

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

**Vergleichende Untersuchung rhythmischer Eigenschaften von
Komfortvokalisationen gesunder und hochgradig hörbeeinträchtigter
Säuglinge im Alter von zwei bis fünf Monaten**

Inauguraldissertation

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

vorgelegt von
Elena Rachor
aus Aschaffenburg

Würzburg, Mai 2022



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

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

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung:

01.12.2022

Die Promovendin ist Ärztin.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Material und Methoden | 11 |
| 2.1 | Ethik- und Tierversuchsvotum | 11 |
| 2.2 | Einbettung der Arbeit in das Gesamtprojekt | 11 |
| 2.3 | Probandenkollektiv..... | 15 |
| 2.3.1 | Kontrollgruppe (KG)..... | 16 |
| 2.3.2 | Patientengruppe (PG)..... | 17 |
| 2.4 | Datenerhebung | 18 |
| 2.5 | Auswahl der Vokalisationen | 20 |
| 2.6 | Datenaufbereitung | 21 |
| 2.6.1 | Manuelle Segmentierung der Rohdaten | 21 |
| 2.6.2 | Einteilung einer Lautaufnahme in zeitliche Abschnitte | 22 |
| 2.6.2.1 | Allgemeine Gliederung einer Lautaufnahme | 22 |
| 2.6.2.2 | Erläuterungen der einzelnen Arbeitsschritte | 23 |
| 2.7 | Datenauswertung..... | 29 |
| 2.7.1 | Datenbasis | 29 |
| 2.7.2 | Beschreibung der untersuchten Messgrößen..... | 31 |
| 2.7.3 | Reliabilität..... | 32 |
| 2.7.4 | Statistische Analyse | 33 |
| 3 | Ergebnisse..... | 37 |
| 3.1 | Analyse der Phrasenlängen (tP) | 37 |
| 3.2 | Analyse der Länge der E-Vokalisationen (tE) | 40 |
| 3.3 | Analyse der Zwischenpausenlängen (tZP)..... | 46 |
| 3.4 | Analyse der Inter-Onset-Intervalle..... | 53 |
| 3.4.1 | Analyse der Länge der Inter-Onset-Intervalle (tIOI) | 53 |
| 3.4.2 | Analyse der Varianz der Inter-Onset-Intervalle pro Proband (Varianz_IOI)..... | 59 |
| 3.4.3 | Analyse des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI) und des mittleren nPVI pro Proband..... | 60 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Diskussion | 65 |
| 4.1 | Ergeben sich Unterschiede in den Vokalisationslängen der Komfortlaute zwischen hörgeschädigten und hörgesunden Säuglingen?..... | 66 |
| 4.2 | Hat eine hochgradige Hörbeeinträchtigung einen Einfluss auf die Zwischenpausenlänge zwischen zwei Komfortlauten? | 71 |
| 4.3 | Ergeben sich Unterschiede bezüglich der Varianz der Inter-Onset-Intervalle zwischen den Probanden einer Gruppe (Varianz_IOI)?..... | 73 |
| 4.4 | Hat eine hochgradige Hörbeeinträchtigung einen Einfluss auf den nPVI?.. | 74 |
| 4.5 | War das Intervall von sieben Sekunden gerechtfertigt?..... | 74 |
| 4.6 | Mögliche Limitationen..... | 75 |
| 4.7 | Vorschläge für weitere Analysen im Rahmen der Kohortenstudie..... | 76 |
| 5 | Zusammenfassung | 78 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 80 |

Appendix

- I. Abkürzungsverzeichnis**
- II. Abbildungsverzeichnis**
- III. Tabellenverzeichnis**
- IV. Anhang**
- V. Lebenslauf**
- VI. Danksagung**

1 Einleitung

Die Sprachentwicklung eines Kindes beginnt schon lange vor dem ersten gesprochenen Wort: Bereits intrauterin nehmen Föten den Klang der mütterlichen Stimme wahr (DeCasper et al., 1994). Eigene produktive Leistungen finden kurze Zeit später statt, indem das Neugeborene mit dem ersten Schrei ein deutliches Lebenszeichen von sich gibt. Schnell wird der Säugling in den folgenden Wochen und Monaten seine kommunikativen Fähigkeiten erweitern, über das Gurren hin zum kanonischen Babbeln bis zu den ersten Worten.

Die Sprachentwicklung in den ersten zwei Lebensjahren lässt sich anhand von universellen, altersabhängigen Entwicklungsstadien beschreiben (Ferguson et al., 1992; Kent, 1992; Oller, 2000; Oller et al., 1992). Es gibt allerdings starke Überschneidungen zwischen den Stadien, da ein bereits erlerntes Element, wie beispielsweise das Erzeugen erster Laute mit artikulatorischen Elementen (Gurren), in allen später auftretenden Phasen ebenfalls vorkommen kann. Die Stadