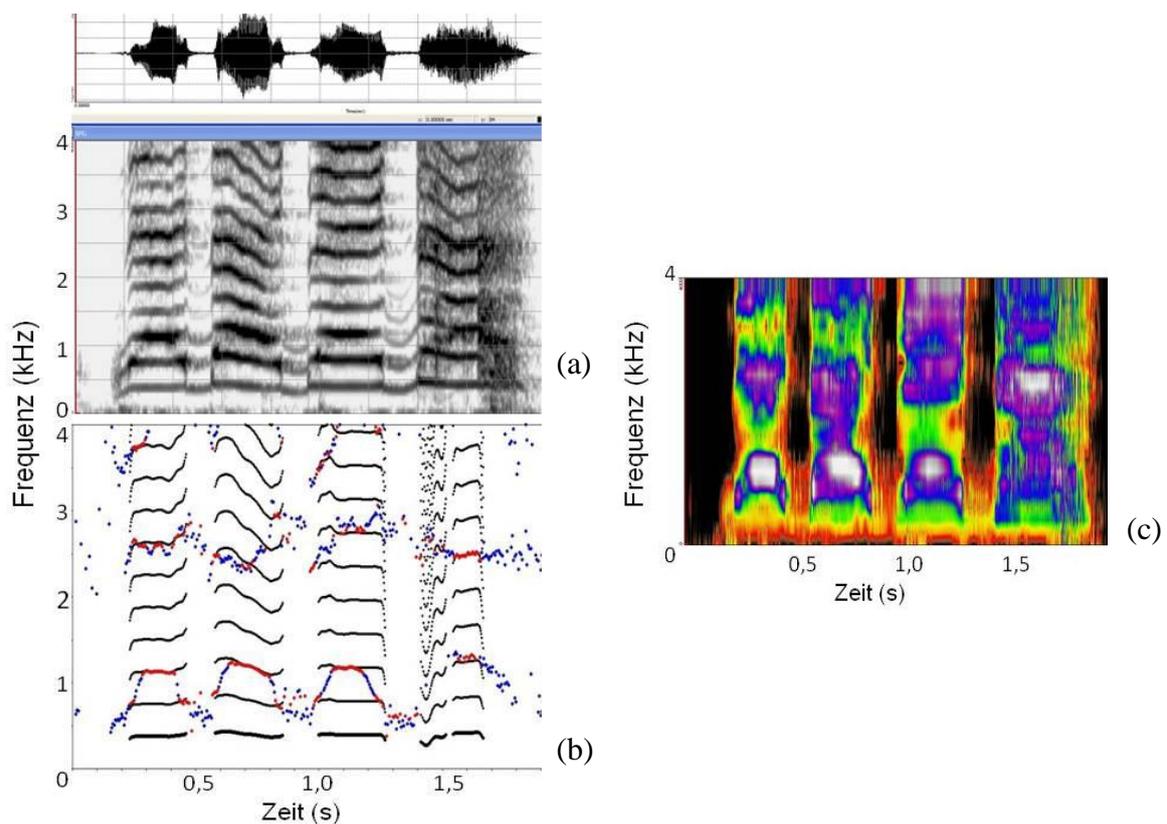


Abbildung 18: Typisches Signalbeispiel von Proband HI-GH (259. Lebensstag)

Schmal- (a) und Breitbandspektrogramm (c) sowie Tuningdiagramm (b) eines viersilbigen kanonischen Babbellautes

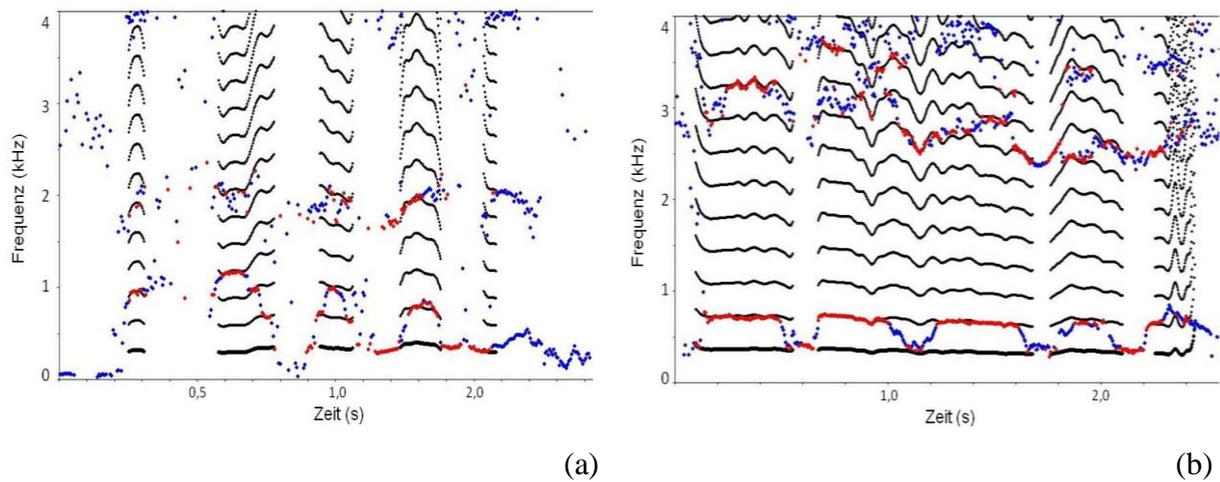


Abbildung 19: Tuningdiagramme für kanonische Babbellaute von Proband HI-GH

(a) Viersilbiger Laut am 259. Lebenstag

(b) Verlängerung der Tuningbereiche nach Neueinstellung der Hörhilfen in einem fünfsilbigen Babbellaut am 268. Lebenstag

3.2. Entwicklung einer geeigneten Messroutine zur Charakterisierung artikulatorischer Vorgänge in kanonischen Babbellauten anhand der PAI-Methode

Da zur Analyse und Bewertung vorsprachlicher Artikulationsvorgänge in der Literatur bisher kaum Daten oder Kenngrößen vorliegen, war es Ziel dieser Arbeit, in einer Pilotuntersuchung die PAI-Methode zur Beschreibung und Quantifizierung dieser Artikulationsvorgänge zu testen. Dies erfolgte primär anhand der von Kempf untersuchten Größen zur Charakterisierung von Artikulationsphänomenen in Weinlauten (Kempf, 2008), wie sie in Kapitel 2.5 aufgeführt sind. Dort wurden die Interaktionsmöglichkeiten von Phonation und Artikulation, wie sie auch bei Kempf verwendet wurden, anhand einfacher, präkanonischer Vokalisationen beschrieben. Wie bei der Analyse kanonischer Babbellaute in Kapitel 3.1 ersichtlich, musste aufgrund der dort gefundenen, im Vergleich zu präkanonischen Lauten prinzipiell stärkeren Interaktion zwischen Phonation und Artikulation, eine Modifikation der bisher verwendeten Messgrößen erfolgen: In Weinlauten und präkanonischen Lauten sind die einzelnen Tuning- und Nichttuning-Sequenzen länger und treten pro Vokalisation in geringerer Anzahl auf – der in der kanonischen Babbelphase neu erreichte, reifere Entwicklungsstand der Artikulation zeigt sich hingegen in einem zeitlich sehr schnellen Wechsel der Tuning- und Nichttuningsequenzen, basierend auf der Silbenstruktur der Vokalisationen, die es im präkanonischen Babbeln und beim Weinen in dieser Form nicht gibt. Abbildung 20 zeigt anhand der Gegenüberstellung eines kanonischen Babbellautes und eines präkanonischen Lautes nochmals die wesentlichen Unterschiede bei der Interaktion der ersten Resonanzfrequenz R_1 mit der Melodie und den Harmonischen:

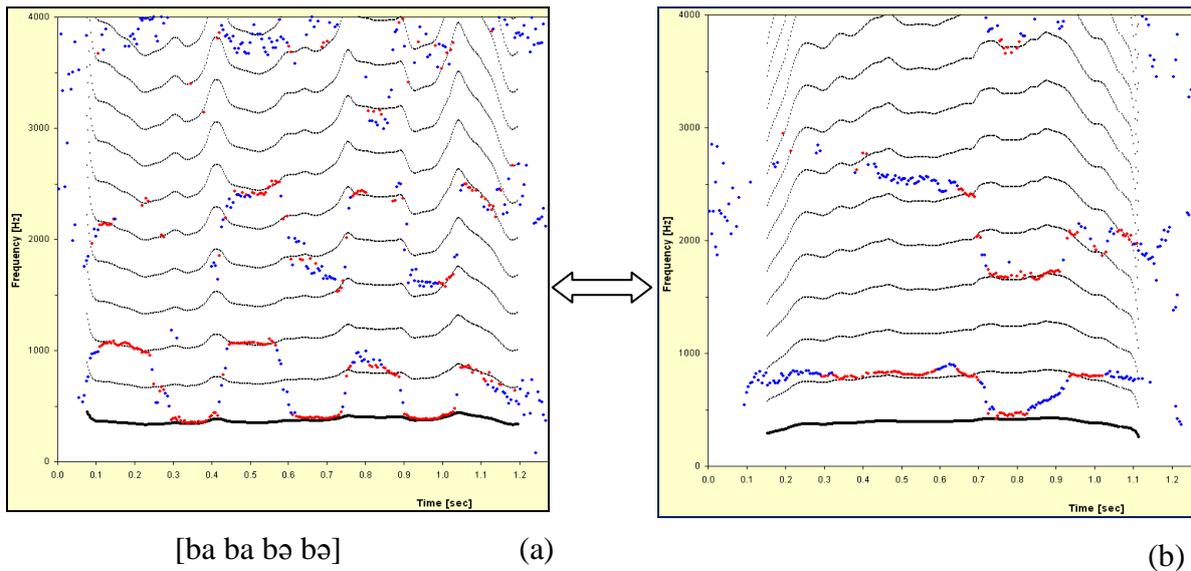


Abbildung 20: Tuningdiagramme kanonischer / präkanonischer Laut im Vergleich

(a) kanonischer Babbellaut von HI-GB, 450. Lebensstag

(b) präkanonischer Laut von HI-GH, 139. Lebensstag

In dem präkanonischen Laut in Abbildung 20 (b) ist die artikulatorische Aktivität nur wenig ausgeprägt: Hier folgt auf einen langen Einschwingbereich von R_1 (E) auf der zweiten Harmonischen ein Tuningbereich (T) auf H_2 , ein kurzer Übergang nach unten (Unu) mit Tuning im Bereich von F_0 / H_1 , ein Übergang nach oben (Uno) mit anschließendem kurzem Tuning (T) und zuletzt Freilauf (F). Im Gegensatz dazu lässt sich in dem kanonischen Babbellaut in Abbildung 20(a) eine intensive artikulatorische Aktivität mit komplexer Interaktion zwischen der ersten Resonanzfrequenz R_1 , der Melodie und den Harmonischen beobachten, die sich innerhalb der einzelnen Silben sehr detailliert nachvollziehen lässt: Die Interaktion beginnt mit einem Übergang von R_1 von der Grundfrequenz auf die 3. Harmonische, wo ein Tuningabschnitt folgt. Anschließend lässt sich ein Übergang nach unten zurück zur Grundfrequenz mit anschließendem Tuning auf der Grundfrequenz beobachten (also Uno-T-Unu-T). Dieses Muster wiederholt sich ein weiteres Mal (Uno-T-Unu-T), gefolgt von einem Übergang nach oben (Uno) von R_1 bis auf die zweite Harmonische H_2 , wo ein Abschnitt mit unsauberem Tuning sichtbar ist (R_1 näher an H_2 als an H_3 , jedoch außerhalb des Frequenzbandes von $\pm 9\%$ der Harmonischen, daher blaue Punkte). Darauf folgt wieder ein Übergang nach unten, Tuning im Bereich der Grundfrequenz (Uno-T-Unu-T), ein erneuter Übergang nach oben auf die zweite Harmonische und zuletzt, nach kurzem Tuning auf H_2 , ein Auslaufen der Resonanzfrequenz in Noise (blaue Punktwolke, Uno-T-N).

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass ein formales Vermessen kleinster Abschnitte von Tuning oder Nichttuning (Übergänge, Einschwingen, Noise), ohne dabei die übergeordnete Silbenstruktur mit in Betracht zu ziehen, bei der Analyse kanonischer Babbelsilben zu einem Verlust an Information über die Interaktionsphänomene von Phonation und Artikulation führt. Für die Analyse kanonischer Babbelsilben mit der PAI-Methode war also eine auf der Silbenstruktur basierende Messgrößenfestlegung unverzichtbar. Während Kempf (2008) bei der Anwendung der PAI-Methode die Zeitdauer aller Tuning- und Nichttuningbereiche innerhalb eines Lautes zusammengefasst hat, wurden sie hier streng nach Silbenstruktur bzw. vokalischem / konsonantischem Element ermittelt. Dies ist nicht als methodische Limitation bei Kempf zu bewerten, sondern allein der Tatsache zuzurechnen, dass Weinlaute und präkanonische Babbellaute noch keine ausgeprägten Artikulationsstrukturen aufweisen. Für die vorliegende Arbeit war es also notwendig, die bisher auf präkanonische Vokalisationen zugeschnittenen Messkriterien an die Untersuchung kanonischer Babbelsilben anzupassen.

Bei der Modifikation der PAI-Methode wurden die bisherigen Ansätze zur Charakterisierung von Artikulationsmustern in kanonischen Babbelsilben kombiniert: Nimmt man zu einem Tuningdiagramm, das durch die gleichzeitige graphische Darstellung von Grundfrequenz (Melodie), Harmonischen und Resonanzfrequenzen (Formanten) über die Zeit wichtige akustische Informationen über die Interaktion von Phonation und Artikulation bei der Lautproduktion liefert, zusätzlich die phonetische Information in Form der transkribierten Silbenstruktur eines Babbellautes hinzu und stellt sich diese überlagert vor, so präsentieren sich die einzelnen vokalischen und konsonantischen Silbenanteile im so entstandenen „Phonations-Artikulations-Interaktions-Diagramm“ (PAI-Diagramm) als komplexe Muster von intentionalem Tuning und Nichttuning der ersten Resonanzfrequenz mit den Harmonischen und der Grundfrequenz: Die vokalischen Anteile der Silben lassen sich im PAI-Diagramm als Tuning der ersten Resonanzfrequenz R_1 auf unterschiedlichen Harmonischen identifizieren, während die artikulatorische Aktivität – also das Bilden der konsonantischen Silbenanteile und der Wechsel zwischen konsonantischen und vokalischen Silbenanteilen – durch Resonanzfrequenzübergänge vor und nach dem jeweiligen Kernbereich des vokalischen Tunings sichtbar wird.

Auch die Rhythmisierung bzw. Segmentierung der Lautäußerungen wird im PAI-Diagramm sichtbar und vermessbar, entweder als „Tuning“ der Resonanzfrequenz R_1 auf F_0 oder aber als „Unterbrechungen“ der Grundfrequenz ohne Resonanzfrequenz. Letztere zeigen sich in Signalabschnitten, in denen aufgrund glottaler Schwingungspausen keine Melodie erzeugt

wird, sodass es zum Abbruch der Grundfrequenz kommt und keine Resonanzfrequenz berechnet werden kann. Beide Segmentierungselemente wurden bei der PAI-Messroutine unter der Bezeichnung „Pausenelement (P)“ zusammengefasst. Sie spiegeln die Zeitspanne wieder, in der die Artikulatoren zwischen der Bildung zweier verschiedener Silben neu positioniert werden. Dies kann mit oder ohne gleichzeitige Phonation erfolgen. Im Falle eines Abbruchs der Melodie wird keine Resonanzfrequenz berechnet. Im Falle einer gleichzeitig stattfindenden Phonation scheint das CDAP-Formantanalyseprogramm bei der Berechnung einer Resonanzfrequenz für diesen Signalbereich auf die Grundfrequenz zurückzuverweisen, sodass es sich hier nicht um echtes Tuning wie im Bereich der Vokalnuklei handelt, sondern um einen Platzhalter bei nicht vorhandener Resonanz des Vokaltraktes.

Das Beispiel eines Ausschnittes der in Abbildung 20(a) dargestellten viersilbigen Babelstruktur [ba ba bə bə] zeigt nun die graphische Entsprechung der jeweiligen Silbenanteile im Tuningdiagramm und die hier speziell entwickelte Messroutine bei der Anwendung der PAI-Methode für kanonische Babbellaute (Abbildung 21):

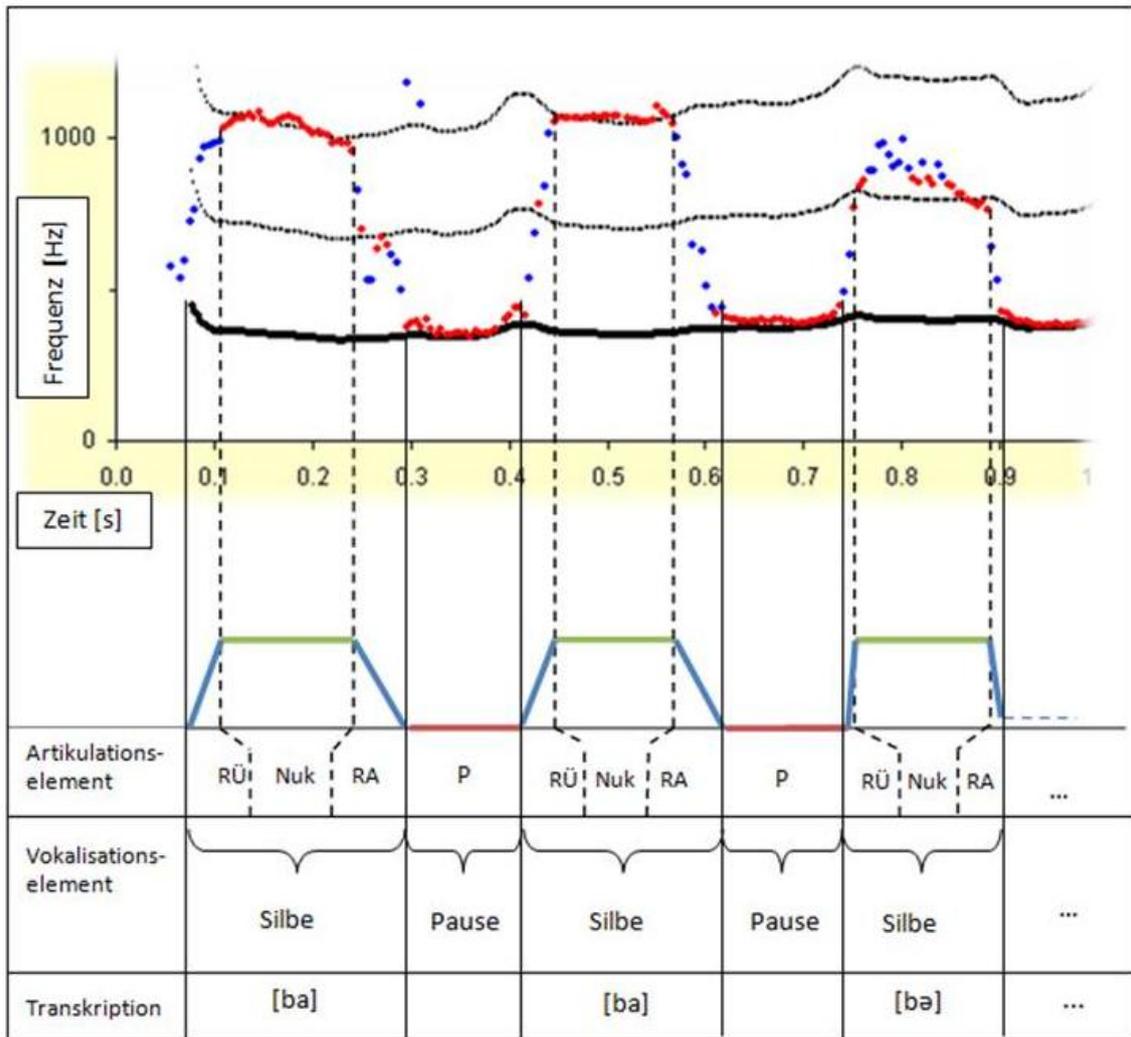


Abbildung 21: PAI-Diagramm mit Bezug auf die Silbenstruktur eines Babbellautes

Ausschnitt aus einer Vokalisation von Proband HI-GB, 450. Lebensjahr.

(Legende: RÜ = Resonanzübergangszeit, Nuk = Vokalnukleus, RA = Resonanzabgangszeit, P = Pausenelement)

Um anhand dieser Informationen die Struktur von Babbellautes vermessen und statistisch auswerten zu können, wurde jedes Signal nach Erstellen des Tuning-Diagramms mehrfach angehört, die Anzahl der Silben bestimmt, vokalische und konsonantische Anteile phonetisch bzw. orthographisch transkribiert und an entsprechender Stelle im PAI-Diagramm eingetragen.

3.3. Entwicklung spezieller Parameter zur Untersuchung kanonischer Babbellaute mithilfe der PAI-Methode

Bei der Analyse kanonischer Babbellaute mithilfe der PAI-Methode wurden Muster sichtbar, die sich in sehr ähnlicher Weise bei allen Probanden, sowohl den HI-Kindern als auch dem normalhörenden Referenzkind, finden ließen: Durch die graphische Darstellung des Formantverlaufs im PAI-Diagramm zeigen sich Auf- und Abwärtsbewegungen des Formanten vor und nach sogenannten Tuningbereichen, also Signalbereichen, in denen die Formanten sich im selben Frequenzbereich wie die Harmonischen der Melodie bewegen. Diese Formantübergänge und Tuningbereiche entstehen durch eine kontinuierliche Veränderung der Stellung der Artikulatoren im Vokaltrakt während des Artikulationsvorganges (Pickett, 1999) und sind dafür verantwortlich, dass die konsonantischen Silbenanteile sich durch die Formantfrequenz noch in Bereiche des Signals auswirken und dort auch noch akustisch wahrnehmbar sind, in denen sie zeitlich eigentlich nicht mehr repräsentiert werden (Reetz, 2003). Bei der Anwendung der PAI-Methode entspricht diesem „onglide“ beim Übergang von einem konsonantischen Element bis zur Artikulation des Vokalnukleus die Resonanzübergangszeit $R\ddot{U}$ (Interaktionsmuster „Übergang nach oben“). Für die Erwachsenensprache existieren für die einzelnen Artikulationsorte verschiedener Vokal- und Konsonantkombinationen spezifische Muster der Formantübergänge (Reetz, 2003, S 140f). Das phonetisch als Vokal wahrgenommene Element einer Silbe setzt sich dabei aus der Dauer der Öffnung des Vokaltraktes bis zur vollen Resonanz („onglide“) und dem nachfolgenden Nukleus des vokalischen Elements zusammen. Die Art der wahrgenommenen Vokale hängt dabei stark von der Frequenz des jeweiligen ersten Formanten ab. Dieser wiederum ist eine Funktion des Vokaltraktes, wird also durch dessen Form bedingt (Reetz, 2003). Da es sich aus phonetisch-linguistischer Sicht bei den untersuchten Lauten um noch unreife Vokalisationen handelt, sind phonetische Termini aus dem Bereich der Erwachsenensprache lediglich vergleichend anwendbar. Es war jedoch sinnvoll, sich partiell an diesen phonetischen Definitionen und Kriterien zu orientieren.

Die in Kapitel 3.2 beschriebene und speziell für Babbelsignale etablierte Lesart der Tuningdiagramme (Abbildung 21) war im Arbeitsschritt Messvorgang 2 Grundlage der Messroutine im CDP-Programm Formant/Melodie-Interaktion. Durch das Markieren der einzelnen Lautabschnitte mittels Cursor wird das geometrische Mittel der Grundfrequenz (Melodie) in diesem Lautabschnitt durch das CDAP-Programm erfasst; ebenso das geometrische Mittel der ersten Resonanzfrequenz R_1 , die Zeitdauer des markierten

Abschnitts in Millisekunden sowie die exakte Zeitdauer des gesamten Signals (Signalbereichslänge). Zusätzlich wurde der jeweilige Lautabschnitt nun bei der Vermessung manuell mit der entsprechenden Einteilung in Resonanzübergangszeit, Vokalnukleus, Resonanzabgangszeit oder Pausenelement, wie in Abbildung 21 beschrieben, näher klassifiziert, anstatt die Tuning- / Nichttuningelemente unabhängig von ihrer Funktion innerhalb der Babbelsilbe zu betrachten. Diese Einteilung diente dazu, nach der Vermessung der Signale manuell verschiedene Messgrößen zu bilden und die einzelnen Parameter weiter zu kategorisieren, um Teilabschnitte der Signale näher zu beschreiben.

Ergänzt werden muss im Ergebnis der vorliegenden Arbeit noch folgende Modifikation der Messmethode bezüglich der Bewertung von Tuning und Nichttuning: Die Übergänge nach oben oder unten als Ausdruck des Verschlusses oder Öffnens des Vokaltraktes können im kanonischen Babbeln über mehrere Harmonische erfolgen und kurze Tuningbereiche auf diesen Harmonischen beinhalten. Im Ergebnis der hier durchgeführten Methodentestung hat sich gezeigt, dass diese Bereiche nur dann dem Interaktionsmuster Tuning T zugeordnet werden sollten, wenn sie mindestens 35 Millisekunden betragen. Eine weitere Modifikation ergab sich aus der Tatsache, dass relativ häufig kurze Nichttuningbereiche innerhalb eines Interaktionsmusters „Tuning (T)“ auftraten. Diese wurden ebenfalls erst ab einer Dauer von 35ms separat vermessen, jedoch in der Auswertung dem vokalischen bzw. konsonantischen Element zugerechnet, wenn sie zwischen zwei Tuningbereichen lagen, die jeweils wiederum mindestens 35ms dauerten, um ein separates Vermessung von Ausreißern zu vermeiden. Für die Analyse der Laute wurden in dieser Arbeit folgende Messgrößen ausgewählt bzw. erstellt:

Tabelle 5: Messgrößen für die Analyse kanonischer Babbelsilben mit der PAI-Methode

Messgrößen	Definition
Frequenzanalyse	
F _{0_gM} [Hz]	geometrisches Mittel der Grundfrequenz (mittlere F ₀), jeweils gemittelt über ein Einzelsignal
R _{1_gM} [Hz]	geometrisches Mittel der Resonanzfrequenz (mittlere R ₁), jeweils gemittelt über ein Einzelsignal
Temporale Analyse	
Lautlänge [ms]	mittels CDAP-Programm gemessene Signalbereichslänge
Artikulationsgeschwindigkeit [Silben/s]	pro Sekunde artikulierte Silbenanzahl je Einzelsignal (Quotient aus Anzahl der Silben und Lautlänge)
RÜ [ms]	Dauer der Resonanzübergangszeit vor einem Vokalnukleus
RA [ms]	Dauer der Resonanzabgangszeit nach einem Vokalnukleus
Nuk [ms]	Vokalnukleus: Dauer des Kernbereichs des vokalischen Tuningelementes
AVT [ms]	aktive Vokalartikulationszeit (RÜ+Nukleus)
exakte Silbendauer [ms]	exakte Babbelsilbendauer (RÜ+Nukleus+RA)
mittlere Silbendauer [ms]	mittlere Babbelsilbendauer je Einzelsignal (Quotient aus Signalbereichslänge / Anzahl der Silben je Einzelsignal)
P [ms]	Dauer eines Pausenelements zwischen zwei Babbelsilben („Tuning“ auf F ₀ oder Abbruch der Melodie)

Aus dem gesamten Vokalisationsrepertoire (N = 20000) wurden, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, nach einem ausführlichen Datenselektionsprozess schließlich 133 geeignete Testsignale für die Evaluation der Eignung der PAI-Methode zu Untersuchung der artikulatorischen Aktivität in kanonischen Babbellauten sensorineural hörbeeinträchtigter Kinder ausgewählt. Für diese Testsignale wurden die in

Tabelle 5 genannten Messgrößen vermessen bzw. berechnet. Zusätzlich wurde zu Vergleichszwecken die mittlere Grundfrequenz und die mittlere erste Resonanzfrequenz auch für die während des Datenselektionsprozesses ausgeschlossenen Vokalisationen berechnet (siehe Tabelle 6 / 7). Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln detailliert berichtet.

3.4. Deskriptive Analyse akustischer Kenngrößen der untersuchten Vokalisationen

Für die deskriptive Analyse akustischer Kenngrößen wurden analog zu dem in Kapitel 2.4 beschriebenen und aus methodischen Gründen notwendigen Datenselektionsprozess verschiedene Vokalisationskategorien untersucht, um die Anwendbarkeit der PAI-Methode objektiv evaluieren zu können.

Die **erste Vokalisationskategorie** schließt alle Einzelsignale aus dem Untersuchungszeitraum der kanonischen Babbelphase mit ein, die die notwendigen Qualitätskriterien zur Analyse mit der PAI-Methode erfüllten (Signal frei von Hintergrundgeräuschen, intentionales Tuning, kein vegetativer Laut, kein Lachen oder dysphoner Laut, Frequenz der zu vermessenden Signaltbereiche $\leq 500\text{Hz}$, klare Struktur der Harmonischen, keine Subharmonischen). Diese Vokalisationskategorie schließt auch präkanonische Laute wie Weinen, Gurren und primitives Babbeln ein, die im Untersuchungszeitraum geäußert wurden (N = 732). Diese Vokalisationskategorie wurde nach den bei Kempf 2008 beschriebenen Kriterien zur Resonanzfrequenzanalyse vermessen (Messvorgang 1).

Dabei zeigten sich für einen Großteil der Signale nur schwierig zu identifizierende Resonanzfrequenzverläufe, sodass in die **zweite Vokalisationskategorie** nach Begutachtung der erstellten Tuningdiagramme nur noch solche Laute eingeschlossen wurden, die einen klar vermessbaren Verlauf der ersten Resonanzfrequenz R_1 aufwiesen (N = 192 Signale). In dieser Vokalisationskategorie befinden sich ebenfalls noch präkanonische Laute, die während des Untersuchungszeitraums geäußert wurden.

Die **dritte Vokalisationskategorie** beinhaltet ausschließlich die kanonischen Babbellaute mit klar erkennbarem Resonanzfrequenzverlauf aus dem Gesamtkorpus der Vokalisationen aller Probanden aus der kanonischen Babbelphase (N=133 Signale).

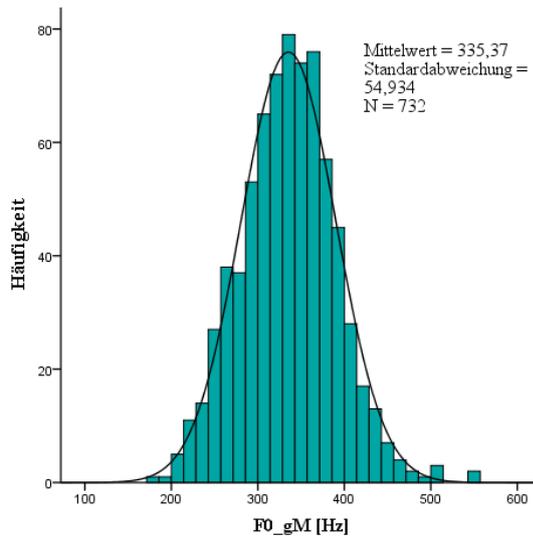
3.4.1. Analyse der mittleren Grundfrequenz F_0 _gM der Vokalisationen

In Tabelle 6 ist die deskriptive Statistik für die mittlere Grundfrequenz (geometrisches Mittel, jeweils gemittelt über die Einzelsignale) für die jeweilige Vokalisationskategorie dargestellt.

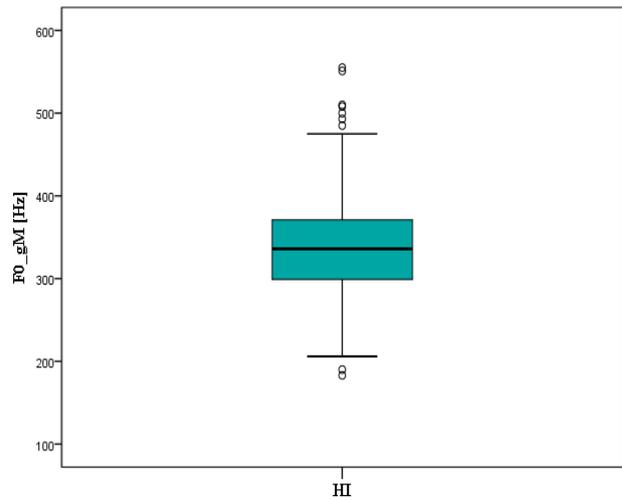
In Abbildung 22-24 sind die Verteilungseigenschaften der mittleren Grundfrequenz für die einzelnen Vokalisationskategorien in Form von Histogrammen und Boxplotdiagrammen graphisch dargestellt.

Tabelle 6: Deskriptive Statistik für die mittlere Grundfrequenz F_0 _gM

Proband	N	F_0 _Min [Hz]	F_0 _Max [Hz]	F_0 _aM [Hz]	F_0 _Med [Hz]	F_0 _std [Hz]
N=732 (Kategorie 1)						
GA	90	216	510	356	352	53
GB	103	183	555	342	339	59
GD	146	206	500	297	286	57
GH	393	190	551	343	346	47
HI gesamt	732	183	555	335	336	55
N=192 (Kategorie 2)						
GA	44	258	510	363	360	49
GB	53	239	466	344	341	44
GD	23	213	366	270	262	42
GH	72	272	551	351	346	48
HI gesamt	192	213	551	342	341	54
N=133 (Kategorie 3 / nur kanonische Babbellaute)						
GA	24	258	510	363	360	52
GB	45	239	466	349	344	42
GD	6	223	366	271	257	54
GH	58	273	551	354	352	46
HI gesamt	133	223	551	350	349	49



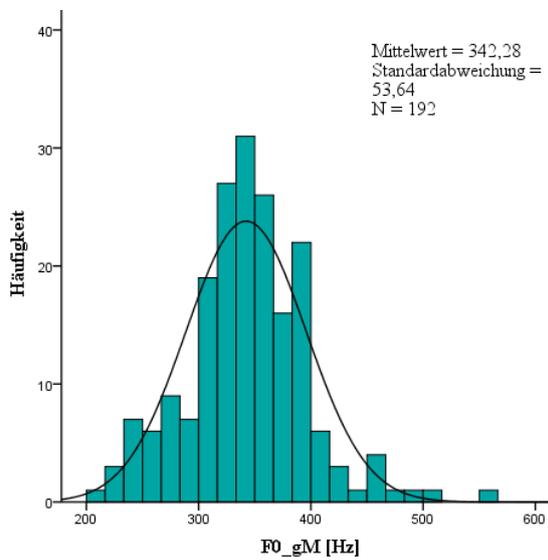
(a)



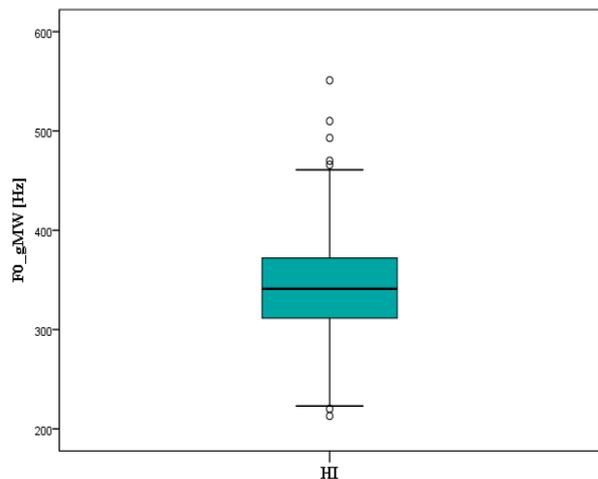
(b)

Abbildung 22: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für F_0_gM , Kategorie 1

(Verteilungseigenschaften für F_0_gM aller Vokalisationen aus der kanonischen Babbelphase)



(a)



(b)

Abbildung 23: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für F_0_gM , Kategorie 2

(Verteilungseigenschaften für F_0_gM der Vokalisationen aus der kanonischen Babbelphase mit vermessbarem Resonanzfrequenzverlauf)

In Abbildung 25 ist die Verteilung der mittleren Grundfrequenz der kanonischen Babbellaute ($N = 133$) für die einzelnen Probanden als Boxplotdiagramm dargestellt. Zusätzlich sind, wie auch im Boxplotdiagramm in Abbildung 24, als horizontale

Orientierungslinien die in einer Arbeit am ZVES ermittelten Werte für die 25. Perzentile, die 75. Perzentile und den Median für die mittlere Grundfrequenz kanonischer Babbellaute hörgesunder Kinder im Alter von 7-13 Monaten eingezeichnet (P25 = 333Hz, Median = 379Hz, P75 = 436Hz, Pachtner 2017).

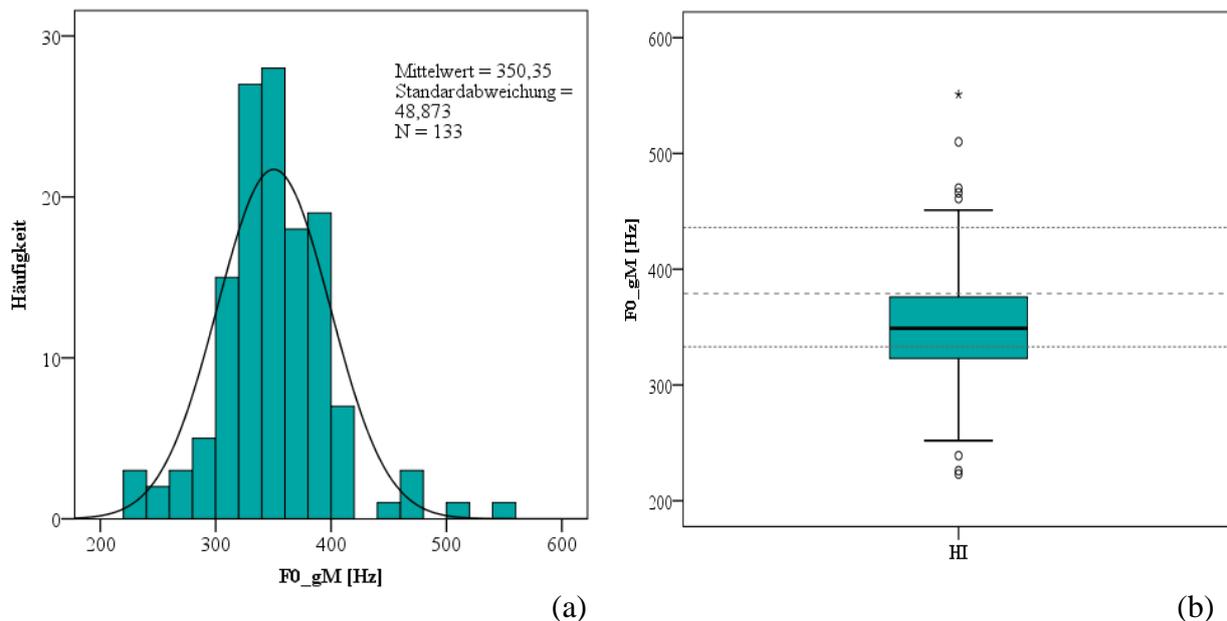


Abbildung 24: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für F_{0_gM} , Kategorie 3

(Verteilungseigenschaften für F_{0_gM} , ausschließlich kanonische Babbellaute aus dem Untersuchungszeitraum. Zur Orientierung sind im Boxplotdiagramm P25, P75 und Median für hörgesunde Säuglinge von Pachtner (2017) als horizontale Linien eingezeichnet.)

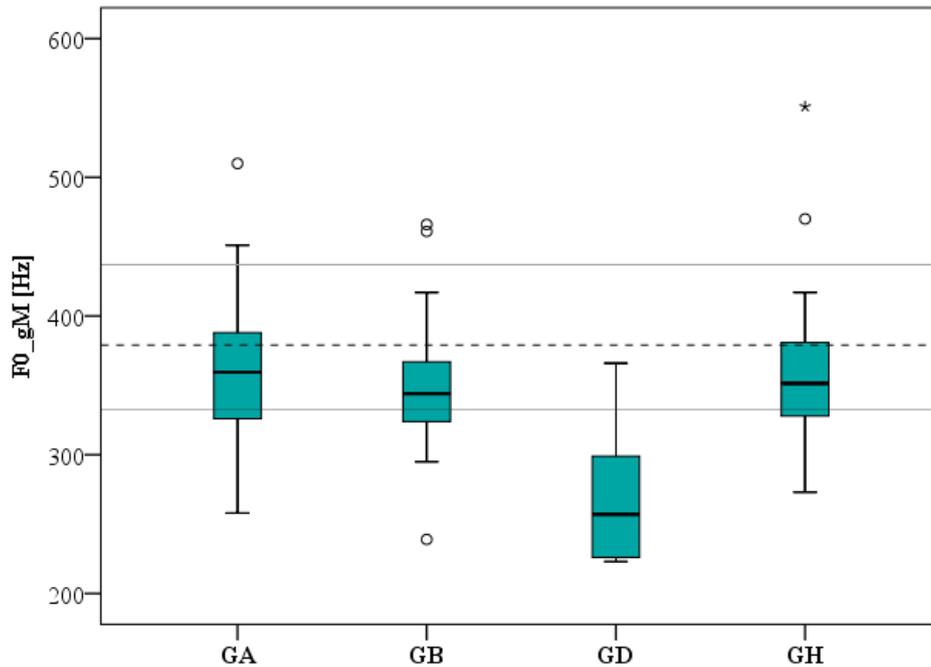


Abbildung 25: Verteilungseigenschaften für F_{0_gM}, Kategorie 3, Einzelkindvergleich

Vokalisationskategorie 3 / nur kanonische Babbellaute, Orientierungslinien im Boxplotdiagramm: P25, P75 (–) und Median (- - -) für hörgesunde Säuglinge (Pachtner, 2017)

Es zeigt sich eine deutliche Abweichung der Werte für die mittlere Grundfrequenz von Proband GD von den Werten der anderen HI-Kinder, welche im Bereich der für Babbellaute von hörgesunden Kindern ermittelten mittleren Grundfrequenzwerte liegen.

Bei den Signalen mit einer mittleren Grundfrequenzwerte >500Hz, die hier noch im Datensatz vorhanden sind, gingen in die Auswertung der Resonanzfrequenzverläufe nur jene Signalbereiche ein, die mit der PAI-Methode eindeutig vermessbar waren. Hier handelt es sich um solche Signale, bei denen nur geringe Anteile des Signals durch Störgeräusche nicht analysierbar waren.

3.4.2. Analyse der mittleren Resonanzfrequenz R_1 _gM der Vokalisationen

Tabelle 7 zeigt die deskriptive Statistik für die mittlere Resonanzfrequenz (geometrisches Mittel) der ersten Resonanzfrequenz aller Vokalisationen aus den analysierten Vokalisationskategorien des Untersuchungszeitraums.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik für die mittlere erste Resonanzfrequenz R_1 _gM

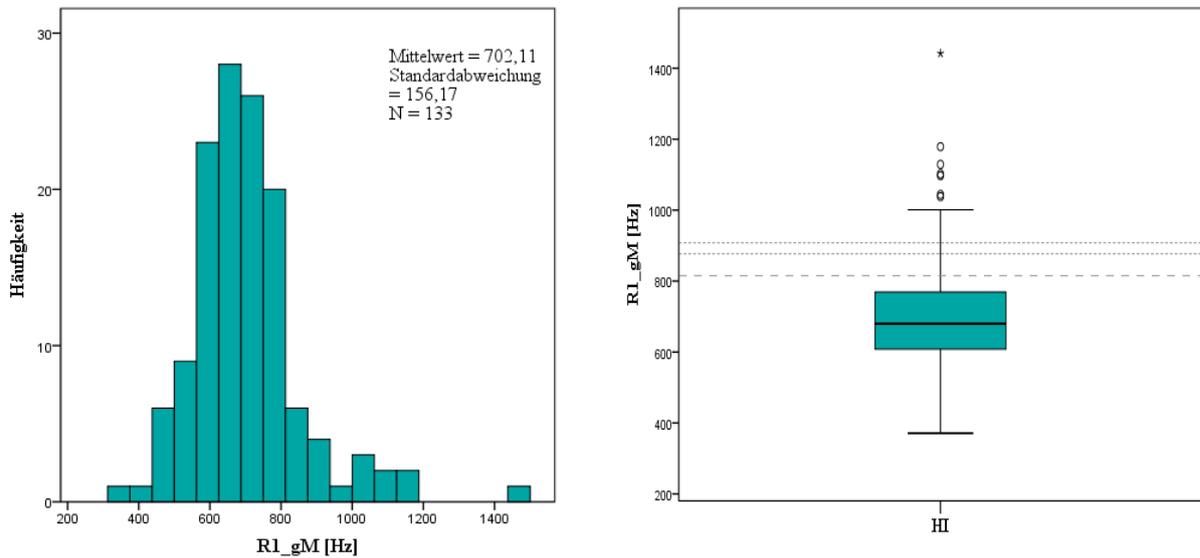
Proband	N	R_1 _Min [Hz]	R_1 _Max [Hz]	R_1 _aM [Hz]	R_1 _Med [Hz]	R_1 _std [Hz]
N=726 (Kategorie 1)						
GA	90	447	1442	765	721	193
GB	103	259	1646	663	633	186
GD	146	315	1456	583	563	182
GH	387*	316	1803	688	633	238
HI gesamt	726*	259	1803	667	627	231
N=192 (Kategorie 2)						
GA	44	447	1442	777	734	172
GB	53	478	1129	669	654	111
GD	23	371	906	615	593	132
GH	72	386	1179	696	678	160
HI gesamt	192	371	1442	698	677	155
N=133 (Kategorie 3/ nur kanonische Babbellaute)						
GA	25	447	1442	774	734	190
GB	45	478	1129	681	665	113
GD	6	371	875	592	577	166
GH	57	386	1179	700	680	161
HI gesamt	133	371	1442	702	680	156

*6 missing values: Signale mit nicht vermessbarem Resonanzfrequenzverlauf

In der ersten Vokalisationskategorie ließ sich R_1 für fast alle Signal soweit abgrenzen, dass eine Vermessung zur Bestimmung von R_1 _gM möglich war. Bei lediglich 6 Signalen war R_1 aufgrund zu schlechter Signalqualität (R_1 = Noise) nicht vermessbar.

Abbildung 26 zeigt die Verteilungseigenschaften der mittleren ersten Resonanzfrequenz R_1 _gM für Vokalisationskategorie 3 (nur kanonische Babbellaute). Als Vergleichswerte sind jeweils die in der Literatur für hörgesunde Säuglinge / Kleinkinder in vergleichbarer Entwicklungsphase publizierten Mittelwerte für die Frequenz von R_1 eingezeichnet, die ebenfalls mittels LPC-Logarithmus errechnet wurden ((S. Rvachew, Slawinski, & Williams, 1996): Alter 12 Monate / R_1 -Mittelwerte 877-907Hz; (Robb, Chen, & Gilbert, 1997): Alter 15 Monate / R_1 -Mittelwert 815Hz).

Die Referenzwerte aus Datensätzen hörgesunder Kinder zeigen, dass die hier berechnete Mittelwertverteilung für $R1_gM$ bei hörgeminderten Kindern deutlich unterhalb dieser Werte liegt.



(a)

(b)

Abbildung 26: Histogramm (a) / Boxplotdiagramm (b) für $R1_gM$, Kategorie 3

Verteilungseigenschaften für $R1_gM$, ausschließlich kanonische Babbellaute aus dem Untersuchungszeitraum. Als Orientierungslinien sind die in der Literatur angegebenen Referenzwert bei Kindern ähnlichen Alters von Rvachew et al. 1996 (···/···) und Robb et al. 1997 (- - -) eingezeichnet.

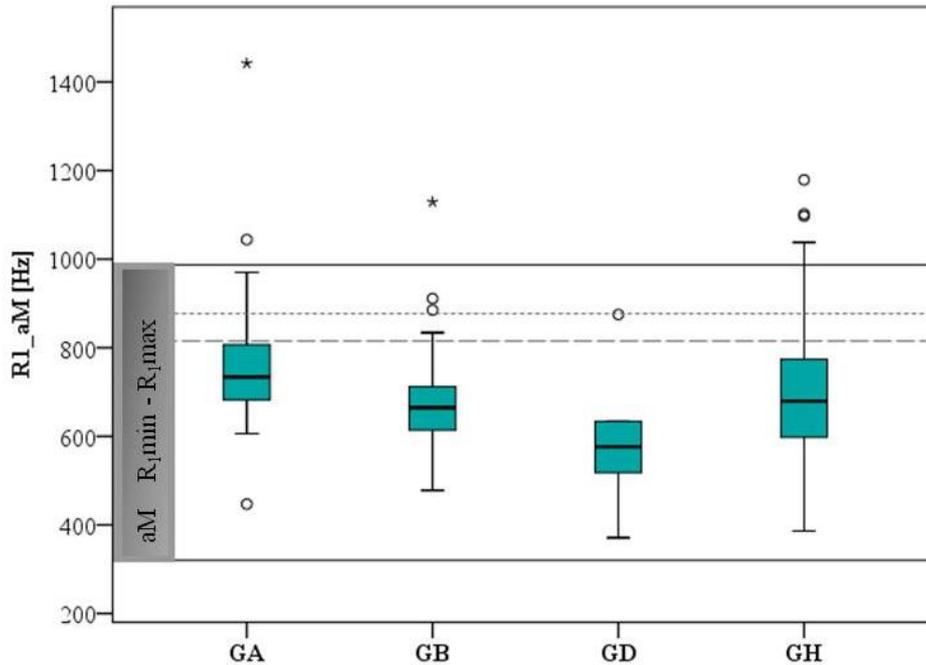


Abbildung 27: Verteilungseigenschaften für R1_gM, Kategorie 3, Einzelkindvergleich

Zur Orientierung sind im Boxplotdiagramm die die von Robb (- - -) und Rvachew (...) ermittelten Werte eingezeichnet. Als Range ist der über alle Babbellaute der HI-Kinder gemittelte Minimal- und Maximalwert als grauer Querbalken eingezeichnet.

In Abbildung 27 ist die Verteilung der mittleren ersten Resonanzfrequenz im Einzelkindvergleich aufgeschlüsselt. Hier sind zusätzlich die über alle Signale gemittelten Minimal- und Maximalwerte als Bereich für die Bandbreite von R_1 eingezeichnet, da diese im PAI-Diagramm eine Entsprechung bei der Charakterisierung der verschiedenen Babbelsilbenanteile finden (Minima im Bereich der Pausenelemente, Maxima im Bereich der Vokalnuklei).

3.5. Deskriptive Analyse temporaler Kenngrößen zur Charakterisierung der artikulatorischen Aktivität in kanonischen Babbelsilben

Für die temporale Analyse wurden, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, PAI-Diagramme erstellt, um eine „erfolgreiche“ Artikulation anhand der Interaktion von Melodie und Resonanzfrequenz zu identifizieren und mithilfe der in Abbildung 21 beschriebenen Systematik zu vermessen. Es wurden die in Kapitel 3.3 eingeführten zeitlichen Parameter zur Beschreibung der einzelnen Silbenelemente systematisch auf die kanonischen Testbabbellaute angewandt, um die Eignung der Methode zur Analyse artikulatorischer Vorgänge bei sensorineural hörbeeinträchtigten Säuglingen zu untersuchen.

Die Tabellen 8 – 11 enthalten die Messergebnisse für die einzelnen Probanden. Die Auswertung der speziell für die Charakterisierung der artikulatorischen Aktivität in Babbelsilben erarbeiteten Messgrößen folgt in den Kapiteln 3.5.1 – 3.5.6.

Tabelle 8: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GA

(zusammengefasst für die einzelnen Aufnahme-Tagen sowie gemittelt über den Untersuchungszeitraum in Abhängigkeit von dem konsonantischen Element (C) am Beginn der Silbe)

Alter [d]	C vor RÜ	N (RÜ)	RÜ_aM [ms]	RÜ_Med [ms]	RÜ_std [ms]	Nuk_aM [ms]	Nuk_Med [ms]	Nuk_std [ms]	N (RA)	RA_aM [ms]	RA_Med [ms]	RA_std [ms]	N (P)	P_aM [ms]	P_Med [ms]	P_std [ms]
352	D	7	49,71	45,00	32,43	191,57	165,00	84,88	6	40,00	38,00	16,44	6	97,00	91,00	60,53
358	D	2	89,00	89,00	30,00	604,50	604,50	12,02	2	149,50	149,50	34,64	2	230,50	230,50	105,50
362	L	3	105,00	109,00	23,85	208,67	214,00	23,46	3	77,33	97,00	41,18	3	77,33	97,00	33,63
372	D	1	85,00	85,00	0	637,00	637,00	0	1	140	140	-	1	140,00	140,00	0
376	J	2	39,00	39,00	11,00	200,00	200,00	24	2	72	72	24,04	2	72,00	72,00	17,00
	D	1	53,00	53,00	0	131,00	131,00	0	1	49	49	-	1	49,00	49,00	0
393	D	6	23,83	26,00	12,14	179,50	126,00	135,70	6	84	73,50	30,57	6	199,33	211,50	36,59
	J	1	54,00	54,00	0	508,00	508,00	0	0	-	-	-	0	-	-	-
401	D	8	44,63	35,00	23,09	486,50	493,50	133,66	7	65,28	63,00	23,87	7	151,57	186,00	68,29
408	B	4	82,25	72,50	43,99	225,00	201,00	110,54	3	80,33	92,00	36,90	4	216,25	205,50	155,66
	W	8	53,75	55,00	36,54	292,63	300,50	99,92	8	65,00	51,50	37,35	8	65,00	51,50	34,94
	J	5	20,00	21,00	4,19	237,20	222,00	53,81	5	81,00	77,00	60,16	5	81,00	77,00	53,81
	BW	1	26,00	26,00	0	143,00	143,00	0	1	94,00	94,00	-	1	94,00	94,00	0
414	J	6	39,80	21,00	25,69	207,17	199,50	44,19	6	95,83	96,00	46,97	6	95,83	96,00	43,89
	D	3	82,00	99,00	30,63	302,00	330,00	79,50	3	132,33	143,00	40,07	3	243,33	234,00	67,28
422	B	2	43,50	43,50	3,50	310,50	310,50	79,50	2	77,00	77,00	21,21	2	123,00	123,00	61,00
	D	3	50,00	42,00	13,49	275,00	282,00	17,45	3	114,00	114,00	37,00	3	155,67	120,00	54,74
	D	31	50,32	42,00	21,65	323,16	285,00	185,96	29	80,23	66,50	43,59	29	161,59	162,00	79,78
	L	3	105,00	109,00	23,84	208,67	214,00	19,15	3	77,33	97,00	41,18	3	77,33	97,00	33,63
	J	14	36,14	23,50	22,11	238,36	214,50	88,17	13	86,46	84,00	47,59	13	86,46	84,00	45,73
	B	6	69,33	45,00	40,34	253,50	247,50	108,99	5	79,00	92,00	28,23	6	185,17	138,00	139,94
	W	8	53,75	55,00	36,54	292,63	300,50	99,92	8	65,00	51,50	37,35	8	65,00	51,50	34,94
	BW	1	26,00	26,00	0	143,00	143,00	0	1	94,00	94,00	-	1	94,00	94,00	0

Legende: C vor RÜ = konsonantisches Element vor jeweiligem Resonanzübergang, N = Anzahl, RÜ = Resonanzübergangszeit, Nuk = Dauer des Vokalmukleus, RA = Resonanzabgangszeit, d = Tage, Σ = gesamter Untersuchungszeitraum

Tabelle 9: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GB

(zusammengefasst für die einzelnen Aufnahmetage sowie gemittelt über den Untersuchungszeitraum in Abhängigkeit von dem konsonantischen Element (C) am Beginn der Silbe)

Alter [d]	C vor RÜ	N (RÜ)	RÜ_aM [ms]	RÜ_Med [ms]	RÜ_std [ms]	Nuk_aM [ms]	Nuk_Med [ms]	Nuk_std [ms]	N (RA)	RA_aM [ms]	RA_Med [ms]	RA_std [ms]	N (P)	P_aM [ms]	P_Med [ms]	P_std [ms]
345	J	12	48,83	35,5	40,77	197,00	196,50	57,79	10	61,54	43,00	40,49	10	139,70	148,50	30,17
	N	1	30,00	30,00	-	141,00	141	-	1	100,00	100,00	-	1	167,00	167,00	-
346	D	5	74,20	94,00	43,29	198	193	23,21	5	78,80	85,00	14,18	5	149,00	152,00	35,10
	J	12	58,25	63,00	22,42	215,92	194,5	72,22	10	61,70	69,50	27,94	10	48,31	143,00	49,19
372	L	5	82,00	68,00	45,33	163	137	63,95	5	123,80	120,00	30,27	5	185,80	196,00	48,31
	M	4	29,25	12,00	32,30	170,5	165,5	44,01	4	48,50	28,50	49,41	4	113,00	118,00	64,84
435	B	10	36,90	33,5	20,73	142,7	134,5	42,28	10	87,60	87,00	20,71	10	180,70	179,50	96,40
	D	3	26,67	29	12,76	218,67	245	43,02	2	83,00	83,00	63,63	2	169,00	169,00	32,53
439	W	3	52,34	43	18,37	114	107	27,80	2	117,00	117,00	33,94	2	167,00	167,00	36,77
	J	1	10,00	10,00	-	42	42	-	1	50,00	50,00	-	1	198,00	198,00	-
450	D	11	41,36	49	18,77	242,09	171	154,41	11	62,45	60,00	22,88	11	156,09	165,00	77,18
	B	22	40,73	42	19,72	153,32	149,5	56,04	22	47,2	45,00	22,83	22	177,59	164,50	70,91
456	W	14	46,50	48,5	18,20	158,43	141,5	44,99	14	48,71	43,00	27,55	14	130,29	127,50	69,46
	BW	3	57,33	53	7,59	171,34	142	56,22	2	103,00	103,00	49,49	2	152,00	152,00	19,80
450	M	2	60,00	60,00	5,00	212	212	37	2	65,00	65,00	7,07	2	223,50	223,50	96,87
	B	3	27,67	28	5,31	163,67	164	14,29	3	42,66	52,00	17,04	3	177,00	178,00	4,58
456	W	2	14,5	14,5	0,5	116	116	37	2	47,00	47,00	52,32	2	112,00	112,00	39,60
	W	3	55,00	54,00	20,02	162	165	20,12	3	28,00	27,00	7,54	3	121,67	140,00	40,72
Σ	B	11	48,81	38,00	21,53	136,63	143	33,21	9	54,33	50,00	24,92	9	127,22	134,00	44,16
	J	3	70,34	53,00	45,76	213,33	199	94,66	2	103,50	103,50	58,68	2	156,50	156,50	16,26
Σ	D	2	10,00	10,00	0	83	83	36	2	37,50	37,50	3,53	2	188,00	188,00	28,28
	M	2	53,50	53,50	20,50	117,5	117,5	20,5	2	67,00	67,00	22,62	2	200,00	200,00	2,83
Σ	J	28	53,79	46,00	35,62	203,25	196,50	75,67	23	64,62	56,00	36,49	23	144,26	150,00	39,16
	N	1	30,00	30,00	-	141,00	141,00	-	1	100,00	100,00	-	1	167,00	167,00	-
Σ	D	21	44,10	41,00	32,06	213,10	175,00	122,95	20	66,10	60,00	26,42	20	158,80	164,50	60,19
	L	5	82,00	68,00	45,33	163,00	137,00	63,95	5	123,80	120,00	30,27	5	185,80	196,00	48,31
Σ	M	8	43,00	44,00	28,76	167,63	165,50	50,40	8	57,25	55,50	34,85	8	162,38	171,00	77,52
	B	46	40,50	37,50	20,38	147,70	145,00	47,27	44	58,02	53,50	27,60	44	167,95	163,50	72,13
Σ	W	22	45,55	45,50	20,45	149,00	141,50	43,81	21	52,90	43,00	35,52	21	130,81	134,00	60,22
	BW	3	57,34	53,00	7,59	171,34	142,00	56,22	2	103,00	103,00	49,49	2	152,00	152,00	19,80

Legende: C vor RÜ = konsonantisches Element vor jeweiligem Resonanzübergang, N = Anzahl, RÜ = Resonanzübergangszeit, Nuk = Dauer des Vokalnukleus, RA = Resonanzabgangszeit, d = Tage, Σ = gesamter Untersuchungszeitraum

Tabelle 10: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GD

(zusammengefasst für die einzelnen Aufnahme-tage sowie gemittelt über den Untersuchungszeitraum in Abhängigkeit von dem konsonantischen Element (C) am Beginn der Silbe)

Alter [d]	C vor RÜ	N (RÜ)	RÜ_aM [ms]	RÜ_Med [ms]	RÜ_std [ms]	Nuk_aM [ms]	Nuk_Med [ms]	Nuk_std [ms]	N (RA)	RA_aM [ms]	RA_Med [ms]	RA_std [ms]	N (P)	P_aM [ms]	P_Med [ms]	P_std [ms]
536	W	1	108,00	108,00	0	206,00	206,00	0	1	111,00	111,00	-	1	141,00	141,00	0,68
544	W	2	31,00	31,00	12,73	197,50	197,50	108,19	2	42,50	42,50	31,81	2	61,50	61,50	0,46
558	L	4	74,25	70,00	34,41	275,00	244,00	115,22	3	59,66	70,00	31,78	3	59,67	70,00	0,28
	W	2	36,50	36,50	4,95	118,00	118,00	80,61	0	-	-	-	0	-	-	-
563	M	3	29,67	30,00	9,50	130,33	135,00	12,66	3	28,66	29,00	8,50	3	452,67	492,00	3,53
Σ	L	4	74,25	70,00	34,41	275,00	244,00	115,22	3	59,66	70,00	31,78	3	141,00	70,00	0,28
	M	3	29,67	30,00	9,50	130,33	135,00	12,66	3	28,66	29,00	8,50	3	61,50	492,00	3,53
	W	5	48,60	40,00	34,01	167,40	175,00	81,22	3	65,33	65,00	45,50	3	59,67	103,00	0,54

Legende: C vor RÜ = konsonantisches Element vor jeweiligem Resonanzübergang, N = Anzahl, RÜ = Resonanzübergangszeit, Nuk = Dauer des Vokalnukleus, RA = Resonanzabgangszeit, d = Tage, Σ = gesamter Untersuchungszeitraum

Tabelle 11a: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GH

(zusammengefasst für die einzelnen Aufnahmetagen in Abhängigkeit von dem konsonantischen Element (C) am Beginn der Silbe)

Alter [d]	C vor RÜ	N (RÜ)	RÜ_aM [ms]	RÜ_Med [ms]	RÜ_std [ms]	Nuk_aM [ms]	Nuk_Med [ms]	Nuk_std [ms]	N (RA)	RA_aM [ms]	RA_Med [ms]	RA_std [ms]	N (P)	P_aM [ms]	P_Med [ms]	P_std [ms]
210	W	4	85,00	70,00	52,02	205,50	205,00	36,75	4	85,00	85,00	35,17	4	206,75	201,50	19,92
217	B	5	60,40	63,00	14,66	141,80	147,00	20,07	5	56,2	54,00	17,51	5	238,20	254,00	39,86
230	M	1	50,00	50,00	-	138,00	138,00	-	1	25,00	25,00	-	1	25,00	25,00	0,00
237	L	12	50,42	43,50	31,68	268,17	261,00	92,47	11	74,90	68,00	38,82	11	181,00	175,00	80,79
	D	5	84,60	86,00	59,12	384,40	367,00	78,72	3	100,33	106,00	13,42	3	404,67	139,00	485,48
	L	1	72,00	72,00	-	276,00	276,00	-	0	-	-	-	0	-	-	-
259	D	10	55,00	52,00	21,62	206,70	212,50	46,82	9	53,88	41,00	41,93	9	206,33	189,00	78,02
	L	1	57,00	57,00	-	421,00	421,00	-	1	148,00	148,00	-	1	480,00	480,00	0,00
263	B	9	32,78	39,00	14,13	122,00	118,00	25,77	9	38,22	30,00	31,47	9	137,89	166,00	104,76
268	D	9	36,33	20,00	35,04	229,78	196,00	116,11	7	59,00	65,00	26,70	7	142,57	155,00	65,09
	ND	3	127,67	144,00	42,90	233,00	219,00	37,04	0	-	-	-	2	171,50	171,50	40,31
272	D	1	42,00	42,00	-	208,00	208,00	-	2	96,50	96,00	10,60	0	-	-	-
	J	2	72,00	72,00	11,31	307,00	307,00	31,11	0	-	-	-	2	268,00	268,00	67,88
	L	3	39,33	37,00	18,61	260,00	249,00	82,05	3	96,33	62,00	73,75	3	221,00	181,00	125,86
283	M	4	56,00	60,00	29,36	255,00	249,00	44,73	4	50,00	48,00	15,07	4	140,25	88,00	131,16
	N	2	91,00	91,00	16,97	235,50	235,50	10,61	2	68,50	68,00	38,89	2	147,00	147,00	62,23
285	D	3	32,33	26,00	18,34	245,67	249,00	125,03	1	57,00	57,00	-	1	234,00	234,00	0,00
	L	5	38,80	22,00	43,76	265,60	192,00	153,67	4	37,50	38,00	7,32	4	142,75	121,50	45,64
	N	3	35,00	21,00	31,43	202,00	204,00	48,03	3	76,33	75,00	12,05	3	648,67	532,00	491,50
294	D	2	43,50	43,50	4,95	138,50	138,50	60,10	2	47,50	47,00	2,12	2	232,50	232,50	91,22
300	D	3	44,00	45,00	16,52	773,00	433,00	692,70	3	96,00	93,00	59,55	3	176,00	184,00	134,16
	J	3	58,00	46,00	32,70	290,33	285,00	11,93	3	61,66	63,00	3,21	3	154,33	179,00	86,67
	L	18	55,83	46,50	34,55	342,56	326,50	93,44	15	77,90	60,00	45,49	16	215,25	197,50	52,99
306	D	13	32,00	21,00	21,32	148,92	148,00	42,27	12	58,75	43,00	44,72	12	179,83	199,00	85,94
306	M	3	68,67	51,00	67,26	259,67	264,00	45,65	3	79,00	94,00	97,00	3	202,67	181,00	96,34
317	N	1	53,00	53,00	-	196,00	196,00	-	1	18,00	18,00	-	1	1038,00	1038,00	0,00

Tabelle 11b: Messergebnisse für temporale Parameter der PAI-Analyse für Proband HI-GH
(gemittelt über den Untersuchungszeitraum in Abhängigkeit von dem konsonantischen Element (C) am Beginn der Silbe)

Alter [d]	C vor RÜ	N (RÜ)	RÜ _aM [ms]	RÜ _Med [ms]	RÜ _std [ms]	Nuk _aM [ms]	Nuk _Med [ms]	Nuk _std [ms]	N (RA)	RA _aM [ms]	RA _Med [ms]	RA _std [ms]	N (P)	P _aM [ms]	P _Med [ms]	P _std [ms]
Σ	B	14	42,64	42,00	19,43	129,07	124,50	25,09	14	44,64	35,50	27,99	14	173,71	196,50	98,65
	D	46	45,09	40,00	32,29	250,74	194,50	224,16	37	63,35	49,00	39,73	37	201,46	184,00	151,84
	J	5	63,60	64,00	25,01	297,00	285,00	19,91	5	75,6	64,00	19,93	5	199,80	220,00	93,72
	L	40	51,28	43,50	32,71	304,73	292,00	103,80	34	75,82	60,00	45,22	35	204,26	183,00	84,92
	M	8	60,00	50,50	41,45	242,13	249,00	56,82	8	57,75	48,00	37,50	8	149,25	112,50	116,19
	N	6	56,67	62,00	34,77	212,17	216,00	35,74	6	64,00	70,00	29,71	6	546,33	379,00	464,56
	ND	3	127,67	144,00	42,90	233,00	219,00	37,04	0	-	-	-	2	171,50	171,50	40,31
	W	4	85,00	70,00	52,02	205,50	205,00	36,75	4	85,00	85,00	35,17	4	206,75	201,50	19,92

Legende: C vor RÜ = konsonantisches Element vor jeweiligem Resonanzübergang, N = Anzahl, RÜ = Resonanzübergangszeit, Nuk = Dauer des Vokalnukleus, RA = Resonanzabgangszeit, d = Tage, Σ = gesamter Untersuchungszeitraum

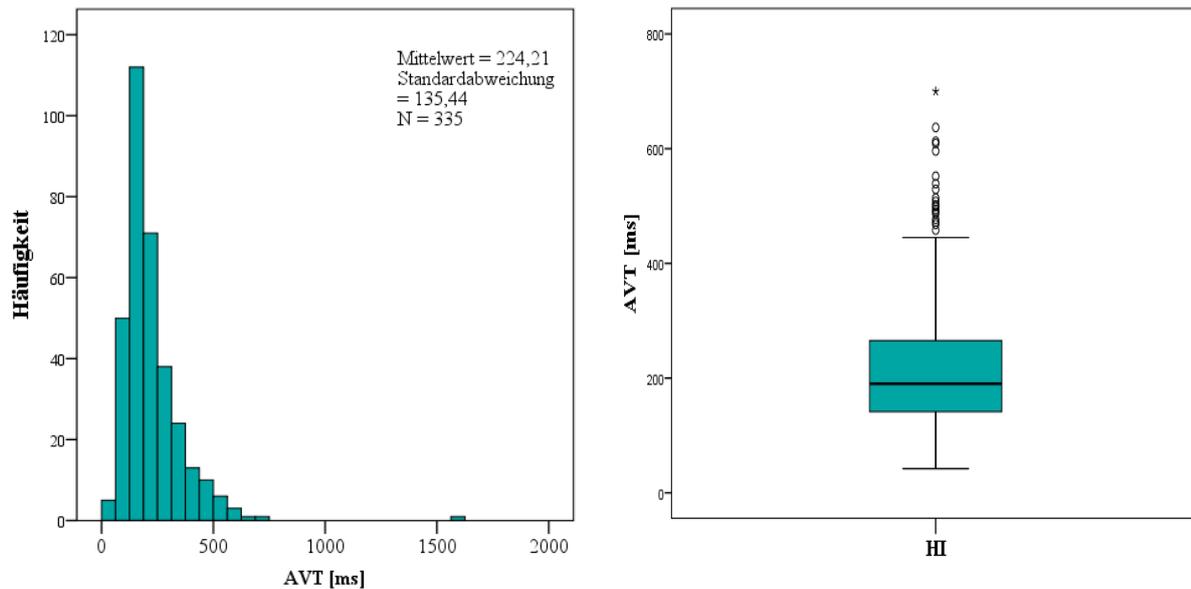
3.5.1. Analyse der aktiven Vokalartikulationszeit (AVT [ms]) zur Beschreibung artikulatorischer Vorgänge bei der Bildung vokalischer Silbenelemente

Die Silbendauer ist eine in der Fachliteratur häufig verwendete, temporale Kenngröße, für deren Bestimmung sich verschiedene Messverfahren finden. Für die Dauer der vokalischen Silbenelemente finden sich in der Literatur jedoch bisher nur wenige Referenzwerte. Mithilfe der PAI-Methode lassen sich sowohl der Vokalnukleus, also die Zeitdauer der vollen vokalischen Resonanz, als auch die umgebenden Interaktionsmuster zwischen der Melodie, ihren Harmonischen und der Resonanzfrequenz R1 sehr präzise vermessen (siehe Abbildung 21, Kapitel 3.2).

Ziel dieser Arbeit war es, die artikulatorische Aktivität bei der Bildung von Babbelsilben zu untersuchen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher als besondere Kenngröße zur Untersuchung der temporalen Abläufe bei der Bildung vokalischer Silbenanteile die „aktive Vokalartikulationszeit“ (AVT) bestimmt. Diese setzt sich aus der Summe der Dauer der Resonanzübergangszeit RÜ („onglide“) und der Dauer des Vokalnukleus zusammen und beschreibt somit die Dauer des Artikulationsprozesses vom Übergang zwischen einem konsonantischen und einem vokalischen Silbenelement bis zum Ende der vollen Vokalresonanz. Die Einzelmessungen sind in den Tabellen 8-11 berichtet. Tabelle 12 zeigt die deskriptive Statistik für die Dauer der aktiven Vokalartikulationszeit. In Abbildung 28 sind die Verteilungseigenschaften der mittleren aktiven Vokalartikulationszeit für alle analysierten kanonischen Babbelvokalisationen als Histogramm und Boxplotdiagramm dargestellt. Aus Abbildung 29 sind die Verteilungseigenschaften für die aktive Vokalartikulationszeit für die einzelnen Probanden ersichtlich. Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergab für das Gesamtkorpus der Daten ($p < 0,001$) sowie für die Einzelkinder GB ($p = 0,007$) und GH ($p = 0,008$) keine Normalverteilung für die AVT, jedoch für die Einzelkinder GA ($p = 0,115$) und GD ($0,921$).

Tabelle 12: Deskriptive Statistik für die aktive Vokalartikulationszeit AVT

Proband	N (Silben)	AVT_Min [ms]	AVT_Max [ms]	AVT_aM [ms]	AVT_Med [ms]	std [ms]
GA	63	75	700	285	237	153
GB	134	42	552	172	157	76
GD	12	61	440	194	173	99
GH	126	58	1570	252	229	157
HI gesamt	335	42	1570	224	190	135



(a) (b)

Abbildung 28: Verteilungseigenschaften der aktiven Vokalartikulationszeit AVT[ms]
(nur kanonische Babbelsilben, Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b)*)

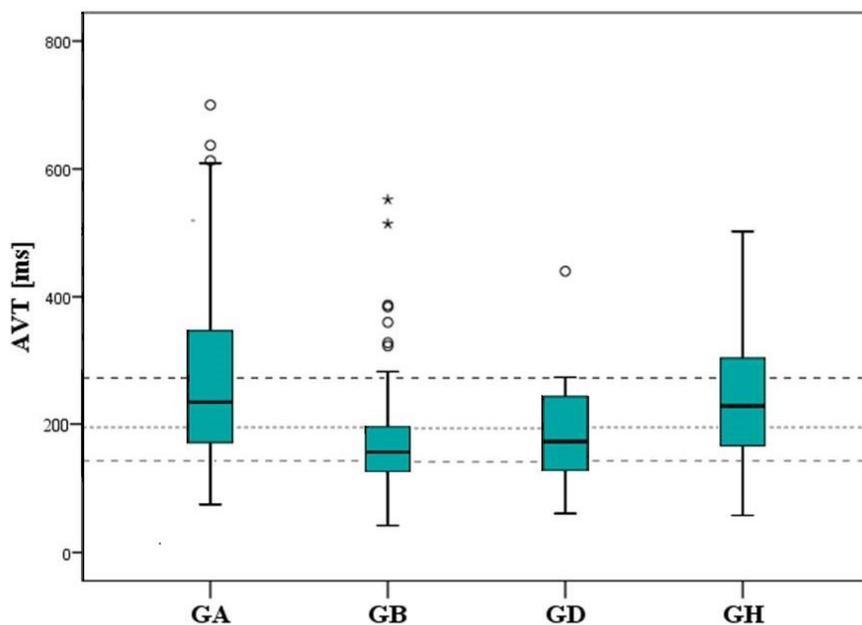


Abbildung 29: Verteilungseigenschaften der aktiven Vokalartikulationszeit AVT [ms] im Einzelkindvergleich

Medianwert / 194ms, 25. Perzentile / 135ms und 75. Perzentile / 281ms für die Vokaldauer aus einer Studie an hörgesunden Kindern eingezeichnet (Pachtner, 2017)*

*Skala der y-Achse mit Maximum bei 800ms zur besseren Lesbarkeit; einziger Extremwert für GH mit 1570ms ist somit nicht abgebildet

In der Einzelkinddarstellung in Abbildung 29 zeigt sich für GA und GH im Unterschied zu den Probanden GB und GD eine längere aktive Vokalartikulationszeit.

Um die Dauer der aktiven Vokalartikulationszeit AVT in Zusammenschau mit der Anzahl der Silben je Vokalisation zu betrachten, wurde die Verteilung der AVT in Abhängigkeit von der Anzahl der Silben je Vokalisation in Abbildung 30 als Boxplotdiagramm dargestellt. Zur Orientierung ist der Medianwert (190ms) für die Vokalartikulationszeit AVT aller hier analysierten Babbelsilben eingezeichnet. Hier zeigt sich die Tendenz, dass die aktive Vokalartikulationszeit auch von der Anzahl der Babbelsilben in einem Signal abhängt.

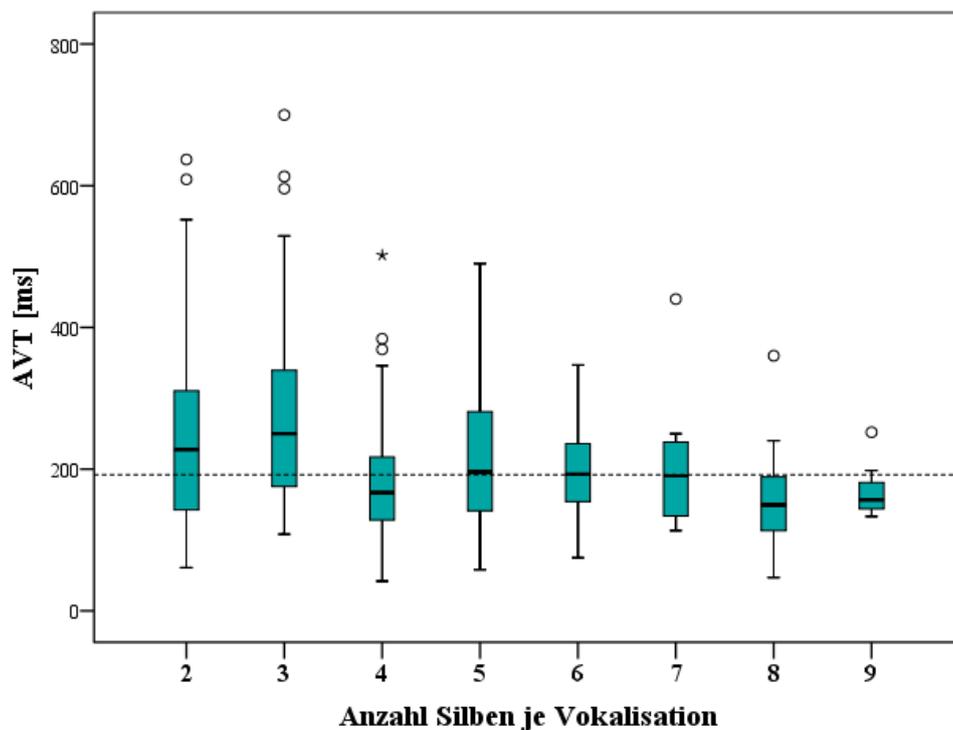


Abbildung 30: Verteilungseigenschaften der AVT [ms] bezogen auf die Anzahl der Babbelsilben je Vokalisation*

*Skala der y-Achse mit Maximum bei 800ms zur besseren Lesbarkeit; einziger Extremwert für GH mit 1570ms somit nicht dargestellt

3.5.2. Analyse der exakten Babbelsilbendauer (exakte Silbendauer [ms])

Die Babbelsilbendauer ist eine in der Fachliteratur häufig verwendete Kenngröße zur Charakterisierung kanonischer Babbelsilben. Zu deren Bestimmung existieren unterschiedliche Methoden. Für diese Arbeit wurden mit der Bestimmung der exakten Babbelsilbendauer und der mittleren Babbelsilbendauer zwei verschiedene Ansätze gewählt. Zur Bestimmung der exakten Babbelsilbendauer wurden die einzelnen Silbenelemente mithilfe der PAI-Methode, wie in Abbildung 21 beschrieben, genau vermessen. Hieraus lässt sich für alle vermessbaren Silben aus der Summe von Resonanzübergangszeit, Vokalnukleus und Resonanzabgangszeit die exakte Babbelsilbendauer berechnen (RÜ+Nuk+RA). Die Verteilungseigenschaften der so berechneten exakten Babbelsilbendauer für die einzelnen Probanden sind in Tabelle 13 bzw. in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Die einzelnen Messwerte wurden probanden- und konsonantenspezifisch in Tabelle 8-11 berichtet.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik für die exakte Babbelsilbendauer (RÜ+Nuk+RA)

Proband	N (Silben)	Min [ms]	Max [ms]	aM [ms]	Med [ms]	std [ms]
GA	63	76	787	362	343	168
GB	134	82	612	229	217	88
GD	12	61	464	232	212	107
GH	126	111	1608	308	275	166
HI gesamt	335	61	1608	284	246	147

Die Darstellung der Verteilungseigenschaften der exakten Silbendauer aller untersuchten kanonischen Babbelsilben in Abbildung 31 und 32 demonstriert, dass der größte Teil der Babbelsilben die von Oller postulierte Höchstgrenze für kanonische Silben von 500ms nicht überschreitet (Oller, 2000).

In Abbildung 32 sind die Verteilungseigenschaften der Werte der exakten Silbendauer für die einzelnen Probanden dargestellt. Die Analyse zeigt, dass sich die Probanden GB und GD sowie die Probanden GA und GH jeweils relativ ähnlich bezüglich der exakten Silbendauer verhalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist der Umstand interessant, dass GA und GH einen größeren Anteil an Silben >500ms in ihren Babbellauten äußern als die beiden anderen Probanden. Auch im Einzelkindvergleich wird deutlich, dass der Großteil der Werte aller Probanden unter der von Oller postulierten Obergrenze von 500ms für die Dauer von

kanonischen Babbelsilben liegt. Der Befund, dass bei allen Kindern auch längere Silben vorkamen, die eine Dauer von 500ms überschreiten, entspricht der im Babbeln zu beobachtenden Variabilität – es werden häufig kanonische und nichtkanonische Silben innerhalb einer Vokalisation kombiniert. Dies ist auch für hörgesunde Kinder typisch und wird in Kapitel 4.3.2 diskutiert.

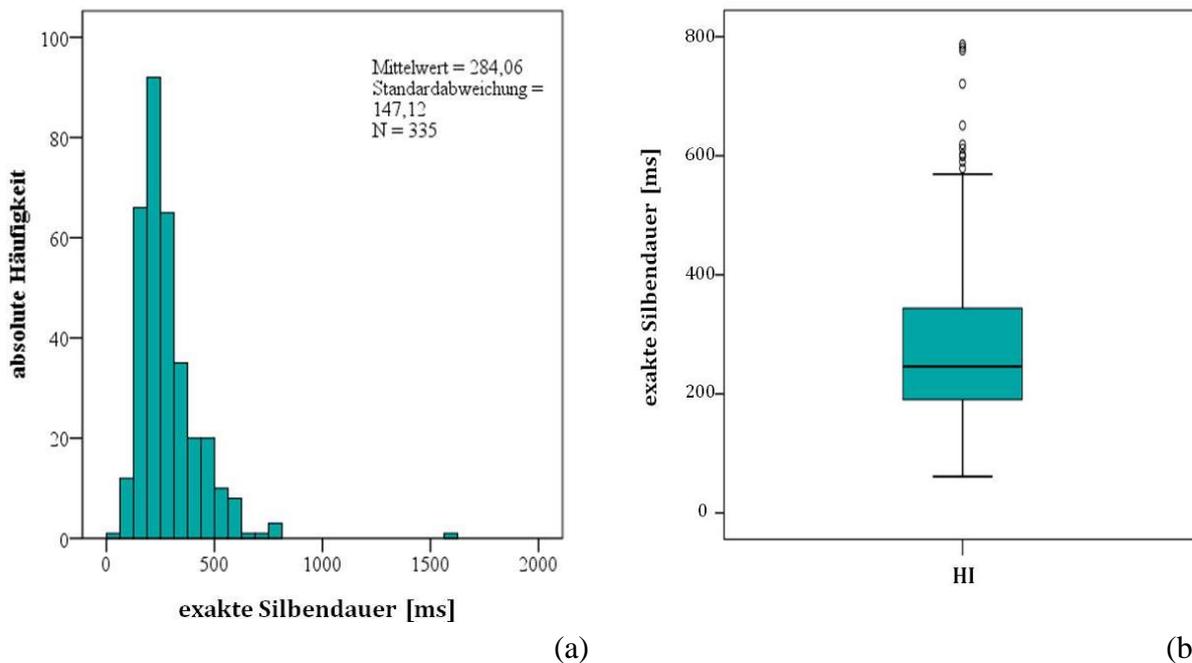


Abbildung 31: Verteilungseigenschaften der exakten Silbendauer (RÜ+Nuk+RA) im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b) *

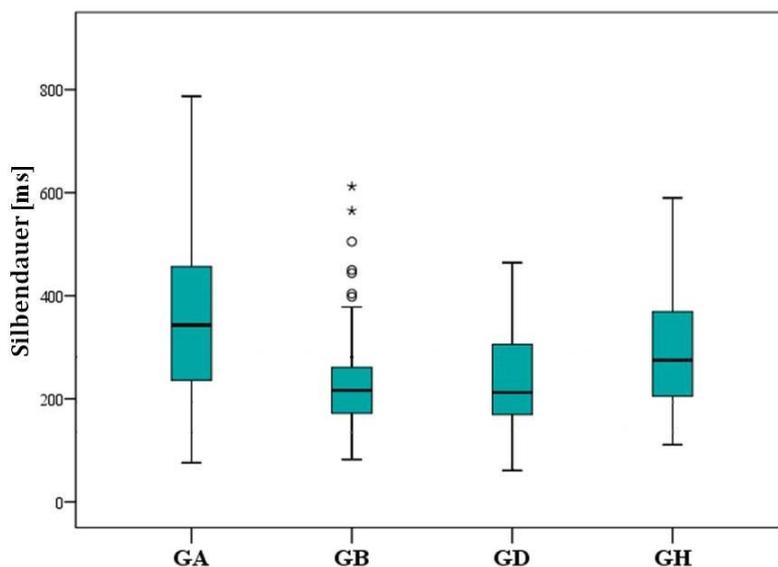


Abbildung 32: Verteilungseigenschaften der exakten Silbendauer (RÜ+Nuk+RA) aller kanonischer Babbelsilben im Einzelkindvergleich*

*aus Gründen der besseren Lesbarkeit ist der Extremwert mit 1608ms für GH jeweils nicht abgebildet

3.5.3. Analyse der mittleren Babbelsilbendauer (mittlere Silbendauer [ms])

Neben der exakten Babbelsilbendauer als Summe von Resonanzübergangszeit, Vokalnukleus und Resonanzabgangszeit wurde als weitere Kenngröße zur Artikulationsanalyse kanonischer Babbellaute die mittlere Babbelsilbendauer gewählt. Diese berechnet sich aus der Artikulationsgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.5.4) und der exakten Signalbereichslänge und mittelt dadurch die Silbendauer über das gesamte Signal, wodurch auch die Pausenelemente einer Silbe berücksichtigt werden. Diese sind als Segmentierungselemente ebenfalls wichtige Bestandteile einer Babbelvokalisation und tragen durch den Einfluss auf die Artikulationsgeschwindigkeit wesentlich zum Höreindruck bei. Die Ermittlung der mittleren Babbelsilbendauer hat zudem den Vorteil, dass auch Silben in die Mittelwertberechnung eingehen, die aus Gründen mangelhafter Signalgüte im entsprechenden Signalbereich nicht mithilfe der PAI-Methode vermessen werden konnten (siehe auch Kapitel 3.5.4). Um die exakte und die mittlere Silbendauer vergleichen zu können, wurde die mittlere Babbelsilbendauer für jede Vokalisation (N = 133) berechnet und der Wert jeweils auf die vermessbaren Einzelsilben der Vokalisation übertragen (N gesamt = 335 Silben). In Tabelle 14 ist die deskriptive Statistik für die mittlere Babbelsilbendauer ersichtlich.

Tabelle 14: Deskriptive Statistik für die mittlere Babbelsilbendauer

Proband	N (Silben)	Min [ms]	Max [ms]	aM [ms]	Med [ms]	std [ms]
GA	63	274	1062	548	447	207
GB	134	175	957	378	320	177
GD	12	155	508	440	500	105
GH	126	171	1031	473	447	166
HI gesamt	335	155	1062	448	386	188

Die Verteilungseigenschaften für die mittlere Silbendauer sind als Histogramm und Boxplotdiagramm in Abbildung 33 und Abbildung 34 für das Gesamtkorpus der analysierten Babbelsilben sowie im Einzelkindvergleich dargestellt.

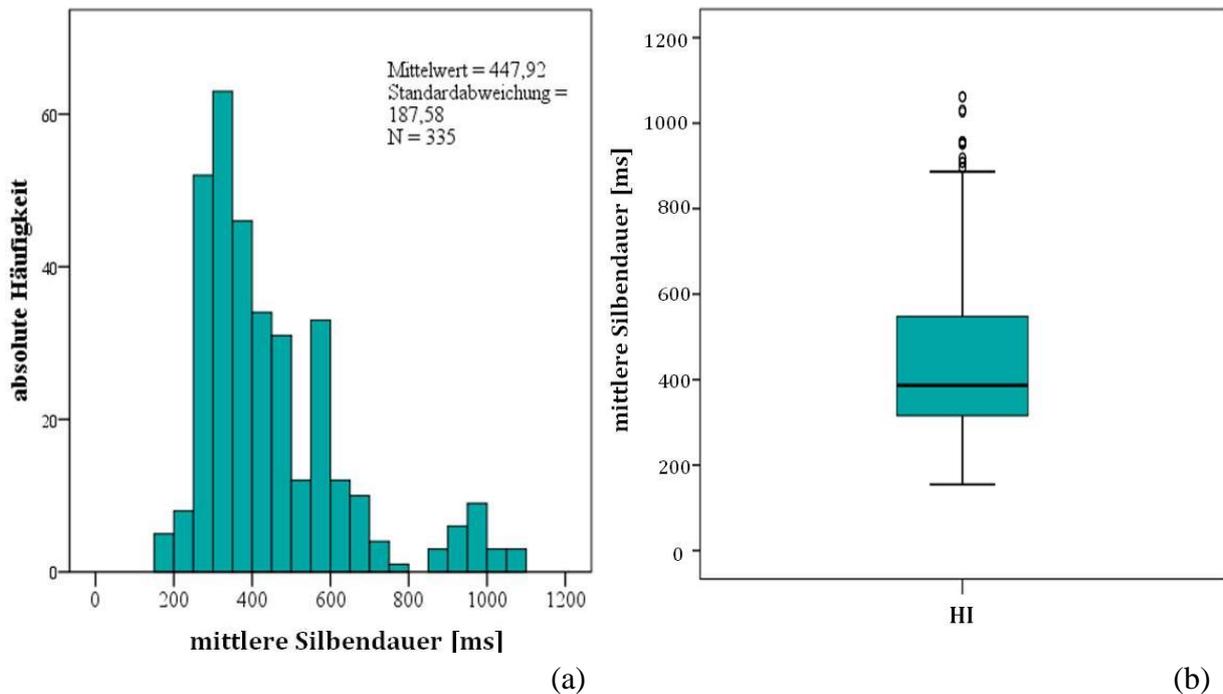


Abbildung 33: Verteilungseigenschaften der mittleren Silbendauer der untersuchten kanonischen Babbelsilben im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b)

Die Verteilungseigenschaften aller untersuchten kanonischen Babbelsilben der hörbbeeinträchtigteten Probanden in Abbildung 33 demonstrieren auch für die mittlere Silbendauer, dass selbst nach Berücksichtigung der Pausenelemente und Berücksichtigung nicht vermessbarer Silben zur Berechnung der Mittelwerte der größte Teil der untersuchten Silben die von Oller postulierte Höchstgrenze für kanonische Babbelsilben von 500ms nicht überschreitet (Oller, 2000). Insgesamt liegen die Mittelwerte der hier untersuchten mittleren Silbendauer jedoch über den Mittelwerten für die exakte Silbendauer.

Die Unterschiede der Verteilung zwischen den einzelnen Probanden werden in Abbildung 34 deutlich und entsprechen im Wesentlichen den Befunden für die exakte Babbelsilbendauer: Die Probanden GA und GH zeigen auch hier einen größeren Anteil an Silben >500ms als die beiden Probanden GB und GD, wobei der Mittelwert für GA mit 548ms sowohl über der von Oller postulierten Grenze von 500ms als über den Mittelwerten der anderen Probanden liegt.

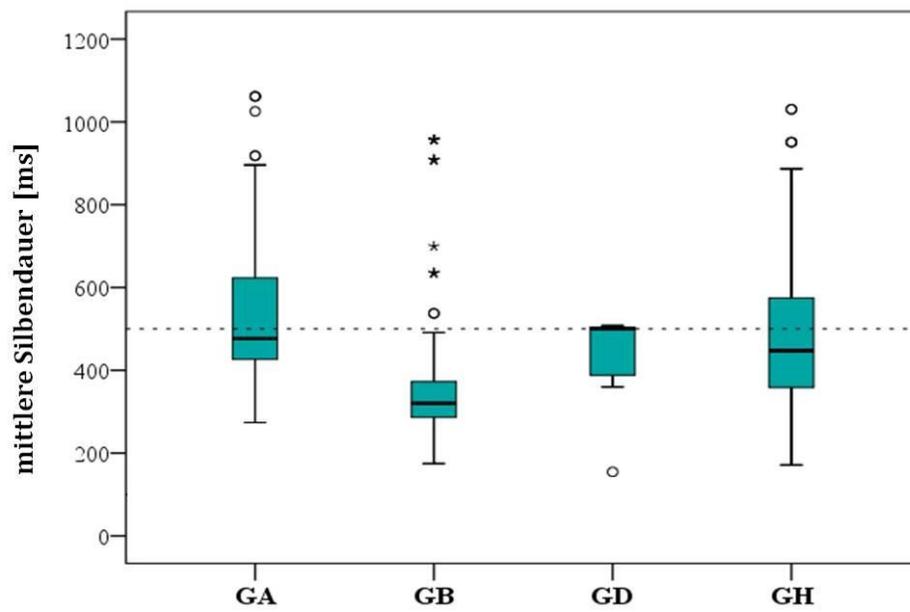


Abbildung 34: Verteilungseigenschaften der mittleren Silbendauer im Einzelkindvergleich
 Als Referenzwert ist der bei Oller angegebene Richtwert von 500ms für die Höchstdauer kanonischer Babbelsilben eingezeichnet.

3.5.4. Analyse der mittleren Anzahl der Babbelsilben pro Sekunde ([Silben/s]) als Maß für die Artikulationsgeschwindigkeit

Aus der mithilfe des CDAP-Programms objektiv erfassten Signalbereichslänge und der durch phonetische Analyse bestimmten Anzahl der Babbelsilben je Vokalisation wurde als Maß für die Artikulationsgeschwindigkeit die mittlere Anzahl der pro Sekunde produzierten Babbelsilben je Einzelsignal berechnet. Die Anzahl der Silben in einem Einzelsignal schließt auch solche Silben mit ein, die zwar phonetisch transkribiert werden konnten, deren Signalbereichsqualität für die Vermessung jedoch nicht ausreichte (Rauschbanden, Shifts, Melodieabbruch, dadurch unklare Resonanzfrequenzstruktur innerhalb der Silbe). Die so berechnete Artikulationsrate stellt also einen Mittelwert für das jeweilige Einzelsignal dar. Die Variationsbreite der Artikulationsgeschwindigkeit innerhalb eines Signals durch die Bildung von unterschiedlich kurzen oder langen Silben kann auf diese Weise nicht erfasst werden. Der Kolmogorov-Smirnov-Test für die Verteilung der mittleren Artikulationsgeschwindigkeit je Vokalisation ergab für die kanonischen Babbellaute der HI-Gruppe eine hinreichende Normalverteilung (N(HI)=133 / $p=0,793$); ebenso ergab sich eine Normalverteilung der Werte der einzelnen Probanden (GA ($p=0,98$), GB ($p=0,51$), GD ($p=0,32$), GH ($p=0,43$)).

Tabelle 15 berichtet die deskriptive Statistik der mittleren Artikulationsgeschwindigkeit im Untersuchungszeitraum für die einzelnen Kinder sowie für alle HI-Kinder als Gruppe zusammengefasst.

Tabelle 15: Deskriptive Statistik für die mittlere Artikulationsgeschwindigkeit (AG)

Proband	N (Signale)	AG_Min [Silben/s]	AG_Max [Silben/s]	AG_aM [Silben/s]	AG_Med [Silben/s]	AG_std [Silben/s]
GA	25	0,94	3,65	2,04	2,1	0,79
GB	45	1,05	5,73	3,01	3,1	0,88
GD	6	1,97	6,47	2,99	2,0	1,73
GH	57	0,97	5,84	2,53	2,2	1,00
HI gesamt	133	0,94	6,47	2,62	2,6	1,02

In Abbildung 35 ist die Verteilung der mittleren Artikulationsgeschwindigkeit für die einzelnen Probanden dargestellt. Zur Orientierung für den Leser wurde der in einer laufenden Studie an normalhörenden Kindern am ZVES ermittelte Range zwischen der 25. Perzentile (2,08 Silben/s) und der 75. Perzentile (2,92 Silben/s) eingezeichnet.

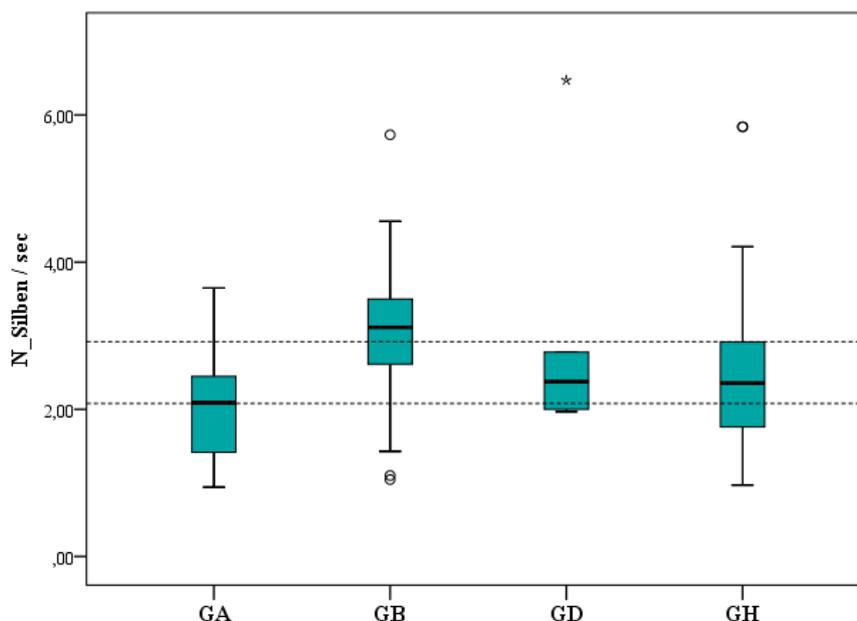


Abbildung 35: Verteilungseigenschaften der mittleren Artikulationsgeschwindigkeit im Einzelkindvergleich

Zur Orientierung sind als horizontale Linien die Werte für die 25. und 75. Perzentile eines Vergleichssamples hörgesunder Kinder aus einer laufenden ZVES-Studie angegeben.

3.5.5. Analyse der Resonanzübergangszeit RÜ [ms] zur Charakterisierung konsonantischer Silbenelemente

Der Höreindruck konsonantischer Silbenelemente in der Erwachsenensprache entsteht durch das „Abbiegen“ oder den „onglide“ der entsprechenden Vokalformanten beim artikulatorischen Übergang zwischen konsonantischen und vokalischen Silbenelementen (Erläuterungen hierzu siehe Diskussion, Kapitel 4.4). Im PAI-Diagramm entspricht dieses Element der Resonanzübergangszeit RÜ, anhand derer sich die Dauer des Artikulationsprozesses beim Übergang zwischen einem konsonantischen und einem vokalischen Silbenelement vermessen lässt. Sie wurde daher als Kenngröße zur Untersuchung artikulatorischer Abläufe bei der Bildung konsonantischer Silbenelemente gewählt. Um diese Abläufe näher zu charakterisieren, wurde die Resonanzübergangszeit der

ersten Resonanzfrequenz R_1 in Abhängigkeit von dem durch phonetische bzw. orthographische Transkription festgestellten, vorausgehenden konsonantischen Silbenelement betrachtet.

In die Analyse der Resonanzübergangszeit gingen die Messwerte von 335 Babbelsilben aus 133 Einzelvokalisationen der hörbeeinträchtigten Probanden ein. Es wurde die mittlere Resonanzübergangszeit für die gesamte Gruppe der HI-Kinder sowie die mittlere Resonanzübergangszeit für die Einzelkinder bestimmt. Zusätzlich erfolgte in einem zweiten Schritt eine Analyse der Resonanzübergangszeit in Abhängigkeit von dem vorausgehenden konsonantischen Element, welches mittels orthographischer Transkription ermittelt wurde. Die ermittelten Daten für die jeweiligen Probanden finden sich ausführlich in den Tabellen 8 - 11.

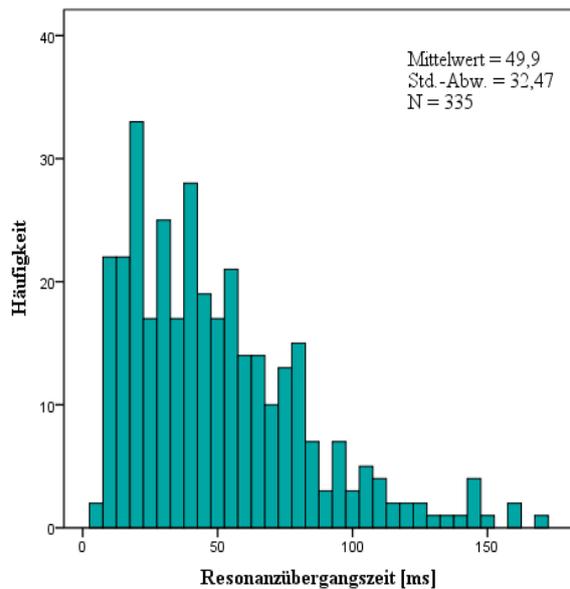
Tabelle 16 zeigt die deskriptive Statistik der Resonanzübergangszeit für die einzelnen Probanden sowie für die Gesamtheit der analysierten Vokalisationen.

Tabelle 16: Deskriptive Statistik für die Resonanzübergangszeit (RÜ)

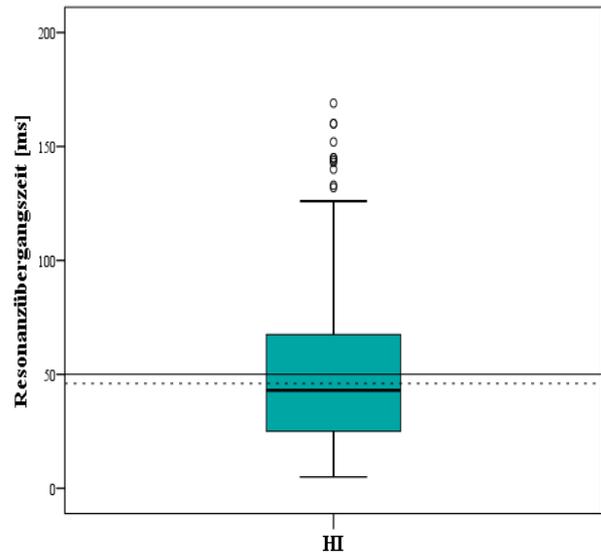
Proband	N (Silben)	RÜ_Min [ms]	RÜ_Max [ms]	RÜ_aM [ms]	RÜ_Med [ms]	std [ms]
GA	63	5	145	52	43	34,29
GB	134	5	169	47	42	29,12
GD	12	20	119	52	40	32,88
GH	126	8	160	52	45	34,90
HI gesamt	335	5	169	50	43	32,47

Die Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit sind in Abbildung 36(a) und (b) als Histogramm und Boxplotdiagramm dargestellt.

Da für diese Messgröße in der Literatur weder für hörgesunde noch hörbeeinträchtige Kinder Referenzwerte vorlagen, wurden an dieser Stelle die kanonischen Babbellaute des hörgesunden Referenzprobanden R-GG zu Vergleichszwecken herangezogen (N = 22 kanonische Babbellaute / 52 Babbelsilben). Diese Referenzlaute wurden während des Datenselektionsprozesses nach denselben Kriterien wie die Testlaute der hörbeeinträchtigten Kinder ausgewählt (siehe Tabelle 3) und ebenfalls mit den speziell für die Analyse kanonischer Babbellaute entwickelten Kriterien der PAI-Methode vermessen. In Abbildung 36(b) ist der arithmetische Mittelwert von RÜ für die Vergleichslaute von Proband R-GG zusätzlich zum Mittelwert der HI-Kinder als Referenzlinie eingezeichnet.



(a)



(b)

Abbildung 36: Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b)

Im Boxplotdiagramm sind der für das Vergleichssample von R-GG errechnete Mittelwert von 46ms (...) sowie der Mittelwert für die HI-Gruppe von 50ms (---) eingezeichnet.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergab für die Dauer der Resonanzübergangszeit für das Vergleichssample von Referenzproband R-GG eine hinreichende Normalverteilung ($N(R) = 52 / p=0,7$). Für die HI-Gruppe ergab sich keine hinreichende Normalverteilung ($N(HI)=335 / p=0,003$). Abbildung 36 zeigt, dass für RÜ in den Lauten der HI-Kinder vor allem Werte bis 60ms auftraten. Der arithmetische Mittelwert für RÜ von 50ms der hier analysierten Testsignale der hörbeeinträchtigteten Kinder ist quasi mit dem Mittelwert von 46ms des Referenzkindes R-GG identisch.

Abbildung 37 zeigt die Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit im Einzelkindvergleich. Zur Veranschaulichung wurden die Werte für die 25. Perzentile (17ms) und die 75. Perzentile (67ms) des Referenzkindes R-GG sowie der von Oller postulierte Range von 25-120ms für die Resonanzübergangszeit in kanonischen Babbelsilben für Kinder mit englischer Umgebungssprache („rapid formant transitions“, Oller 2000, S.86) mit abgebildet. Dabei zeigt sich, dass die für die Probanden ermittelten Werte sowohl im Bereich der Werte des hörgesunden Kindes des Vergleichssamples als auch innerhalb des von Oller postulierten Bereichs für „kanonische Formantübergänge“ liegen.

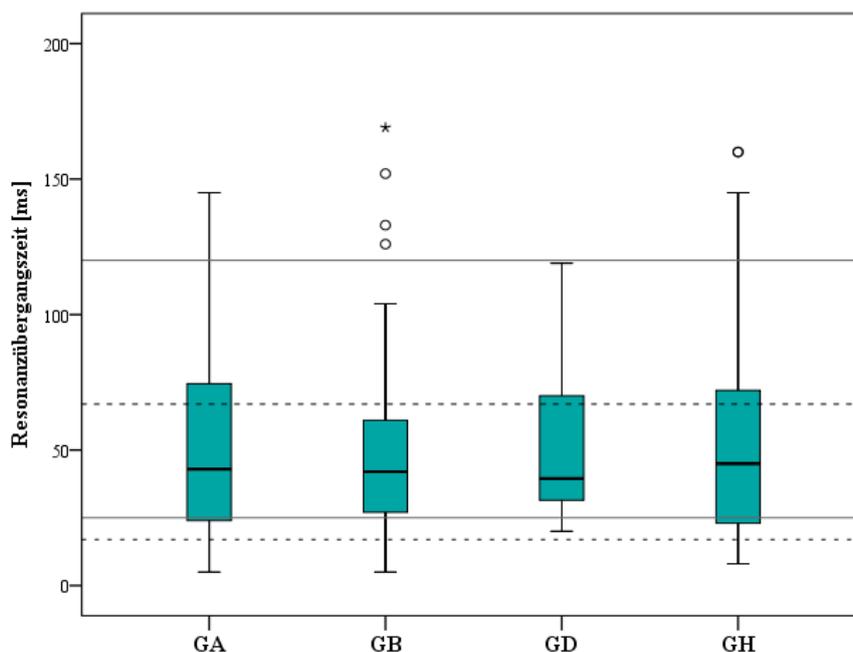


Abbildung 37: Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit im Einzelkindvergleich

Zur Orientierung sind der Referenzbereiche nach Oller (—) und die 25./ 75. Perzentile eines Vergleichssamples des hörgesunden Kindes R-GG (- - -) angegeben.

In Tabelle 17 ist die deskriptive Statistik für die Resonanzübergangszeiten der einzelnen Babbelsilben nochmals nach den verschiedenen konsonantischen Silbenelemente (C) aufgeschlüsselt, die dem jeweiligen Vokalnukleus der Silbe vorausgingen.

Tabelle 17: Analyse der Resonanzübergangszeit in Abhängigkeit von den konsonantischen Elementen C der Silbe (Gesamtkorpus der Babbelsilben)

C	N	%	Min [ms]	Max [ms]	aM [ms]	Med [ms]	std [ms]
[b]	70	20,9	10	145	44	41	24
[d]	101	30,1	5	160	49	42	35
= Plosive		51,0					
[j]	47	14,0	9	152	50	42	33
[l]	52	15,5	8	169	59	55	37
= Approximanten		29,6					
[m]	19	5,7	8	143	48	41	34
[n]	7	2,1	13	103	53	53	33
= Nasale		7,8					
[w]	39	11,6	5	160	52	45	32
= Frikative		11,6					
HI gesamt	335	100,0	5	169	50	43	32

In Abbildung 38 sind die Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeiten aller untersuchten kanonischen Babbelsilben der HI-Kinder getrennt nach den verschiedenen konsonantischen Silbenelementen im Boxplotdiagramm dargestellt. Dabei zeigen sich für die einzelnen konsonantischen Elemente nur geringe Unterschiede, wie sie auch für die Erwachsenensprache typisch sind. Die Resonanzübergangszeiten liegen für alle untersuchten Konsonantkategorien in dem von Oller angegebenen Range von 25-120ms für schnelle Formantübergänge.

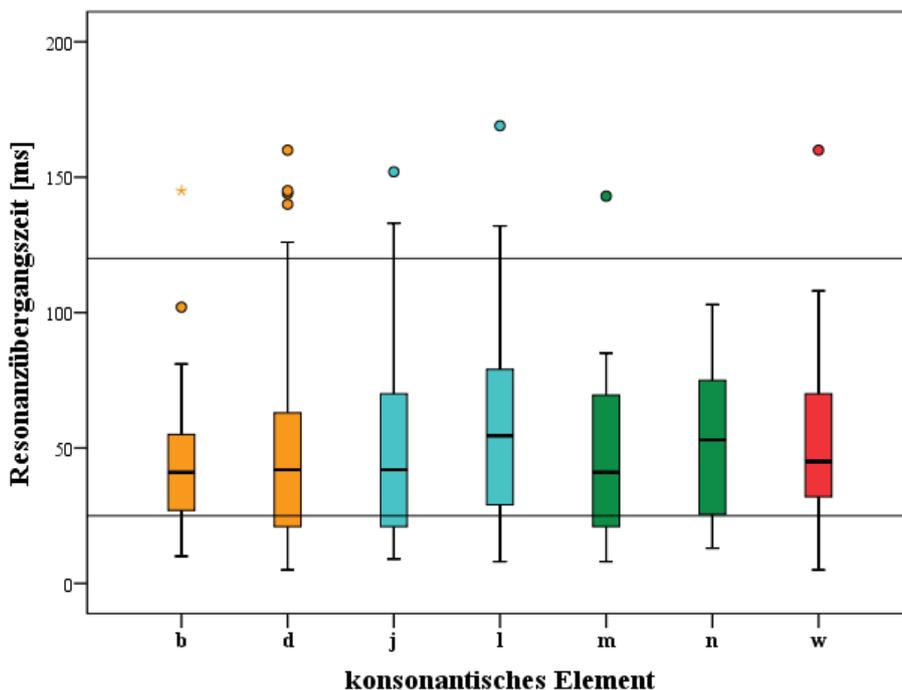


Abbildung 38: Verteilungseigenschaften der Resonanzübergangszeit, differenziert nach dem jeweiligen konsonantischen Elementen der Silben

Horizontale Markierung: Referenzbereich nach Oller (25-120ms), orange = Plosive, blau = Approximanten, grün = Nasale, rot = Frikative

Bei der Klassifikation von kanonischen Babbelsilben spielen nach Oller als Kriterien sowohl die Silbenlänge (<500ms, Kriterium 1) als auch das Vorliegen schneller Formantübergänge (25-120ms, Kriterium 2) eine Rolle (Oller 2000). In der Literatur ließen sich jedoch keine Angaben zur Gewichtung dieser beiden Parameter für die Klassifikation von Silben als kanonisch oder nicht-kanonisch finden. Um die Verteilung des Zutreffens dieser beiden Kriterien für die hier analysierten Babbelsilben zu überprüfen, wurden die beiden Messgrößen „Resonanzübergangszeit“ und „mittlere Silbenlänge“ im Scatterplot gegeneinander aufgetragen (siehe Abbildung 39).

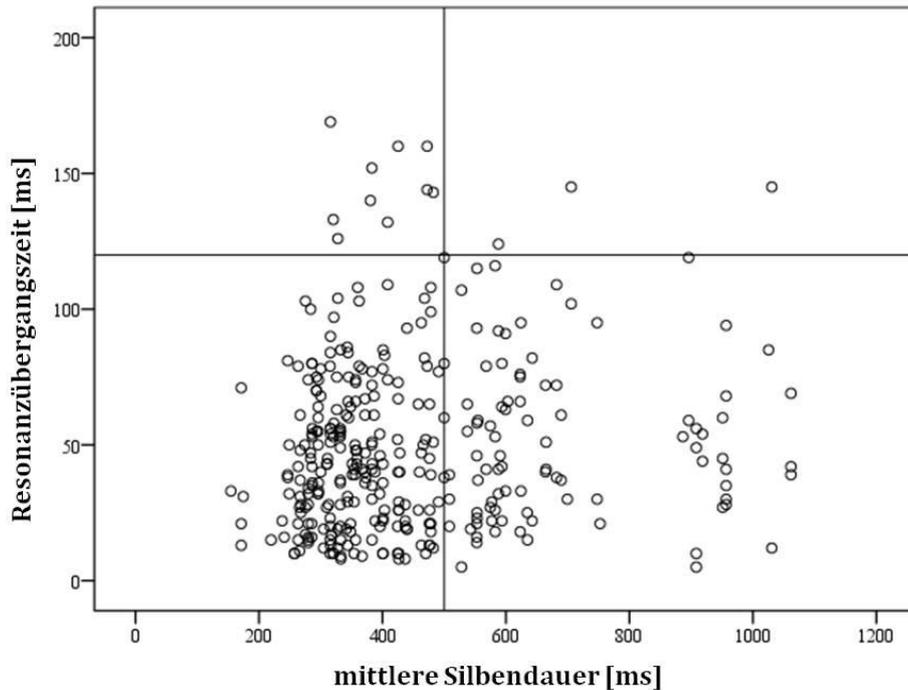


Abbildung 39: Scatterplot mit Auftragung der mittleren Silbendauer und der Resonanzübergangszeit

Zur Orientierung sind die Richtwerte von 500ms für die Silbendauer und 120ms für die Resonanzübergangszeit als Kriterien der Kanonizität eingezeichnet (Oller, 2000).

Hier zeigt sich, dass die Mehrzahl der analysierten Silben beide geforderten Kriterien, also sowohl einen schnellen Resonanzübergang $<120\text{ms}$ als auch eine Silbendauer $<500\text{ms}$, erfüllt. Ein weiterer großer Anteil der analysierten Silben erfüllt das Kriterium der schnellen Formantübergänge, wobei die Silbendauer zum Teil deutlich über der geforderten Obergrenze von 500ms liegt. Zehn der insgesamt 335 analysierten Silben des Gesamtkorpus erfüllen zwar das Kriterium einer Silbendauer $<500\text{ms}$, jedoch nicht das des schnellen Formantübergangs. Nur drei der analysierten Silben aus dem Gesamtkorpus erfüllen weder Kriterium 1 noch Kriterium 2.

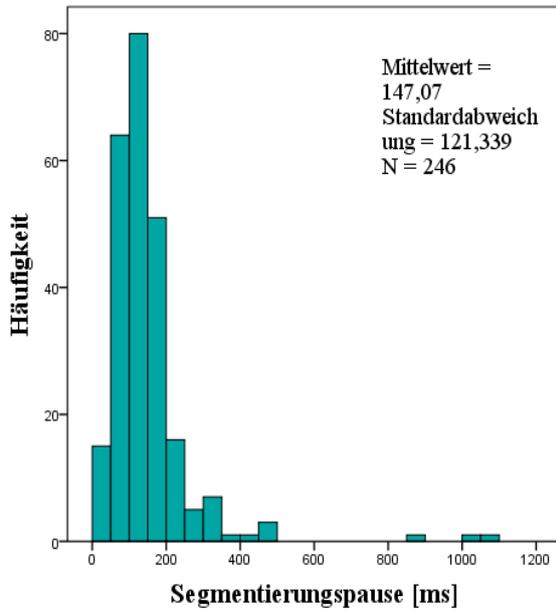
3.5.6. Analyse der Dauer der Segmentierungspausen

Pausenelemente zwischen den einzelnen Babbelsilben, die die Babbellaute segmentieren und rhythmisieren, spiegeln sich entweder durch eine Unterbrechung der Phonation im Sinne einer Unterbrechungen der Grundfrequenz oder aber, bei Fortsetzung der Phonation, als Tuning im Bereich der Grundfrequenz F_0 wider. Diese Pausenelemente, die über die Verwendung der exakten Signalbereichslänge auch in die Berechnung der mittleren Silbendauer eingingen, wurden hier ebenfalls bezüglich ihrer Zeitdauer untersucht. In Tabelle 18 ist die deskriptive Statistik für die Segmentierungspausen berichtet.

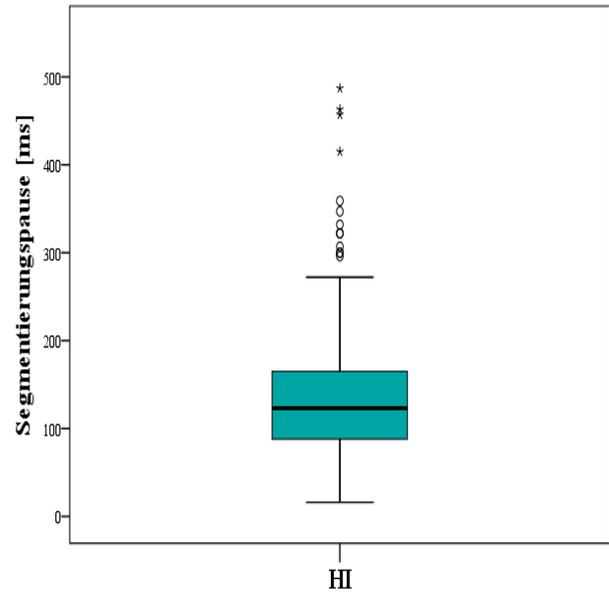
Tabelle 18: Deskriptive Statistik für die Dauer der Segmentierungspausen der untersuchten kanonischen Babbellaute

Proband	N (Pausen)	P_Min [ms]	P_Max [ms]	P_aM [ms]	P_Med [ms]	std [ms]
GA	47	33	415	141	136	64
GB	100	16	359	116	98	58
GD	5	30	487	268	322	223
GH	94	25	1099	176	116	168
HI gesamt	246	16	1099	147	113	121

Abbildung 40 zeigt die Verteilungseigenschaften der Dauer aller analysierten Segmentierungspausen im Histogramm und Boxplotdiagramm. In Abbildung 41 sind die Verteilungseigenschaften der Dauer der Segmentierungspausen für die Einzelkinder dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Werte für Proband GD deutlich von den Werten der anderen untersuchten Kinder abweichen.



(a)



(b)*

Abbildung 40: Verteilungseigenschaften der Dauer der Segmentierungspausen aus den Babelvokalisationen im Histogramm (a) und Boxplotdiagramm (b)*

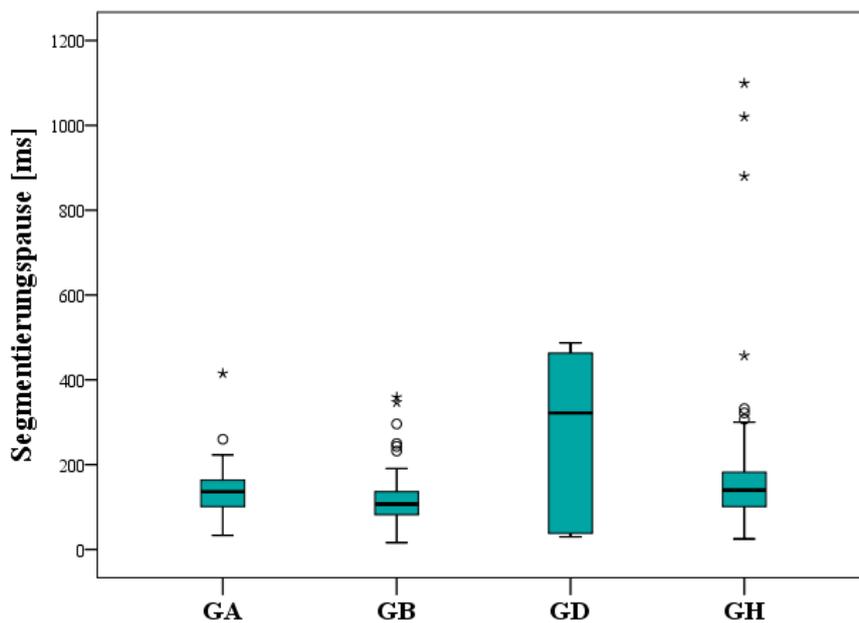


Abbildung 41: Verteilungseigenschaften der Dauer der Segmentierungspausen im Einzelkindvergleich*

*aus Gründen der besseren Lesbarkeit sind die drei Extremwerte für Kind GH zwischen 900 und 1099ms nicht abgebildet (siehe Abbildung 41)

4. Diskussion

4.1. Vergleich der individuellen vorsprachlichen Entwicklungsprofile und des zeitlichen Ablaufs beim Erwerb kanonischer Merkmale

Aus den für die einzelnen Kinder erstellten Profilen für den zeitlichen Ablauf der vorsprachlichen Entwicklung geht eine deutliche interindividuelle Variabilität für die Eintrittszeitpunkte in die verschiedenen Entwicklungsphasen und auch für die Dauer der einzelnen Phasen hervor (siehe Abbildung 1-4, Kapitel 2.3). Bei der Interpretation der Entwicklungsprofile muss berücksichtigt werden, dass die genauen Eintrittszeitpunkt in die jeweilige vorsprachliche Entwicklungsphase für die einzelnen Kinder letztlich nicht auf den Tag genau zu bestimmen waren, da zum Teil unterschiedlich lange Zeiträume vorlagen, in denen keine Lautaufnahmen stattgefunden hatten.

Der bei Oller angegebene Richtwert für den Eintritt in die kanonische Babbelphase liegt zwischen dem 5.-10. Lebensmonat (Oller, 2000). Drei der HI-Kinder zeigen im Vergleich zu diesem Richtwert, der allerdings nie empirisch in einer größeren Studie verifiziert wurde, einen verspäteten Beginn der Äußerung kanonischer Babbellaute: GA mit 352 und GB mit 345 Lebenstagen liegen dabei noch relativ dicht am erwarteten Zeitraum, während die ersten kanonischen Babbelsilben von Proband GD erst im Alter von 445 Lebenstagen, also rund fünf Monate nach dem erwarteten Zeitraum, dokumentiert sind. Bei Proband GD ergab sich als Besonderheit, dass er im für kanonisches Babbeln typischen Alter begann, rhythmische Merkmale wie durch Melodieabbrüche generierte Silbensequenzen in seinen Lautäußerungen zu zeigen, jedoch ausschließlich als Ketten vokalischer Elemente (V-V-V-V), ohne konsonantische Elemente (C) zwischenschalten. Diese Vokalketten zogen sich auch nach Erwerb konsonantischer Elemente und nach dem Beginn der Produktion von CV-Abfolgen weiter durch die kanonische Babbelphase. In einer Studie von Stoel-Gammon zeigte sich, dass der eingeschränkte Gebrauch von Konsonanten im kindlichen Babbeln als Risikofaktor für eine spätere Sprach- und Sprechstörung gilt (Stoel-Gammon, 1994). Desweiteren fiel bei der Sichtung des Datenmaterials von Proband GD auf, dass vergleichsweise viele „Brumm“- und „Summ-Laute“ mit sehr niedriger Grundfrequenz sowie viele hochfrequente Laute mit Shifts der Grundfrequenz auftraten, sodass insgesamt nur wenige Signale dieses Probanden die Kriterien des kanonischen Babbelns (Produktion repetitiver CV- oder VC-Kombinationen, schnelle Formantübergänge, Vokalnuklei <500ms, Höreindruck der „Wohlgeformtheit“ einer Silbe, siehe Kapitel 1.2) und die qualitativen Mindestanforderungen für die Analyse mit der PAI-Methode erfüllten. Bei der weiteren

Verlaufsbeobachtung der Entwicklung dieses Probanden erwies sich schließlich die Hörgeräteversorgung auf dem linken Ohr als unzureichend. Dieser Befund könnte mit dem beschriebenen Mangel an konsonantischen Silbenelementen in Zusammenhang stehen, sodass er bereits im Alter von 11 Monaten auch auf der zweiten Seite mit einem Cochleaimplantat versorgt wurde. Der Proband GH bewegt sich beim zeitlichen Ablauf seiner vorsprachlichen Entwicklung in den angegebenen Normbereichen und beginnt mit 210 Tagen im Vergleich zu den anderen Kindern der HI-Gruppe bereits sehr früh, kanonische Babbellaute zu produzieren, sodass er am ehesten mit dem Referenzkind GG vergleichbar scheint. Das Sprechen erster Wörter als Endpunkt der vorsprachlichen Entwicklung setzt bei den jeweiligen Probanden ebenfalls zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten ein.

Betrachtet man das Alter der Probanden in Abhängigkeit von ihrer Hörhilfenversorgung, so liegt das „Höralter“ im Untersuchungszeitraum der kanonischen Babbelphase für Proband GA zwischen dem 92. und 209. Tag nach Erstaktivierung mit einem CI auf der rechten Seite (chronologisches Alter 352-469 Tage). Auf der linken Seite trug dieses Kind im Untersuchungszeitraum nach wie vor ein HDO-Gerät. Die CI-Implantation des linken Ohres erfolgte erst deutlich später im Alter von 3,4 Jahren. Proband GA hat damit in einem Zeitraum von ca. 3-4 Monaten ab Erstaktivierung des CIs kanonische Babbellaute erworben. Vor CI-Implantation hat dieses Kind keine vergleichbaren Babbellaute geäußert. Für Proband GD errechnet sich für den Untersuchungszeitraum ein Höralter von 42-160 Tagen nach CI-Implantation, die erste Äußerung kanonischer Babbellaute ist also einen Monat nach der Implantation dokumentiert. Dies bestätigt die Angaben von Schauwers et al.: Diese Autoren beschreiben bei zehn Kindern, die im Alter von 5-20 Monaten mit einem CI versorgt wurden, dass alle Kinder in einem zeitlichen Intervall von einem bis zu vier Monaten nach Aktivierung des CIs mit dem Äußern kanonischer Babbellaute begannen (Schauwers, et al., 2004). Die Probanden GB und GH tragen im Untersuchungszeitraum keine Cochleaimplantate sondern HDO-Geräte. Bei ihnen beträgt das Höralter im Untersuchungszeitraum der kanonischen Babbelphase, berechnet ab der ersten Hörhilfenversorgung, 175-307 Tage (GB) bzw. 133-240 Tage (GH).

Insgesamt erreichen alle Probanden nach Hörhilfenversorgung die kanonische Babbelphase als Meilenstein der vorsprachlichen Entwicklung innerhalb des oben erwähnten Zeitraumes von ein bis vier Monaten Höralter, was für eine gute Hörhilfenversorgung und damit eine gute Vergleichbarkeit der untersuchten Vokalisationen in dieser Arbeit spricht.

4.2. Interpretation der deskriptiven Datenanalyse für akustische Kenngrößen

In der Literatur existieren bisher nur wenige Referenzwerte für akustische Kenngrößen kanonischer Babbellaute. Bisher publizierte Kenngrößen basieren auf der Untersuchung sehr kleiner Stichproben ($N = 1-5$) englischsprachiger Kinder. Am ZVES wurden im Rahmen einer Längsschnittstudie erstmals geeignete Referenzwerte für kanonische Babbellaute von Kindern mit Deutsch als Muttersprache mittels einer speziellen Praat-Messroutine erhoben (Praat: Open-Source-Programm zur phonetischen Analyse, siehe Pachtner, 2017). In der vorliegenden Arbeit wurden Ergebnisse aus dieser Untersuchung an einigen Stellen als Bezüge verwendet, um sie mit den hier mittels PAI-Methode erhobenen Daten zu vergleichen. Sie sind im Ergebnisteil in Form von Markierungen des Variationsbereiches in manchen Diagrammen dargestellt. Dies hatte nicht das Ziel, einen systematischen Vergleich mit den Werten der in dieser Arbeit untersuchten, sensorineural hörbeeinträchtigten, wenn auch gut mit Hörhilfen versorgten Kindern vorzunehmen. Vielmehr sollte belegt werden, dass die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werte der analysierten Messgrößen in einem ähnlichen Größenordnungsbereich liegen, wie dies bei gesunden Säuglingen oder Kindern mit deutscher Muttersprache bisher bekannt ist. Ein systematischer Vergleich zwischen den hier analysierten akustischen Eigenschaften kommunikativer Laute hörbeeinträchtigter Kinder und jenen von hörgesunden Kindern kann die vorliegende Arbeit nicht leisten. Ziel der Arbeit war es, die grundsätzliche Anwendbarkeit der gewählten Methode zu überprüfen und zu zeigen, dass bei der Anwendung der getesteten Methode valide Messergebnisse erzielt werden können.

4.2.1. Diskussion der Analyse der mittleren Grundfrequenz F_0_{gM}

In dieser Arbeit wurde die mittlere Grundfrequenz der Vokalisationen – analog zu dem in Kapitel 2.4 beschriebenen und aus methodischen Gründen notwendigen Datenselektionsprozess – in drei verschiedenen Vokalisationskategorien untersucht, um zu entscheiden, ob sich die deskriptiven statistischen Werte für die mittlere Grundfrequenz und damit für eine wesentliche Eigenschaft aller Vokalisationen aus der kanonischen Babbelphase (Kategorie 1) von solchen mit einem identifizierbaren Resonanzfrequenzverlauf (Kategorie 2) sowie von zuletzt ausschließlich kanonischen Babbellauten (Kategorie 3) unterscheiden. Wesentlich für die Zielstellung vorliegender Arbeit ist der Befund, dass dies praktisch nicht der Fall war (vgl. Kapitel 3.4.1). Dass sich

die mittleren Grundfrequenzwerte über die drei Vokalisationskategorien relativ ähnlich verhalten, bestätigt die gut bekannte Tatsache, dass diese Größe einen geeigneten Indikator für den Nachweis neuro-physiologischer Dysfunktionen darstellt (Karelitz & Fisichelli, 1962; Mende, Wermke, Schindler, Wilzopolski, & Hock, 1990; Weston & Mader, 1984).

Der Variationsbereich von 281-391Hz (Median \pm 1 STD) der mittleren Grundfrequenz aller Vokalisationen aus der kanonischen Babbelphase liegt auch im Bereich der wenigen in der Literatur zu findenden Werte für Kleinkinder, die allerdings in einer etwas anderen Altersspanne erhoben wurden (340-470 Hz für Kinder im Alter von 1-2 Jahren, Wilson, 1987; 241-322 Hz für Kinder im Alter von 3,8 Jahren, Baken & Orlikoff, 2000). Damit unterscheiden sich die mit der hier verwendeten Methode bestimmten Werte nicht grundlegend von Werten, die mit anderen Verfahren analysiert wurden. Dies ist ebenfalls ein wichtiges Ergebnis im Rahmen der vorgenommenen Methodentestung, da es dafür spricht, dass mit der angewandten Methode valide Testergebnisse erzielt werden können.

Als bisher einzige Referenzwerte speziell für kanonische Babbellaute von Kindern in einer ähnlichen Altersspanne und mit Deutsch als Umgebungssprache lagen die von Pachtner ermittelten Werte vor (Pachtner, 2017). Pachtner untersuchte die mittlere Grundfrequenz in kanonischen Babbellauten bei hörgesunden Kindern im Alter von 7-13 Monaten. Betrachtet man in der vorliegenden Arbeit ausschließlich die Vokalisationskategorie der kanonischen Babbellaute (Kategorie 3), so lag der Mittelwert für die mittlere Grundfrequenz der hörbeeinträchtigten Probanden hier mit 350Hz etwa 50Hz unterhalb des von Pachtner ermittelten Wertes von 402,3Hz für hörgesunde Säuglinge. Sie fand im Gesamtkorpus der kanonischen Babbellaute einen Gruppenmedianwert von 379,5 Hz. Der Median in der vorliegenden Testsignalauswertung für die HI-Kinder lag bei 336Hz (Vokalisationskategorie 1), 341Hz (Kategorie 2) und 349Hz bei den untersuchten kanonischen Babbellauten (Kategorie 3). Damit zeigten die Testsignale der hörbeeinträchtigten Kinder eine um 30Hz geringere mittlere Grundfrequenz (Median) im Vergleich zu den kanonischen Babbellauten hörgesunder Kinder in der Untersuchung von Pachtner. Bei den hier dargestellten Verteilungen und berichteten Mittelwerten gilt allerdings zu beachten, dass aus methodischen Gründen (Vermeidung von Artefakten bei der LPC-Analyse) vor der Analyse eine Selektion der Testsignale vorgenommen wurde. Dabei wurden manuell alle Signale ausgesondert, die keine vermessbaren Resonanzfrequenzverläufe bei einer Grundfrequenz kleiner oder gleich 500Hz enthielten. Die mittleren F_0 -Werte charakterisieren somit nicht das insgesamt geäußerte Frequenzrepertoire, sondern nur das mit der vorliegenden Methode analysierbare

Frequenzrepertoire. Berücksichtigt man diesen Umstand, liegen die ermittelten Grundfrequenzwerte der hier untersuchten, pädaudiologisch sehr gut versorgten Kinder in der gleichen Größenordnung wie die der hörgesunden Kinder.

Der Einzelkindvergleich der Verteilungseigenschaften der mittleren Grundfrequenzwerte der kanonischen Babbellaute der sensorineural hörbeeinträchtigten Probanden, die sich in ihrer Hörhilfenversorgung und dem Ablauf der vorsprachlichen Entwicklung unterscheiden (siehe Kapitel 2.3), zeigt, dass drei der hier untersuchten Probanden (GA, GB, GH) direkt in dem von Pachtner bestimmten Referenzbereich für gesunde Kinder liegen bzw. dass die Verteilungseigenschaften mit diesem sehr gut übereinstimmen. Die Werte des Probanden GD weichen dagegen erheblich vom Referenzbereich der kanonischen Babbellaute bei normaler Hörfähigkeit ab. Sie liegen auch deutlich tiefer als die entsprechenden Werte der drei anderen hier untersuchten Probanden (siehe Abbildung 25). Dies mag dadurch bedingt sein, dass das Gesamtkorpus der Vokalisationen von Proband GD neben „Brumm- und Summlauten“ zu einem großen Anteil aus sehr hochfrequenten Lauten bestand, die aufgrund der methodischen Beschränkung (Zielfrequenz <500Hz) vor der Analyse aussortiert werden mussten. Die übriggebliebenen Laute lagen damit ausschließlich in einem deutlich tieferen Frequenzbereich. Dieser Befund ist also insgesamt eher als probandenspezifisch zu beurteilen.

Die Verteilungsmuster der mittleren Grundfrequenz F_{0_gM} im Gesamtkorpus der von Pachtner analysierten kanonischen Babbellaute stimmen im Bereich zwischen 200 und 500 Hz mit den hier ermittelten Verteilungsmustern in allen 3 Vokalisationskategorien überein. Dabei zeigte sich, dass die Verteilung der mittleren Grundfrequenzwerte über diesen relativ langen Entwicklungsabschnitt, indem sich rasante Veränderungen im Gehirn vollziehen (siehe hierzu Kent, Mitchell & Sancier, 1991; Pulvermüller & Schumann, 1994; Boysson-Bardies, 1999; Kröger, Birkholz, & Neuschaefer-Rube, 2007), sehr stabil bleiben, zumindest was ihren interquartilen Bereich angeht (Interquartilbereich = 25. - 75. Perzentile). Pachtner fand in den von ihr untersuchten kanonischen Babbellauten, dass sich nur 10 % der Laute unterhalb oder oberhalb des Quartils befanden. Das bedeutet, dass die für die PAI-Analyse notwendige Datenselektion (<500Hz) keine grundsätzliche methodische Limitation bei der Anwendung der PAI-Methode mit sich bringt, jedoch bei spezifischen Probanden mit vielen hochfrequenten Lautäußerungen, hier beispielsweise GD, dazu führen kann, dass eine nicht unerhebliche Anzahl der Signale nicht in die Analyse eingehen kann. Der Befund von Pachtner, dass die mittlere Grundfrequenz bei intakten neurophysiologischen Regelmechanismen in einem relativ umschriebenen Bereich stabil

bleibt, stellt jedoch eine Grundvoraussetzung für die potentielle Eignung dieser Kenngrößen im Rahmen diagnostischer Fragestellungen dar. Die Arbeit von Pachtner, die bisher erste systematische Untersuchung kanonischer Babbellaute deutschsprachiger Kinder, stützt die Hypothese der Autorin vorliegender Arbeit, dem Merkmal der mittleren Grundfrequenz bei weiterführenden Untersuchungen akustischer Eigenschaften hörbeeinträchtigter Kinder eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die hier ermittelten Werte unter Berücksichtigung einer Auswahl nur solcher Vokalisationen, bei denen auch ein identifizierbarer Resonanzfrequenzverlauf für R_1 nachweisbar war, belegen, dass die verwendete Methode zuverlässige Werte liefert, die quasi als Nebeneffekt der methodischen Restriktion gleichzeitig eine Variabilitätsverminderung mit sich bringt. Dies ist ein günstiger Umstand für die Verwendung dieser Kenngrößen im Rahmen diagnostischer Fragestellungen. Einschränkend muss jedoch gesagt werden, dass der hier ausgeschlossene Bereich der kanonischen Babbellaute mit $F_0 > 500\text{Hz}$ nicht unberücksichtigt bleiben darf. Pachtner zeigt, dass diese hochfrequenten Babbellaute zum typischen Vokalisationsrepertoire der kanonischen Entwicklungsphase hörgesunder Kinder gehören. Auch HI-Kinder äußern in dieser Phase hochfrequente kanonische Babbellaute, die bei der Artikulationsanalyse mit der PAI-Methode unberücksichtigt bleiben. Dies bedingt zum einen unter Umständen die Ermittlung einer zu tiefen mittleren Grundfrequenz F_0 bei HI-Kindern, die sehr viele solcher hochfrequenten Babbellaute äußern (siehe Proband GD). Zum anderen erlaubt es keine Differenzierung zwischen „normalen“ und „pathologisch-hochfrequenten“ Babbellauten. Bei der Anwendung der PAI-Methode zur Artikulationsdiagnostik sollte diesem Umstand durch Verwendung einer zusätzlichen Analysemethode (z.B. Praat) Rechnung getragen werden.

4.2.2. Diskussion der Analyse der mittleren Resonanzfrequenz R_{1_gM}

Neben der mittleren Grundfrequenz wurde in der vorliegenden Arbeit auch die mittlere tiefste Resonanzfrequenz (R_1) für die drei beschriebenen Vokalisationskategorien untersucht. Der Begriff der Resonanzfrequenz wurde in der vorliegenden Arbeit in gleicher Weise verwendet, wie er von Wermke et al. 2002 / 2005 bei der Entwicklung der hier getesteten Methode eingeführt wurde. Die beiden tiefsten Formant- oder Resonanzfrequenzen charakterisieren in der Erwachsenensprache die verschiedenen Vokale (Pickett, 1999; Sendlmeier & Seebode, 2017). Die Frequenz der Formanten ist dabei unabhängig von der Grundfrequenz und hängt allein von der Form des Vokaltraktes ab (Pickett, 1999).

In der Literatur findet man auch bereits für vorsprachliche Vokalisationen die Angabe von Formantfrequenzen, insbesondere F_1 und F_2 (Alhaidary & Rvachew; Boysson-Bardies, Halle, Sagart, & Durand, 1989; Fosnot, 1997; Levitt & Utman, 1992; Susan Rvachew, Alhaidary, Mattock, & Polka, 2008; Serkhane et al., 2007). Die hier untersuchten Silben entspringen als vorsprachliche Vokalisationen jedoch einem noch im Reifungsprozess befindlichen artikulatorischen System. Dies macht eine phonetische Transkription vorsprachlicher Laute sehr schwierig und gilt in den meisten Fällen als äußerst unzuverlässig (Oller 2000), sodass zur Beschreibung vorsprachlicher Silben Kenngrößen und Messkriterien aus der Phonetik der Erwachsenensprache lediglich vergleichend anwendbar sind. In der vorliegenden Arbeit wurde daher darauf verzichtet, phonetische Termini der Erwachsenensprache zu verwenden. Es wurde dagegen klar beschrieben, aufgrund welcher theoretischen Überlegungen die Vermessungen erfolgten und es wurden dafür die Termini des „vokalischen“ und des „konsonantischen Silbenelementes“ festgelegt, wobei auf entsprechende Korrelate in der Erwachsenensprache hingewiesen wurde.

Wie auch in der Erwachsenensprache, hängt die Frequenz der Resonanzfrequenzen physiologisch vom Resonanzraum des kindlichen Vokaltraktes und der Stimmlage ab. Ziel der vorliegenden Arbeit war es dementsprechend nicht, Resonanzfrequenzwerte speziell für vokalische Silbenelemente innerhalb der kanonischen Babbellaute zu bestimmen – der Fokus wurde hier allein darauf gelegt, die mittlere erste Resonanzfrequenz der gut mit Hörhilfen versorgten, hörbeeinträchtigten Kinder zu ermitteln, und diese mit den in der Literatur vorhandenen Werten zu vergleichen, um die Validität der verwendeten Methode zu überprüfen.

Wie die in Kapitel 3.4.2 dargestellten Ergebnisse zeigen, bewegt sich die mittlere erste Resonanzfrequenz im Gesamtkorpus der kanonischen Babbellaute (Vokalisationskategorie 3)

in einem Bereich zwischen 371 und 1442Hz (Min-Max, Median 680Hz). Der Mittelwert liegt bei 702Hz. Dieser Bereich stimmt mit dem Frequenzbereich für alle untersuchten Vokalisationen aus der kanonischen Babbelphase, also auch nicht-kanonischer Laute, weitestgehend überein (259-1803Hz = Min-Max, Median 627Hz, Mittelwert 667Hz, Vokalisationskategorie 1). Dies spricht dafür, dass der Verlauf der Frequenz des ersten Formanten F_1 (R_1) hier – wie auch in der Erwachsenensprache – vor allem von der Form und Modifikation des Vokaltraktes abhängt (Reetz, 2003), sodass die Vorauswahl der Daten, bezogen auf den individuellen Probanden, keinen Einfluss auf die Mittelwerte von R_1 hat. Die Ermittlung der mittleren ersten Resonanzfrequenz mit der angewandten Methode stellt damit ein verlässliches Messkriterium für den einzelnen Probanden dar.

Vergleicht man die hier berechneten Mittelwerte mit den in der Literatur vorhandenen Werten, die ebenfalls mittels LPC-Analyse errechnet wurden (siehe Referenzbereiche in Abbildung 26), so zeigt sich, dass der Mittelwert für die mittlere erste Resonanzfrequenz R_{1_gM} aller Laute aus dem Untersuchungszeitraum der hier untersuchten, hörbeeinträchtigten Kinder (667Hz, Vokalisationskategorie 1) deutlich unter den Werten für hörgesunde Kinder ähnlichen Alters liegt (S. Rvachew et al., 1996: Alter 12 Monate / R_1 -Mittelwerte 877-907Hz; Robb et al., 1997: Alter 15 Monate / R_1 -Mittelwert 815Hz). Dies kann darin begründet liegen, dass methodenbedingt eine strenge Reduktion des Datensatzes auf Vokalisationen $<500\text{Hz } F_0$ notwendig war, die schließlich die Lage der mittleren ersten Resonanzfrequenz beeinflussen könnte.

Der hier ermittelte Variationsbereich der mittleren ersten Resonanzfrequenz zwischen 371 und 1442Hz (Min-Max) für kanonische Babbellaute (Vokalisationskategorie 3) stimmt hingegen sehr gut mit den in der Literatur berichteten Variationsbereichen für „Vokale“ in Babbellauten hörgesunder Kinder überein (248-1438Hz für unterschiedliche Vokalkategorien in Babbelvokalisationen in kanadischem Englisch und Französisch / Susan Rvachew et al., 2008; ca. 275-1700Hz für unterschiedliche Vokalkategorien zweier Kinder im Alter von 8-14 Monaten mit englischer und französischer Umgebungssprache / Levitt & Utman, 1992; 400-1600Hz für vokalische Silbenelemente in der Babbelphase von Kindern mit unterschiedlichen Umgebungssprachen / Boysson-Bardies et al., 1989). Ein direkter Vergleich dieser Werte mit der hier ermittelten mittleren Resonanzfrequenz R_1 ist jedoch letztlich nicht möglich, da in die Messung vor allem im Bereich der Minima sogenannte „Pausenelemente“ eingingen, bei denen R_1 im Bereich der Grundfrequenz liegt, sodass es sich hier nicht um vokalisches Tuning handelt. Eine separate Ermittlung von R_1 im Bereich der vokalischen Silbenelemente ist mit der angewandten Methode der Phonations-

Artikulations-Interaktionsanalyse prinzipiell jedoch sehr präzise möglich, sodass die Methode für weiterführende Untersuchungen zur Ermittlung der ersten Resonanzfrequenz im Bereich vokalischer Silbenelemente von Babbelvokalisationen grundsätzlich möglich ist. Die zweite Resonanzfrequenz R_2 erwies sich mit der hier getesteten Methode in allen Signalen trotz vollumfänglich erfüllter, zuvor formulierter und überprüfter Qualitätsanforderungen an die Einzelsignale allerdings als nur schwer darstellbar und quasi nicht vermessbar.

Für eine zukünftige Anwendung zur Untersuchung vokalischer Silbenelemente wäre also eine Modifikation der zugrundeliegenden Algorithmen des Formantanalyseprogramms notwendig, da die zweite Resonanzfrequenz R_2 bzw. der zweite Formant F_2 ein grundlegendes Vokalcharakteristikum darstellt, das bei der Vokalanalyse nicht unberücksichtigt bleiben kann.

4.3. Interpretation der Testergebnisse für die temporalen Kenngrößen

Vokale und Konsonanten im Bereich reifer Erwachsenensprache entstehen durch Artikulationsbewegungen bei geöffnetem bzw. geschlossenem Vokaltrakt (siehe Pickett 1999; Reetz, 2003). Die Übergangsbereiche zwischen den konsonantischen und vokalischen Silbenanteilen (onglide = vom Konsonanten zum Vokal, offglide = vom Vokal zum Konsonanten) entsprechen der benötigten Zeit zur Neupositionierung der Artikulatoren bei der Bildung verschiedener vokalischer und konsonantischer Silbenanteile. Konsonantische Silbenelemente deuten sich durch „Abbiegen“ der Resonanzfrequenz im Bereich des „onglide“ an – für verschiedene Konsonant-Vokal-Kombinationen existieren in der reifen Erwachsenensprache spezifische Muster des Resonanzfrequenzverlaufs (Reetz, 2003).

Der Vermessung solcher vergleichbarer temporaler Kenngrößen in kanonischen Babbelvokalisationen kam in der vorliegenden Arbeit ein besonderer Stellenwert zu. Wie in Kapitel 1.2 der Einleitung beschrieben, wird als *kanonische Babbelsilbe* die Kombination aus einem konsonantischen Randelement (C) mit einem vokalischen Kernelement (V) definiert (kombiniert als C-V oder V-C), auch möglich als repetitive Silbenabfolge (CV-CV- / VC-VC-). Zusätzlich zu diesen phonetischen Kriterien soll eine Babbelsilbe gewisse temporale Kriterien erfüllen: Um vom Hörer als kanonische, „wohlgeformte“ Silbe wahrgenommen zu werden, sollte sich die Dauer des onglide-Prozesses vom konsonantischen Randelement bis zum Vokalnukleus der Silbe laut Oller in einem Zeitintervall von weniger als 120ms bewegen (25-120ms, „rapid formant transitions“, Oller 2000, S.86). Dieses Zeitintervall wurde mit der hier getesteten Methode in Form der Resonanzübergangszeit (RÜ) vermessen und entspricht dem Artikulationsprozess bei der Bildung vokalischer Silbenelemente. Die Schwierigkeit bei der Anwendung dieser Kenngröße besteht darin, dass Oller dieses Kriterium zwar postuliert, systematische Untersuchungen diesbezüglich an kanonischen Babbelsilben jedoch bisher nicht publiziert vorliegen. Alle Autoren verwenden dieses Kriterium, obwohl es bisher keinen Nachweis über die Variabilität dieser Kenngrößen bei kanonischen Babbelsilben gibt. Als zweites temporales Kriterium soll die gesamte Einzelsilbe (CV- oder VC-Kombination) laut Oller eine Dauer von 500ms nicht überschreiten (Oller, 2000). Auch hierfür liegen bisher keine systematischen Untersuchungen vor. Diese beiden Kriterien wurden für das untersuchte Datenkorpus zunächst perzeptiv überprüft. Im Vergleich zu anderen Verfahren hat sich bei der anschließenden Objektivierung dieser Messgrößen mittels des CDAP-Formantanalyseprogramms gezeigt, dass die Interaktionsmechanismen zwischen der

Grundfrequenz und der ersten Resonanzfrequenz hier sehr genau sichtbar gemacht werden können, und dass die PAI-Methode sehr gut geeignet ist, um zeitliche Parameter wie die Resonanzfrequenzübergangszeit, die Dauer des vokalen Nukleus oder des offgliding-Prozesses bei der Vokalproduktion innerhalb kanonischer Silben quantitativ zu erfassen. Dies sind zwei wesentliche Vorteile gegenüber allen bisher auf diesem Gebiet erfolgten Untersuchungen. Zusätzlich zur Resonanzübergangszeit und zur exakten und mittleren Silbendauer wurden für diese Arbeit als weitere temporale Parameter die aktive Vokalartikulationszeit, die Artikulationsgeschwindigkeit und die Dauer der Pausenelemente gewählt, um artikulatorische Vorgänge bei der Bildung von Babbelsilben quantitativ zu charakterisieren. Außerdem wurde das Konsonantrepertoire als wichtiger Parameter zur Bewertung der artikulatorischen Fähigkeiten untersucht.

Nachfolgend werden die Messergebnisse für diese temporalen Parameter noch einmal spezifisch aufgezeigt und diskutiert.

4.3.1. Diskussion der Analyse der Dauer der vokalischen Silbenelemente (aktive Vokalartikulationszeit)

Die Vokalcharakteristika der kanonischen Babbelsilben werden hier durch die Messgröße der aktiven Vokalartikulationszeit AVT (Resonanzübergangszeit RÜ + Vokalnukleus Nuk) untersucht: Hierbei wird zusätzlich zum Kernbereich der vollen Resonanz des Vokals (Nuk) die Resonanzübergangszeit hinzugerechnet. Diese spiegelt die Dauer des onglide-Prozesses (Pickett, 1999) am Übergang von einem konsonantischen zu einem vokalischen Silbenelement wider, in der die Resonanzfrequenz noch vom vorhergehenden konsonantischen Silbenelement beeinflusst wird. Somit wird auch der artikulatorische Prozess bei der Bildung der vokalischen Silbenelemente mit berücksichtigt. Beide Größen, sowohl die Resonanzübergangszeit als auch der Vokalnukleus, lassen sich mit der PAI-Methode sehr gut und zuverlässig ermitteln. Pachtner hat in ihrer Arbeit, die die einzigen Referenzwerte in der Literatur liefert, zur Bestimmung der Vokallängen von kanonischen Silben nur den Vokalnukleus (Nuk) vermessen, da es mit der PRAAT-Routine im Gegensatz zur PAI-Methode oft nicht möglich war, die durch die Koartikulation nach unten oder oben verschobenen Randbereiche von R_1 zu erfassen.

Im Einzelkindvergleich erzielten alle vier Probanden sehr ähnliche Werte, jedoch zeigte sich für GA und GH eine etwas längere mittlere Vokalartikulationszeit als für GB und GD. Dieser Befund zeigt sich ebenfalls für die exakte Silbendauer – GA und GH scheinen somit

im Vergleich zu den beiden anderen Probanden insgesamt längere vokalische Silbenelemente zu bilden. Betrachtet man die Dauer der aktiven Vokalartikulationszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Silben je Vokalisation, so zeigt sich die Tendenz, dass mit zunehmender Silbenanzahl die vokalischen Silbenelemente kürzer werden.

Die mittels PAI-Methode berechneten Werte stimmen, soweit aufgrund der unterschiedlichen Definition der beiden Messgrößen vergleichbar, sehr gut mit den Werten von hörgesunden Säuglingen mit Deutsch als Umgebungssprache überein (Pachtner, 2017): Die von Pachtner berichteten, absoluten Vokallängen in CV-Silben betragen im Mittel 230ms (Jungen 228ms, Mädchen 231ms). Der Medianwert liegt bei 194ms (Jungen 192ms / Mädchen 197ms). Der Mittelwert der hier gemessenen aktiven Vokalartikulationszeit liegt bei 224ms, der Median bei 190ms (Tabelle 12). Es ist erstaunlich, wie ähnlich die Ergebnisse sind. Das kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Zum einen stammen die Testsignale hier von Kindern, die keine Mehrfachschädigung aufweisen (nicht-syndromale Hörbeeinträchtigung) und die keine ZNS-Beeinträchtigung haben, womit sie vergleichbare neurophysiologische Voraussetzungen wie die hörgesunden Kinder aufweisen. Zum anderen waren alle vier Probanden pädaudiologisch optimal eingestellt, sodass auch die Hörleistung mit der von hörgesunden Kindern als vergleichbar angenommen werden konnte. Eine nachfolgende Studie an weiteren Patienten mit Zusatzinformationen über engmaschige Hörtests könnte diese Hypothese prüfen. Somit hat der Anwendungstest hier die Eignung der PAI-Methode auch bezüglich dieser Größen belegt.

4.3.2. Diskussion der Analyse der exakten und der mittleren Babbelsilbendauer

Die Babbelsilbendauer ist ein in der Fachliteratur häufig verwendetes Kriterium zur Unterscheidung zwischen kanonischen und nichtkanonischen Babbelsilben: Nach der Definition von Oller wird für die Dauer kanonischer Babbelsilben eine Obergrenze von 500ms festgelegt (Oller, 2000). In der reifen Erwachsenensprache wird als Range für die Silbendauer der Bereich zwischen 100-500ms angegeben (Pickett, 1999). Zur Bestimmung der Babbelsilbendauer wurden in dieser Arbeit zwei Herangehensweisen gewählt: Die exakte Babbelsilbendauer wurde mittels Vermessung der einzelnen Silbenelemente ermittelt. Dabei wurden die Resonanzübergangszeit, der Vokalnukleus und die Resonanzabgangszeit (RÜ + Nuk + RA) zusammengefasst. Dabei gehen nur Silbenelemente mit aktiver Phonation und Artikulation in die Vermessung ein; Pausenelemente wurden

nicht berücksichtigt. Als zweite Messgröße wurde die mittlere Babbelsilbendauer gewählt, die sich aus der Artikulationsgeschwindigkeit und der exakten Signallängslänge errechnet. Damit gehen auch Pausenelemente in die Berechnung ein.

Für die exakte Babbelsilbendauer zeigten sich bei allen untersuchten Probanden Mittelwerte und Medianwerte, die deutlich unterhalb der von Oller postulierten Grenze von 500ms für kanonische Silben lagen (Gruppenmittelwert 284ms, Gruppenmedian 236ms). Der Befund, dass bei allen untersuchten Kindern auch Silben vorkamen, die eine Dauer von 500ms überschritten, entspricht der im Babbeln zu beobachtenden Variabilität: Es werden häufig kanonische und nichtkanonische Silben innerhalb eines Babbellautes kombiniert – dies ist auch für hörgesunde Kinder typisch (Pachtner, 2017): Erst in der Phase der Wortproduktionen bestehen die kanonischen Babbellaute dann vollständig aus kanonischen Silben. Pachtner diskutiert dies ausführlich in ihrer Arbeit. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erklärt der Befund nur die Verteilungseigenschaft dieser Messgröße. Der Umstand, dass besonders GA und GH einen größeren Anteil an Silben >500ms in ihren Babbellauten äußern, kann damit erklärt, dass bei beiden Kindern besonders langes Tuning im vokalischen Silbenbereich bei gleichzeitig kurzen Resonanzübergangszeiten beobachtet werden konnte, was insgesamt eher für eine gute Artikulation und insgesamt trotz einer Dauer >500ms für eine Kanonizität dieser Silben spricht.

Die mittlere Babbelsilbendauer wurde jeweils rechnerisch für alle Silben eines Signals – auch für solche, die mit der getesteten Methode nicht vermessbar waren – durch die Signallängslänge und die Anzahl der Silben je Signal ermittelt und dann auf die vermessbaren Einzelsilben (N = 335) übertragen. Dies diente der besseren Vergleichbarkeit der beiden Messgrößen für die Silbendauer. Bei der Auswertung der mittleren Babbelsilbendauer zeigte sich, dass selbst nach Berücksichtigung der Pausenelemente zwischen den Silben und Berücksichtigung nicht vermessbarer Silben zur Berechnung der Mittelwerte der größte Teil der untersuchten Silben die von Oller postulierte Obergrenze von 500ms nicht überschritt (siehe Abbildung 33). Insgesamt liegen die Mittelwerte der hier untersuchten mittleren Babbelsilbendauer (Gruppenmittelwert 448ms, Gruppenmedian 386ms) jedoch über den Mittelwerten für die exakte Silbendauer (Gruppenmittelwert 284ms, Gruppenmedian 246ms). Die Unterschiede der Verteilung zwischen den einzelnen Probanden werden in Abbildung 34 deutlich und entsprechen im Wesentlichen den Befunden für die exakte Babbelsilbendauer: Die Probanden GA und GH zeigen auch hier einen größeren Anteil an Silben >500ms als die beiden Probanden GB und GD, wobei der Mittelwert für GA mit 548ms sowohl über der von Oller postulierten Grenze von 500ms als

auch über den Mittelwerten der anderen Probanden liegt. Die Bestimmung der mittleren Babbelsilbendauer liefert also Werte, die mit jenen für die exakte Babbelsilbendauer vergleichbar sind, und stellt somit eine valide Kenngröße dar. Sie bietet jedoch zwei zusätzliche Informationen im Vergleich zur exakten Babbelsilbendauer: Die Dauer der Pausen zwischen den einzelnen Silben, die als Segmentierungselemente ebenfalls wesentlich zum Höreindruck beitragen, wird berücksichtigt, und es können auch Silben bzw. Signale untersucht werden, die aufgrund einer schlechten Signalgüte nicht mittels Formantanalysemethode vermessen werden können. Dies kann insbesondere bei der Untersuchung von Probanden mit schlechter artikulatorischer Entwicklung oder mit einer großen Anzahl von Signalen $>500\text{Hz}$ von Vorteil sein, bei denen Einzelsilben mittels Formantanalysemethode nicht vermessenbar sind.

4.3.3. Diskussion der Analyse der mittleren Anzahl der Babbelsilben pro Sekunde ([Silben/s]) als Maß für die mittlere Artikulationsgeschwindigkeit

Da diese Arbeit sich speziell mit den artikulatorischen Vorgängen in kanonischen Babbelsilben beschäftigt, die besonders bei der Produktion mehrsilbiger Vokalisationen von Bedeutung sind, wurde als weitere, auch in der Literatur beschriebene Messgröße die mittlere Artikulationsgeschwindigkeit eingeführt. Dabei geht es darum, zu erfassen, wie viele sprachliche Einheiten – hier im Sinne von Silben als der kleinsten Einheit reifer menschlicher Sprache – in einem bestimmten Zeitintervall produziert werden können. Die Artikulationsgeschwindigkeit wurde hier aus der Anzahl der bei der Transkriptionsanalyse identifizierten Silben je Einzelvokalisation und der exakten Signalbereichslänge errechnet. Hier sei nochmals erwähnt, dass eine Einzelvokalisation als Lautäußerung während eines vollständigen Expirationsvorganges mit anschließender Inspiration definiert ist (siehe Material und Methoden, Kapitel 2.1). Als Artikulationsrate gilt in der Linguistik die Messgröße dann, wenn keine Pausenelemente bei ihrer Bestimmung berücksichtigt werden (Redford, 2014). Da diese hier mit in die Berechnung eingingen, wurde der Begriff der Artikulationsgeschwindigkeit gewählt. In der Erwachsenensprache beeinflussen eine Reihe von Faktoren die Artikulationsrate bzw.-geschwindigkeit, wie z.B. die Dauer der Äußerung, das Geschlecht des Sprechers oder der Sprecherin und deren Dialekt (Crystal & House, 1990 und Jacewicz, Fox & Wei, 2010 in: Redford, 2014). Bei der hier durchgeführten Untersuchung zeigte sich, dass die gefundene mittlere Artikulationsgeschwindigkeit mit

2,62 Silben/s (Median 2,60 Silben/s) zwischen 2-3 Silben pro Sekunde lag. Bekannte Werte für reife Erwachsenensprache werden mit 2 Silben pro Sekunde bei vorsichtiger, überdeutlicher Aussprache und 5 Silben pro Sekunde in einer schnellen, flüssigen Unterhaltung mit noch deutlicher Aussprache angegeben (Pickett, 1999). Der in dieser Arbeit gefundene Wert kommt damit der Artikulationsgeschwindigkeit reifer Erwachsenensprache schon sehr nahe. Auch im Vergleich zu Referenzwerten hörgesunder Kinder liegen die hier gemessenen Daten in einem ähnlichen Bereich: Der Befund von Walker et al. (Walker, Archibald, Cherniak, & Fish, 1992), dass Kinder im Alter von 3 Jahren vergleichbare Artikulationsgeschwindigkeiten zeigen, wie die hier gemessenen, deutet auf eine hohe prädiktive Valenz dieser Messgröße für die vorsprachliche Diagnostik hin (Median für Kinder im Alter von 3 Jahren: 3,695 Silben/s). Walker et al. fanden in ihrer Studie eine signifikante Zunahme der Artikulationsrate mit zunehmendem Alter der Kinder. Eine neuere Arbeit von Redford (2014) zeigte Artikulationsraten von 3-4,5 Silben/s, allerdings waren die untersuchten Kinder ebenfalls bereits zwischen 5 und 7 Jahre alt. Referenzwerte für Kinder jüngeren Alters, speziell aus der kanonischen Babbelphase, liegen in der Literatur bisher weder für Kinder mit Deutsch als Umgebungssprache noch für andere Umgebungssprachen vor. Es war nicht Ziel dieser Arbeit, zu beurteilen, inwieweit die hier ermittelte Artikulationsgeschwindigkeit repräsentativ für Kinder dieses Alters ist bzw. ob und wie stark sie durch die Hörleistung der Kinder beeinflusst wird. Dennoch wurde zumindest beispielhaft ein erster Referenzwert für diese Größe aus einer laufenden Untersuchung am ZVES an hörgesunden Kindern in die entsprechende Abbildung (Abbildung 35) eingezeichnet. Ein sehr wichtiges Ergebnis in Bezug auf zukünftige Vorhaben im Bereich der vorsprachlichen Diagnostik ist der Befund, dass die Artikulationsgeschwindigkeit in den kanonischen Babbellauten zwischen den vier Probanden relativ wenig variiert, und sich die Medianwerte für die mittlere Artikulationsrate bei allen Probanden im Bereich der Werte bewegen, die auch für die Vergleichssample aus den Lauten hörgesunder Kinder im Alter von 7-13 Monaten ermittelt werden konnten (25. Perzentile: 2,08 Silben/s, 75. Perzentile: 2,92 Silben/s). Proband GA weicht mit seiner etwas geringeren Artikulationsgeschwindigkeit leicht ab (siehe auch Tabelle 15). Dies hängt möglicherweise mit der bei diesem Probanden ebenfalls gefundenen, vergleichsweise langen aktiven Vokalartikulationszeit zusammen. Proband GB weicht mit einer etwas höheren Artikulationsgeschwindigkeit (Medianwert von 3,1 Silben/s) leicht nach oben ab. Der Vorteil der hier durchgeführten Analyse ist die starke Homogenität des Datensatzes. Es wurden Vokalisationen von Kindern in vergleichbarem Entwicklungsalter, hier in der

kanonischen Babbelphase, analysiert. Es wurden zudem vergleichbare Vokalisationen – kanonische Babbellaute – gewählt, um die Artikulationsgeschwindigkeit zu bestimmen. Damit handelt es sich bei der Artikulationsgeschwindigkeit im Falle von pädaudiologisch gut versorgten Kindern dieses Alters offenbar um eine sehr stabile Kenngröße. Diese Stabilität basiert auf vergleichbaren neurophysiologischen Regelmechanismen bei der Zeitororganisation der Produktion kanonischer Babbelsilben (Fagan, 2015). Die sequentiellen schnellen Bewegungen, die das Erzeugen kanonischer Babbellaute bzw. sequentieller Silbenketten erfordert, setzen eine präzise neurophysiologische Kontrolle aller beteiligten Strukturen und Mechanismen voraus. Treten Störungen im Regelsystem auf, so ist gut vorstellbar, dass diese bei schnell ablaufenden Prozessen schwerer kompensierbar sind. Dies wiederum begründet die Eignung der hier untersuchten Kenngröße der Artikulationsgeschwindigkeit für die vorsprachliche Diagnostik. Natürlich sind die Anforderungen an die sprechmotorische Kontrolle bei der Produktion kanonischer Babbellaute noch nicht mit denen zu vergleichen, die beim Sprechen von Wörtern erforderlich sind. Allerdings sind die Artikulationsgeschwindigkeiten sehr ähnlich, wie oben erwähnt, und ein Vorteil der Untersuchung dieser Größe in kanonischen Babbellauten besteht gerade darin, dass externe Einflüsse wie Sprechercharakteristika, Alter des Sprechers / der Sprecherin oder Sprechinhalte minimiert sind, sodass die Variabilität dieser Kenngröße erheblich gemindert wird.

In weiteren Untersuchungen sollte nun getestet werden, ob die Qualität auditiver Rückkopplungsmechanismen, bedingt durch die Hörleistung, die Artikulationsgeschwindigkeit relevant beeinflusst und welche prädiktive Valenz diese Kenngröße für die Sprachentwicklung hat.

4.3.4. Diskussion der Analyse der Resonanzübergangszeit zur Charakterisierung konsonantischer Silbenelemente und zur Definition der Kanonizität

Wie bereits einleitend zur Diskussion erwähnt, spielt die Resonanzübergangszeit $R\ddot{U}$, entsprechend der Formantübergangszeit in der reifen Sprache, eine wichtige Rolle bei der Entscheidung, ob eine Konsonant-Vokal-Abfolge (CV-Silbe) bereits zeitliche Eigenschaften von Silben der entwickelten Erwachsenensprache besitzt, oder noch vorsprachliche Zeiteigenschaften aufweist. Die Resonanzübergangszeit muss nach Oller (2000) unter 120ms liegen, damit eine CV-Silbe als kanonische gewertet werden kann. Dieser Wert erscheint aus den bisher durchgeführten empirischen Beobachtungen auch für Kinder mit

deutscher Muttersprache im kanonischen Babbelalter realistisch. Allerdings gibt es bisher keine systematischen Untersuchungen bezüglich des Variationsbereiches dieser Größe im Sinne von inter-oder intraindividuellen Unterschieden in kanonischen Babbellauten für deutschsprachige Kinder. In der hier vorliegenden Arbeit wurde getestet, ob die Resonanzfrequenzübergangszeit mithilfe der PAI-Methode gut vermessbar ist und wenn ja, inwieweit die auf diese Weise ermittelten Werte mit denen übereinstimmen, die in der Fachliteratur berichtet sind.

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die ermittelten Resonanzfrequenzübergangszeiten mit den in der Literatur angegebenen Werten sehr gut übereinstimmen: So liegt die Mehrzahl der ermittelten Resonanzfrequenzübergangszeiten der CV-Silben der hier untersuchten kanonischen Babbellaute von sensorineural hörbeeinträchtigten Kindern mit einem Mittelwert von 50ms sogar weit unter der von Oller für dieses Entwicklungsalter festgelegten Obergrenze von 120ms (Abbildung 37). Nur vereinzelte Maximalwerte bis 169ms weichen hiervon ab. Der Vergleich des hier ermittelten Variationsbereiches der Resonanzübergangszeit für hörbeeinträchtigte Kinder mit dem eines beispielhaft eingezeichneten Vergleichssamples eines gesunden Kindes aus derselben vorsprachlichen Entwicklungsstufe (Referenzproband GG aus dem Probandenarchiv des ZVES) zeigt ebenfalls, dass die hier ermittelten Werte der hörbeeinträchtigten Kinder mit denen des Vergleichssamples übereinstimmen. So zeigen alle Probanden das von Oller geforderte „Prinzip der schnellen Formantübergänge“ in ihren kanonischen Babbellauten. Damit sind alle vier Probanden in der Lage, „wohlgeformte“ CV-Silben zu bilden. Dass alle Kinder eine sehr gute Entwicklung bezüglich ihrer Artikulationsleistung gezeigt haben (siehe Auswahlkriterien), ist also retrospektiv betrachtet auch bereits an den Eigenschaften ihrer kanonischen Babbelvokalisationen sichtbar.

Die Resonanzübergangszeit bildet, wie bereits erwähnt, als temporale Kenngröße den artikulatorischen Prozess beim Übergang von einem konsonantischen zu einem vokalischen Silbenelement ab. Der Verlauf der Resonanzübergangszeit hängt dabei auch in der Erwachsenensprache von der Art des vorausgehenden konsonantischen Elementes ab (Pickett, 1999). Um dieses Phänomen auch in vorsprachlichen Vokalisationen zu untersuchen und Effekte, die durch Koartikulation entstehen, zu berücksichtigen, wurde die Resonanzübergangszeit in dieser Arbeit nicht nur im Einzelkindvergleich analysiert, sondern auch in Abhängigkeit von den unterschiedlichen konsonantischen Silbenelementen, die in den CV-Kombinationen vorkamen (siehe Abbildung 38). Dabei zeigten sich für die

einzelnen konsonantischen Silbenelemente nur geringe Unterschiede. Je nach Art des konsonantischen Elementes variieren die in den Testsignalen gemessenen Zeiten für RÜ zwischen ca. 40-110ms und die Medianwerte bewegen sich in einem sehr engen Variationsbereich von 41-55ms. Es hat sich auch gezeigt, dass zwischen den Kindern die RÜ-Zeiten für bestimmte konsonantische Elemente relativ wenig variieren. Damit stellt die Resonanzübergangszeit eine sehr stabile Messgröße dar, die nicht durch die Art des vorausgehenden konsonantischen Silbenelementes oder durch interindividuelle Probandenfaktoren beeinflusst zu werden scheint.

Bei der Klassifikation kanonischer Babbelsilben spielen die beiden von Oller postulierten Kriterien – eine maximale Silbendauer von 500ms und ein schneller Formantübergang von 25-120ms – jeweils eine wichtige Rolle. In der Literatur finden sich jedoch keine Angaben zur Gewichtung der beiden Parameter. Trägt man hierzu die beiden Messgrößen für alle untersuchten Silben im Scatterplot gegeneinander auf, so zeigt sich, dass die Mehrzahl der analysierten Silben beide Kriterien erfüllt (siehe Abbildung 39). Nur vereinzelte Silben erfüllen keines der beiden Kriterien, während ein nicht unerheblicher Anteil der Silben zwar einen schnellen Resonanzfrequenzübergang, jedoch eine Silbenlänge von deutlich >500ms aufweist. Die „schnellen Formantübergänge“ scheinen damit ein stabileres Kriterium für die Festlegung der Kanonizität darzustellen als die Obergrenze für die Silbendauer, die wiederum durch langes Vokaltuning beeinflusst werden kann (siehe Kapitel 4.3.1).

4.3.5. Diskussion des Konsonantrepertoires

Die phonetische bzw. orthographische Transkription der einzelnen konsonantischen und vokalischen Silbenelemente wurde durch die Autorin vorliegender Arbeit nach dem internationalen phonetischen Alphabet (IPA) bzw. der deutschen Orthographie vorgenommen. Bei der Betrachtung der konsonantischen Silbenelemente ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich hier noch nicht um reife Sprache handelt. Dies stellt bei der Transkription vorsprachlicher Laute ein allgemein bekanntes, grundsätzliches Problem dar (Oller, 2000). Zur Vergleichbarkeit der Lautäußerungen für die vorliegende Arbeit wurden die perzeptiv erfassten konsonantischen Elemente, auch wenn sie noch nicht vollständig dem Höreindruck eines echten Konsonanten entsprachen, bei der Transkription durch die Untersucherin einem Konsonanten der Zielsprache zugeordnet. Die beobachteten

prozentualen Auftrittshäufigkeiten für konsonantische Elemente aus den verschiedenen Konsonantkategorien (Plosive, Approximanten, Nasale, Frikative, siehe Tabelle 17) ähneln den beobachteten Auftrittshäufigkeiten in der Studie von Pachtner an Babbelsilben hörgesunder Kinder (Pachtner, 2017). Dort zeigte sich die Konsonantenklasse der Plosive ebenfalls prozentual mit 44,1 % am häufigsten vertreten, gefolgt von Nasalen mit 22,5%, Approximanten mit 18,6% und Frikativen mit 9,6% (Sonstige 5,1%). In der vorliegenden Arbeit zeigte sich eine etwas höhere Auftrittshäufigkeit der Plosive (51%) und Approximanten (30%), während die Nasale nur mit 8% vorkamen (Tabelle 17). Für die hier beabsichtigte Methodentestung ist die Übereinstimmung ausreichend.

Der Konsonantengehalt ist in dieser vorsprachlichen Entwicklungsphase neben dem explorativen Vokalisationsverhalten auch von der Hörfähigkeit des Kindes abhängig: Hörbeeinträchtigte Kinder bevorzugen die Wiederholung von Phonemen, die sie einmal sensorisch gut erfasst haben (Fagan, 2015). In den Tabellen 8-11 werden die Arten und Auftrittshäufigkeiten der einzelnen konsonantischen Silbenelemente für die vier Probanden berichtet. Die größte Konsonantenvielfalt in kanonischen Babbelsilben wurde mit 8 verschiedenen konsonantischen Elementen bei den Probanden GB und GH beobachtet. Proband GD zeigte nur 3 verschiedene konsonantische Elemente. Dabei ist zu berücksichtigen, dass GD kaum kanonische Babbelsilben erzeugte, die gut vermessenbar waren, und dass hauptsächlich Silbensequenzen mit ausschließlich vokalischen Anteilen produziert wurden, in denen die Segmentierung durch Unterbrechungen der Phonation und damit Abbruch der Grundfrequenz erreicht wurde. Aufgrund der Tatsache, dass GD zum Zeitpunkt der Implantation bereits älter war, verkürzte sich die kanonische Babbelphase bei ihm und vermischte sich mit der Phase der Produktion erster Protowörter. Dadurch reduziert sich die konsonantische Vielfalt. Eine eingehende Interpretation des Konsonantrepertoires anhand der Testsignale ist hier aufgrund des strengen Datenselektionsprozesses jedoch nicht möglich und war auch nicht Teil der Aufgabenstellung. Es muss jedoch angemerkt werden, dass bei der vorsprachlichen Diagnostik die supraglottale Produktion von Konsonanten ein wichtiges Element darstellt. Sie ist bei hörgesunden Kindern korreliert mit der nachfolgenden Sprech- und Sprachentwicklung – ein eingeschränkter Gebrauch von Konsonanten ist ein Risikomarker für spätere Auffälligkeiten (Stoel-Gammon, 1989). Bei hörbeeinträchtigten Kindern fehlen jedoch bisher zuverlässige Untersuchungen. Hier müssen nachfolgende Untersuchungen zeigen, inwieweit die Hörleistung spezifischen Einfluss auf die die Produktion von Konsonanten und die Koartikulation hat.

4.3.6. Diskussion der Dauer der Pausenelemente

Wie besonders bei Proband GD deutlich wird, bei dem während der Babbelphase kaum konsonantische Elemente zu beobachten waren (siehe 3.1), spielen Pausenelemente in den Vokalisationen zur Segmentierung der einzelnen Babbelsilben ebenfalls eine Rolle. Diese sollten mit der Methode der Phonations-Artikulations-Interaktionsanalyse bezüglich ihrer Zeitdauer näher untersucht werden. In der deskriptiven Statistik liegen weniger Pausenelemente ($N = 246$) als Einzelsilben ($N = 335$) vor, da nach der Endsilbe einer Vokalisation, auf die der Inspirationsvorgang folgt, ein Pausensegment aufgrund der fehlenden Abgrenzbarkeit oft nicht vermessbar war. Andererseits gehen teils Pausenelemente in die Statistik ein, die wiederum zwischen Babbelsilben lagen, welche aufgrund qualitativer Einschränkungen der Signalgüte selbst nicht vermessbar waren. Als weitere Einschränkung muss erwähnt werden, dass die zeitliche Differenz zwischen dem Beginn eines Signals (also „0“ Millisekunden) und dem Einsetzen der Melodie mit der getesteten Methode leider ebenfalls nicht vermessbar war, da das CDAP-Programm zwar auch für stimmlose Signalanteile Formanten berechnet, aber nur bei gleichzeitiger Anwesenheit der Melodie eine Vermessung erlaubt. Diese zeitliche Differenz zwischen dem Signalbeginn und dem Einsetzen der Melodie entsteht durch die zeitliche Differenz zwischen der Verschlussöffnung des Vokaltraktes und dem Einsatz der Phonation – ähnlich der voice onset time bei der Beschreibung artikulatorischer Vorgänge in der Erwachsenensprache (Pickett, 1999), und wird in der vorliegenden Arbeit nicht als segmentierendes Pausenelement gewertet.

Als Segmentierungspausen zählten, gemäß der hier definierten Kriterien zur Klassifikation der unterschiedlichen Elemente eines Babbellautes (siehe Kapitel 3.3 und Abbildung 51), ein Abbruch der Melodie zwischen zwei Babbelsilben, der durch eine Unterbrechung der Phonation entsteht, oder das „Tuning“ der Resonanzfrequenz R_1 im Bereich der Grundfrequenz F_0 (entspricht der ersten Harmonischen H_1).

Für die Dauer von Segmentierungspausen in kanonischen Babbelsilben finden sich in der Literatur bisher keine Referenzwerte, sodass die hier erhobenen Mittelwerte nur für den Einzelkindvergleich zwischen den untersuchten Probanden angewandt werden konnten. Hier zeigt sich, dass die Verteilungseigenschaften der Probanden GA, GB und GH sich kaum unterscheiden, während die Dauer der Pausenelemente bei Proband GD deutlich länger scheint. Allerdings muss hervorgehoben werden, dass für Proband GD aus methodischen und signalanalytischen Gründen nur 5 Pausenelemente vermessen werden konnten.

Vergleicht man die mittlere Dauer der Segmentierungspausen (147ms) mit dem Mittelwert für die exakte Babbelsilbendauer von 284ms, so zeigt sich, dass die Segmentierungspausen im Mittel nur halb so lang waren wie die Dauer der Äußerung der eigentlichen Babbelsilbe. Für zukünftige Untersuchungen könnte dieses Verhältnis von Silben- zu Pausendauer einen interessanten Aspekt darstellen, um Normwerte zur besseren Vergleichbarkeit, insbesondere mit normalhörenden Kindern dieser Entwicklungsstufe, zu erhalten.

4.4. Eignet sich die PAI-Methode zur Evaluation der Artikulationsentwicklung bei sensorineural hörbeeinträchtigten Säuglingen und Kleinkindern?

Sowohl der Zeitpunkt des Beginns der kanonischen Babbelphase als auch die Komplexität der in dieser Phase geäußerten Laute wird in der Literatur als charakteristisches Merkmal bei der Unterscheidung hörgesunder und hörbeeinträchtigter Kinder beschrieben (Oller, et al., 1985; Eilers & Oller, 1994). Obwohl ein nicht altersadäquater auditiver Input bereits vor der kanonischen Babbelphase bestimmte Lauteigenschaften verändert (Möller & Schönweiler, 1999; Shehata-Dieler et al., 2013), sind es vor allen Dingen die fehlenden Silbenrepetitionen im kindlichen Plappern, die Eltern und Betreuern von hörbeeinträchtigten Säuglingen und Kleinkindern auffallen. Lange Zeit war dies der erste Indikator für das Vorliegen einer mittel- bis hochgradigen sensorineuralen Hörstörungen. Bedingt durch die Einführung des Neugeborenenhörscreenings (Shehata-Dieler, et al., 2002; Cebulla & Shehata-Dieler, 2012) werden potentielle Risikokinder heute bereits in der Neonatalzeit identifiziert und im Verlauf der ersten drei Lebensmonate mithilfe von objektiven Untersuchungsmethoden weiter diagnostiziert. Dazu dienen zum Beispiel die Untersuchung otoakustischer Emissionen (TEOAE) oder die Untersuchung akustisch evozierter Potentiale (AABR/BERA), bei denen mithilfe akustischer und elektrischer Potenzialmessungen die Signalweiterleitung über die Hörbahn untersucht und damit die Reife bzw. Funktionsfähigkeit der am Hören beteiligten Mechanismen beurteilt werden kann. Diese frühen Diagnosemöglichkeiten haben dazu geführt, dass es nicht mehr nur ein verspäteter Beginn der Babbelphase ist, der als diagnostisches Kriterium für eine nicht ausreichende auditorische Stimulation verwendet werden kann, sondern dass es vielmehr darauf ankommt, auch frühere vorsprachliche Komfortlaute zu untersuchen, um auf diese Weise Referenzwerte für die nachfolgenden, zielsprachlich geprägten kanonischen Babbellaute zu erhalten, die nach erfolgter Hörhilfenversorgung relativ schnell auftreten. Das Alter der Erstversorgung mit einer Hörhilfe liegt heutzutage aufgrund der früh angewandten pädaudiologischen Diagnoseverfahren erheblich unterhalb des Altersbereichs, in dem diese

noch vor wenigen Jahren erfolgte. Damit besteht als Zielstellung für ein Diagnostikinstrument im vorsprachlichen Alter, dass es objektive Eigenschaften dieser frühen Vokalisationen zu untersuchen in der Lage ist, um Entwicklung und Fortschritt nach einer Hörgeräteversorgung oder CI-Implantation qualitativ und quantitativ beurteilen zu können.

Wie auch Oller feststellt, besteht bei der objektiven Charakterisierung frühkindlicher Vokalisationen die Schwierigkeit, dass sowohl die akustische Herangehensweise mit ihren quantitativen Messparametern wie Frequenz oder Zeitdauer als auch die phonetische, qualitative Herangehensweise der Lauttranskription jeweils wichtige Informationen über die untersuchten Vokalisationen liefern, jedoch auch jeweils Nachteile aufweisen. Akustische Parameter vorsprachlicher Vokalisationen stehen laut Oller nicht zwingend in Verbindung mit akustischen Eigenschaften der späteren Zielsprache, und eine alleinige phonetische Transkription vorsprachlicher Laute analog der Erwachsenensprache ist nicht zulässig, da es sich bei frühkindlichen Lautäußerungen noch nicht um reife Sprache handelt (Oller, 1986). Die vorliegende Arbeit hat demonstriert, dass bei der Anwendung der PAI-Methode zur Analyse kanonischer Babbellaute von Säuglingen mit sensorineuraler Hörbeeinträchtigung beide Ansätze – also sowohl die Vermessung quantitativer akustischer Parameter als auch die Berücksichtigung phonetischer Kriterien wie der konsonantischen und vokalischen Silbenelemente – in ihrer Kombination besonderes geeignet sind, um Rückschlüsse auf den artikulatorischen Entwicklungsstand ziehen zu können.

Es scheinen also nicht nur für die Silbenartikulationsorte der Erwachsenensprache, sondern auch für Babbellaute spezifische, reproduzierbare Muster der Formantübergänge zu existieren, die mit der untersuchten Methode aufgefunden und nachgewiesen werden können. Dass dies für alle untersuchten Probanden gleichermaßen gelang, spricht zum einen für eine sehr gute artikulatorische Entwicklung der Kinder, zum anderen jedoch auch generell für die Anwendbarkeit der PAI-Methode zur Untersuchung artikulatorischer Mechanismen in vorsprachlichen Vokalisationen.

Die Schwierigkeit in der Anwendung der Methode liegt allerdings in der hohen Anfälligkeit für Störgeräusche in den zu untersuchenden Signalen sowie der Limitation, nur für Grundfrequenzbereiche bis 500Hz zuverlässig Formantverläufe berechnen zu können. Dies machte für die vorliegende Arbeit eine sehr strenge Datenreduktion notwendig. Grundsätzlich lassen sich mithilfe der PAI-Methode artikulatorische Vorgänge in den Babbelvokalisationen sensorineural hörbeeinträchtigter Säuglinge jedoch sehr präzise beschreiben und auch quantifizieren, sodass die Methode prinzipiell geeignet scheint, daraus

nach weitergehenden Untersuchungen an größeren Probandengruppen ein frühes Diagnostikinstrument zu entwickeln. Dies gilt im Prinzip auch für die Anwendung der Methode bei hörgesunden Säuglingen / Kleinkindern.

5. Zusammenfassung

Frühzeitig diagnostizierte und behandelte Säuglinge mit schwerer sensorineuraler Hörbeeinträchtigung schneiden bezüglich ihrer Sprech- und Sprachentwicklung besser ab als spät diagnostizierte Kinder. Die Würzburger Universitätsklinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde, plastische und ästhetische Operationen war die erste Einrichtung deutschlandweit, die ein zweistufiges Neugeborenen-Hörscreening klinisch umgesetzt hat. Durch die frühe Identifikation sensorineuraler Hörbeeinträchtigungen bei Säuglingen hat sich auch der Therapiebeginn ins frühe Säuglingsalter verschoben. Dies macht ergänzende objektive Methoden zu gängigen medizinischen Testverfahren zur Evaluation der vokalen Entwicklung in Abhängigkeit von der Adjustierung der Hörhilfen erforderlich.

Bisher erfolgt die Evaluation des individuellen Benefits von getragenen Hörhilfen bzw. ihrer optimalen Einstellung bei Säuglingen und jüngeren Kleinkindern hauptsächlich durch verhaltensbeobachtende Methoden.

Kooperationsprojekte zwischen der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde, plastische und ästhetische Operationen und dem Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg haben das Ziel, die sprachentwicklungsrelevanten Schritte im ersten Lebensjahr in Abhängigkeit von der individuellen Hörleistung zu charakterisieren. Die vorliegende Arbeit ist in diese Projekte eingebettet.

Die retrospektiv angelegte Pilotstudie hatte das Ziel, die kanonische Babbelphase von vier vergleichbaren Säuglingen mit hochgradiger sensorineuraler Hörbeeinträchtigung mithilfe einer Methode zu untersuchen, die für hörgesunde Kinder entwickelt und bisher nur an Kindern mit orofazialer Spaltbildung getestet wurde. Es ging darum, geeignete Testsignale dieser Probanden in Form von kanonischen Babbellauten aus einem Repertoire von etwa 20000 Vokalisationen messtechnisch zu selektionieren und diese Signale dann mit der zu testenden Phonations-Interaktions-Analysemethode (PAI-Methode) zu analysieren. Dazu wurden in der finalen Messung 335 kanonische Babbelsilben ausgewertet. Es mussten geeignete Messgrößen erarbeitet und getestet werden sowie die Analyseergebnisse auf ihre Validität geprüft werden. Es wurden dabei sowohl frequenzbasierte als auch zeitliche Messgrößen analysiert. Alle Messergebnisse sind ausführlich dargestellt und die erarbeiteten methodischen Modifikationen bei der Anwendung der PAI-Methode auf kanonische Babbellaute begründet.

Im Ergebnis der durchgeführten Analysen und Tests hat sich gezeigt, dass die PAI-Methode geeignet ist, um den Stand der Artikulationsentwicklung im Altersbereich der kanonischen Babbelphase zu evaluieren. Das gilt sowohl für die mit HDO-Hörgeräten versorgten Probanden als auch für die CI-Träger.

Die Testsignale, die hier verwendet wurden, stammen von Probanden, die eine sehr gute Sprech- und Sprachentwicklung gezeigt haben. Die retrospektive Auswertung lieferte bereits für das Babelalter Messergebnisse, die Werte im Bereich der in der Literatur angegebenen Referenzbereiche für hörgesunde Kinder erbrachten. Damit hat die vorliegende Arbeit nicht nur die prinzipielle Eignung der PAI-Methode für die quantitative Charakterisierung der kanonischen Babbellaute demonstriert, sondern gleichzeitig belegt, dass pädaudiologisch gut versorgte Kinder bereits vor dem eigentlichen Sprachbeginn Artikulationsleistungen zeigen, die jenen hörgesunder Kinder im Verlauf ihrer Entwicklung entsprechen.

Methodische Einschränkungen fanden sich im Bereich des untersuchbaren Frequenzrepertoires und der hohen Störanfälligkeit für Hintergrundgeräusche. Die Möglichkeit einer diesbezüglichen Modifikation der Methode wäre zu prüfen.

Diese Ergebnisse erlauben es nun in einem nächsten Schritt, einen systematischen Vergleich der Messgrößen zwischen hörgesunden und sensorineural hörbeeinträchtigten Kindern unter Einschluss der Hörtestergebnisse mithilfe der PAI-Methode vorzunehmen. Die kanonischen Babbellaute sind dazu besonders geeignet, da sie gute Artikulationsleistungen erfordern und sowohl bezüglich der zeitlichen Eigenschaften als auch des Konsonantrepertoires eine bekannte prädiktive Valenz für das nachfolgende Sprach- und Sprechoutcome haben. Dazu scheinen besonders die hier analysierte Artikulationsgeschwindigkeit und weitere zeitliche Größen (Resonanzfrequenzübergangszeit, aktive Vokalartikulationszeit, exakte und mittlere Silbendauer) geeignet. Für weitergehende Untersuchungen und spezifische Vergleiche ist es jedoch zunächst erforderlich, für alle anderen hier untersuchten Kenngrößen kanonischer Babbellaute weitere systematische Untersuchungen an vergleichbar homogenen Datensätzen von sowohl hörgesunden als auch hörbeeinträchtigten Kindern vorzunehmen.

6. Literaturverzeichnis

- Alhaidary, A., & Rvachew, S. Babbling and Ambient Language Input: Crosslinguistic Comparison of Corner Vowels of 10-18 Month-old French and Arabic Infants. Download am 21.03.2017: <https://pdfs.semanticscholar.org/8fbc/21a6e696b4069d80cee8449256b599b480c4.pdf>
- Baken, R., & Orlikoff, R. (Hrsg.). (2000). *Clinical Measurement of Speech and Voice* (2. Auflage). San Diego, California: Singular Publishing Group.
- Berger, R., Goeze, A., Müller-Mazzotta, J., Hanschmann, H., Kadaifciu, B., & Eroglu, E. (2012). Frühzeitige Diagnose kindlicher Hörstörung durch Einführung des Neugeborenen Hörscreenings (UNHS). *Laryngo-Rhino-Otol*, 91(10), 637-640.
- Boysson-Bardies, B. d. (1999). *How language comes to children: From birth to two years. A Bradford book*. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Boysson-Bardies, B. d., Halle, P., Sagart, L., & Durand, C. (1989). A crosslinguistic investigation of vowel formants in babbling. *Journal of Child Language*, 16(1), 1-17.
- Bredel, U. (2007). *Sprachbetrachtung und Grammatikunterricht* (1. Auflage). Paderborn: Schöningh.
- 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.
- 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.
- Chomsky, N. (1959). A Review of B. F. Skinner's Verbal Behavior. *Language*, 35, 33.
- Clement, C. J. (2004). Development of vocalizations in deaf and normally hearing infants. Netherlands Graduate School of Linguistics Publications.
- 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
- Crystal, T. H., & House, A. S. (1990). Articulation rate and the duration of syllables and stress groups in connected speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(1), 101-112.
- Dahnken, C. (Hg.). (2006). *Der Spracherwerb des Kleinkindes als aktive Anpassung an seine pädagogische Umgebung* (Vol. 5). Berlin: Logos Verlag.
- Davis, B. L., & MacNeilage, P. F. (1995). The Articulatory Basis of Babbling. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 38(6), 1199-1211.

- Davis, B. L., MacNeilage, P. F., & Matyear, C. L. (2002). Acquisition of Serial Complexity in Speech Production: A Comparison of Phonetic and Phonological Approaches to First Word Production. *Phonetica*, 59(2-3), 75-107.
- Davis, B. L., & McNeilage, P. F. (2004). The frame/content theory of speech evolution: from lip smacks to syllables. *Primateology*, 6, 305-328.
- Eggermont, J. J., & Moore, J. K. (2012). Morphology and Functional Development of the Auditory Nervous System. In L. Werner, R. R. Fay & A. N. Popper (Eds.), *Human Auditory Development* (S. 61-105). New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer.
- Eilers, R. E., & Oller, D. K. (1994). Infant vocalizations and the early diagnosis of severe hearing impairment. *J Pediatr*, 124(2), 199-203.
- Fagan, M. K. (2009). Mean Length of Utterance before words and grammar: Longitudinal trends and developmental implications of infant vocalizations. *Journal of Child Language*, 36(3), 495-527.
- Fagan, M. K. (2015). Why repetition? Repetitive babbling, auditory feedback, and cochlear implantation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 137, 125-136.
- Finckh-Krämer, U., Spormann-Lagodzinski, M., Nubel, K., Hess, M., & Gross, M. (1998). Wird die Diagnose bei persistierenden kindlichen Hörstörungen immer noch zu spät gestellt? *HNO*, 46(6), 598-602.
- Fosnot, S. M. (1997). *Vowel development of /i/ and /u/ in 15-36 month old children at risk and not at risk to stutter*. Paper presented at the Eurospeech, Rhodes, Griechenland.
- Gerhardt, K. J., Huang, X., Arrington, K. E., Meixner, K., Abrams, R. M., & Antonelli, P. J. (1996). Fetal sheep in utero hear through bone conduction. *American Journal of Otolaryngology*, 17(6), 374-379.
- Giesbrecht, N. (2002). Creaky voice in a pre-babbling infant.
Download am 10.08.2011 von:
http://web.uvic.ca/ling/assets/documents/nathan_giesbrecht.pdf
- Giulivi, S., Whalen, D. H., Goldstein, L. M., Nam, H., & Levitt, A. G. (2011). An Articulatory Phonology Account of Preferred Consonant-Vowel Combinations. *Language learning and development : the official journal of the Society for Language Development*, 7(3), 202-225.
- Grimm, H. (2003). *Störungen der Sprachentwicklung* (2. ed.). Göttingen: Hogrefe-Verlag.
- Grimm, H. (2008). Sprachentwicklung. In R. Oerter & L. Montada (Hrsg.), *Entwicklungspsychologie* (6. Auflage). Weinheim, Basel: Beltz Verlag, Psychologie Verlags Union.

- Hehar, S. S., Nikolopoulos, T. P., Gibbin, K. P., & O'Donoghue, G. M. (2002). Surgery and functional outcomes in deaf children receiving cochlear implants before age 2 years. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*, *128*(1), 11-14.
- 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.
- Jacewicz, E., Fox, R. A., & Wei, L. (2010). Between-speaker and within-speaker variation in speech tempo of American English. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *128*(2), 839-850.
- Jusczyk, P. W., & Bertoncini, J. (1988). Viewing the Development of Speech Perception as an innately guided Learning Process. *Language and Speech*, *31*(3).
- Jusczyk, P. W., Bertoncini, J., Bijeljac-Babic, R., Kennedy, L. J., & Mehler, J. (1990). The role of attention in speech perception by young infants. *Cognitive Development*, *5*, 265-286.
- Karelitz, S., & Fisichelli, V. R. (1962). The cry thresholds of normal infants and those with brain damage. *The Journal of Pediatrics*, *61*(5), 679-685.
- Kempf, A. (2008). *Untersuchung des Beginns artikulatorischer Vorgänge in den Lautproduktionen von Säuglingen mit orofazialen Spalten*. Dissertations, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Kent, R. D., Mitchell, P. R., & Sancier, M. (1991). Evidence and role of rhythmic organization in early vocal development in human infants. In J. Fagard & P. H. Wolff (Eds.), *The Development of Timing Control and Temporal Organization in Coordinated Action* (1. Auflage, Band 81, S. 135-149). Amsterdam, The Netherlands; New York, USA: North Holland, Elsevier Science Publishers; United States and Canada: Elsevier Science Publishing Company.
- 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.
- 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?* Amsterdam: Institute of Phonetic Sciences, University of Amsterdam, The Netherlands.
- Kröger, B. J., Birkholz, P., & Neuschaefer-Rube, C. (2007). Ein neuronales Modell zur sensomotorischen Entwicklung des Sprechens. *Laryngo-Rhino-Otol*, *86*(05), 365-370.
- Kuhl, P. K. (2000). A new view of language acquisition. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *97*(22), 11850-11857.
- Levitt, A. G., & Utman, J. G. (1992). From babbling towards the sound systems of English and French: a longitudinal two-case study. *Journal of Child Language*, *19*(1), 19-49.

- Mampe, B., Friederici, A. D., Christophe, A., & Wermke, K. (2009). Newborns' cry melody is shaped by their native language. *Curr Biol*, *19*(23), 1994-1997.
- Markel, J. E., & Gray, A. H. (1982). *Linear Prediction of Speech*. New York: Springer.
- Matulat, P., Fabian, S., Köhn, A., Spormann-Lagodziski, M., Lang-Roth, R., Reißmann, A., et al. (2014). Ergebnisqualität im universellen Neugeborenen-Hörscreening. *HNO*, *62*(3), 171-179.
- Mende, W., Wermke, K., Schindler, S., Wilzopolski, K., & Hock, S. (1990). Variability of the cry melody and the melody spectrum as indicators for certain CNS disorders. *Early Child Development and Care*, *65*(1), 95-107.
- Moeller, M. P., Hoover, B., Putman, C., Arbataitis, K., Bohnenkamp, G., Peterson, B., et al. (2007). Vocalizations of Infants with Hearing Loss Compared with Infants with Normal Hearing: Part I – Phonetic Development. *Ear and Hearing*, *28*(5), 605-627.
- Möller, S., & Schönweiler, R. (1999). Analysis of infant cries for the early detection of hearing impairment. *Speech Communication*, *28*, 175-193.
- Moore, J. K., & Linthicum, F. H. (2007). The human auditory system: A timeline of development. [doi: 10.1080/14992020701383019]. *International Journal of Audiology*, *46*(9), 460-478.
- Nam, H., Goldstein, L. M., Giulivi, S., Levitt, A. G., & Whalen, D. H. (2013). Computational simulation of CV combination preferences in babbling. *Journal of phonetics*, *41*(2), 63-77.
- Nathani, S., Oller, D. K., & Neal, A. R. (2007). On the Robustness of Vocal Development: An Examination of Infants With Moderate-to-Severe Hearing Loss and Additional Risk Factors. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *50*(6), 1425-1444.
- Oller, D. K. (2000). *The Emergence of the Speech Capacity*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Oller, D. K. (Hg.). (1986). *Precursors of early speech, Chapter 3: Metaphonology and Infant Vocalizations* (Vol. 44). Stockholm: Stockton Press.
- Oller, D. K., Buder, E. H., Ramsdell, H. L., Warlaumont, A. S., Chorna, L., & Bakeman, R. (2013). Functional flexibility of infant vocalization and the emergence of language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(16), 6318-6323.
- 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, Language, and Hearing Research*, *28*(1), 47-63.

- Oller, D. K., Eilers, R. E., Neal, A. R., & Cobo-Lewis, A. B. (1998). Late Onset Canonical Babbling: A Possible Early Marker of Abnormal Development. *American Journal on Mental Retardation*, 103(3), 249-263.
- Pachtner, S. (2017). *Eigenschaften kanonischer Babbellaute gesunder Kinder mit deutscher Umgebungssprache – ein Beitrag zur Identifizierung frühdiagnostischer Parameter*. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Papoušek, M. (1998). *Vom ersten Schrei zum ersten Wort - Anfänge der Sprachentwicklung in der vorsprachlichen Kommunikation* (1. Aufl., 2. Nachdr.). Bern: Huber.
- Perani, D., Saccuman, M. C., Scifo, P., Spada, D., Andreolli, G., Rovelli, R., et al. (2010). Functional specializations for music processing in the human newborn brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(10), 4758-4763.
- Pickett, J. M. (Ed.). (1999). *The Acoustics of Speech Communication: Fundamentals, Speech perception theory, and Technology*. Needham Heights, MA: Allyn and Bacon.
- Pulvermüller, F., & Schumann, J. H. (1994). Neurobiological Mechanisms of Language Acquisition. *Language Learning*, 44(4), 681-734.
- Redford, M. A. (2014). The perceived clarity of children's speech varies as a function of their default articulation rate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(5), 2952-2963.
- Reetz, H. (2003). *Artikulatorische und akustische Phonetik*. Trier: Wissenschaftlicher Verlag Trier.
- Robb, M. P., Chen, Y., & Gilbert, H. R. (1997). Developmental aspects of formant frequency and bandwidth in infants and toddlers. *Folia Phoniatria et Logopaedica*, 49(2), 88-95.
- Röber, C. (2009). *Die Leistung der Kinder beim Lesen- und Schreibenlernen: Grundlagen der silbenanalytischen Methode. Ein Arbeitsbuch mit Übungsaufgaben*. Hohengehren: Schneider.
- 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., Slawinski, E., & Williams, M. (1996). Formant Frequencies of Vowels Produced by Infants with and without Early Onset Otitis Media. *Canadian Acoustics / Acoustique Canadienne*, 24(2), 19-28.
- Schade, G. (2008). Early detection of hearing loss. *GMS Current Topics in Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery*, 7, Doc05.
- Schauwers, K., Gillis, S., Daemers, K., De Beukelaer, C., & Govaerts, P. J. (2004). Cochlear implantation between 5 and 20 months of age: the onset of babbling and the audiologic outcome. *Otol Neurotol*, 25(3), 263-270.

- Schauwers, K., Gillis, S., & Govaerts, P. J. (2008). The characteristics of prelexical babbling after cochlear implantation between 5 and 20 months of age. *Ear Hear*, 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 Phoniatica et Logopaedica*, 56(1), 27-40.
- Sendlmeier, W. F., & Seebode, J. (2017). Formantkarten des Deutschen. Retrieved 17.03.2017, 2017
- Serkhane, J. E., Schwartz, J. L., Boë, L. J., Davis, B. L., & Matyear, C. L. (2007). Infants' vocalizations analyzed with an articulatory model: A preliminary report. *Journal of phonetics*, 35(3), 321-340.
- Shehata-Dieler, W., Cebulla, M., Keim, R., Baumbusch, K., Völter, C., Hagen, R., et al. (2008, 12.09. - 14.09.2008). *Zehn Jahre NHS mit dem BERAphon®*. Paper presented at the 25. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie e. V., Düsseldorf.
- Shehata-Dieler, W., Ehrmann-Mueller, D., Wermke, P., Voit, V., Cebulla, M., & Wermke, K. (2013). Pre-speech diagnosis in hearing-impaired infants: How auditory experience affects early vocal development. *Speech, Language and Hearing*, 16 (2), 99-106.
- Shehata-Dieler, W. E., Dieler, R. W., G., Keim, R. S., 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.
- Singleton, D., & Ryan, L. (2004). *Language Acquisition - the age factor* (2 ed.). Clevedon: Multilingual Matters.
- Skinner, B. F. (1957). *Verbal Behavior*. Acton: Copley Publishing Group.
- Starr, A., Amlie, R. N., Martin, W. H., & Sanders, S. (1977). Development of Auditory Function in Newborn Infants Revealed by Auditory Brainstem Potentials. *Pediatrics*, 60(6), 831-839.
- Stoel-Gammon, C. (1988). Prelinguistic vocalizations of hearing-impaired and normally hearing subjects: a comparison of consonantal inventories. *J Speech Hear Disord*, 53(3), 302-315.
- Stoel-Gammon, C. (1989). Prespeech and early speech development of two late talkers. *First Language*, 9(6), 207-223.
- Stoel-Gammon, C. (1994). Measuring phonology in babble and speech. *Clinics in communication disorders*, 4(1), 1-11.

- Stoel-Gammon, C., & Menn, L. (1997). Phonological development: learning sounds and sound patterns. In B. G. J. (Ed.), *The development of language*. (pp. 69-121). Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Stoel-Gammon, C., & Otomo, K. (1986). Babbling development of hearing-impaired and normally hearing subjects. *J Speech Hear Disord*, 51(1), 33-41.
- Streppel, M., Walger, M., von Wedel, H., & Gaber, E. (2006). *Hörstörungen und Tinnitus*. Download am 08.01.2017 von: http://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsT/tinnitus.pdf?__blob=publicationFile.
- Szagan, G. (2001). Language acquisition in young German-speaking children with cochlear implants: individual differences and implications for conceptions of a 'sensitive phase'. *Audiol Neurootol*, 6(5), 288-297.
- Ullal-Gupta, S., Vanden Bosch der Nederlanden, C. M., Tichko, P., Lahav, A., & Hannon, E. E. (2013). Linking prenatal experience to the emerging musical mind. *Front Syst Neurosci*, 7, 48.
- Várallyay Jr., G. (2004). Infant cry analyzer system for hearing disorder detection. *Periodica Politechnica TU Timisoara, Romania: Transactions on Automatic Control and Computer Science*, 49(63).
- Várallyay Jr., G., Benyó, Z., & Illényi, A. (2007). *The Development of the melody of the infant cry to detect disorders during infancy*. Paper presented at the Fifth IASTED International Conference on Biomedical Engineering, Innsbruck.
- Várallyay Jr., G., Illényi, A., Benyó, Z., Farkas, Z., & Katona, G. (2005). *An attempt to detect hearing disorders by acoustic features of the infant cry*. Paper presented at the Forum Acusticum, Budapest.
- Vihmann, M. M. (1996). *Phonological development: the origins of language in the child*. Cambridge, Massachusetts: Blackwell Publishers Inc.
- von Spiegel zum Diesenberg-Hanxleden, A. (2009). *Spektrographische Analyse der Vokalisierungen hochgradig hörgeschädigter Kinder im Zeitraum vor, während und nach Cochlea-Implantation*. Unpublished Medical dissertation, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg.
- Vorperian, H. K., Wang, S., Chung, M. K., Schimek, E. M., Durtschi, R. B., Kent, R. D., et al. (2009). Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: an imaging study. *J Acoust Soc Am*, 125(3), 1666-1678.
- Walker, J. F., Archibald, L. M. D., Cherniak, S. R., & Fish, V. G. (1992). Articulation Rate in 3- and 5-Year-Old Children. [doi: 10.1044/jshr.3501.04]. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 35(1), 4-13.
- Wermke, K., & Mende, W. (2011). From emotion to notion. The importance of melody. In J. Decety & J. Cacioppo (Eds.), *Handbook of Social Neuroscience* (pp. 624-648). Oxford: 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. Models and analysis of vocal emissions for biomedical applications 4th international workshop: october 29-31.2005. *Firenze university press. Atti, 21*.
- Wermke, K., Mende, W., Manfredi, C., & Brusciaglioni, P. (2002). Developmental aspects of infant's cry melody and formants. *Med Eng Phys, 24*(7-8), 501-514.
- Wermke, K., Pachtner, S., Lamm, B., Voit, V., Hain, J., Kärtner, J. , Keller, H. (2013). Acoustic properties of comfort sounds of 3-month-old Cameroonian (Nso) and German infants. *Speech, Language and Hearing, 16*(3), 149-162.
- Weston, A. J., & Mader, N. T. (1984). Infants' Vocalizations as a Diagnostic Tool. *Perceptual and Motor Skills, 58*(3), 787-796.
- Wilson, K. D. (1987). *Voice Problems of Children* (3 ed.). Philadelphia: Williams & Wilkins.
- Yoshinaga-Itano, C., Sedey, A. L., Coulter, D. K., & Mehl, A. L. (1998). Language of Early- and Later-identified Children With Hearing Loss. *Pediatrics, 102*(5), 1161-1171.

Danksagung

Ich danke Frau Prof. Dr. Stellzig-Eisenhauer, Direktorin der Poliklinik für Kieferorthopädie, für die Möglichkeit, am Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES) diese Arbeit durchführen zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Kathleen Wermke, Leiterin des ZVES: Für das zur Verfügung stellen des spannenden Themas, vor allem aber für die exzellente wissenschaftliche Betreuung, für die Ansprechbarkeit in allen Fragen und ungezählte Stunden ihrer Zeit bei der Betreuung dieser Arbeit.

Frau Prof. Dr. Shehata-Dieler danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens zu dieser Arbeit.

Herrn Peter Wermke danke ich für die wertvolle Unterstützung bei allen Fragen zur Datenverarbeitung von der Extraktion der Rohdaten über die Weiterbearbeitung mit Excel bis hin zur statistischen Auswertung mit SPSS.

Den MitarbeiterInnen des ZVES danke ich für die gute Zusammenarbeit, besonders Sandra Pachtner für das zur Verfügung stellen von Vergleichsdaten für Babbellaute von hörgesunden Kindern aus ihrer Arbeit, und Annette Prochnow, Verena Voit, Daniela Eiband und Regina Weigl für Ihre Unterstützung bei der Einarbeitung in die verwendeten Analyseprogramme und in die Lauttranskription.

Den Eltern der Probanden danke ich für das Erstellen der Lautaufnahmen und ihr großzügiges Einverständnis, diese für wissenschaftliche Zwecke verwenden zu dürfen.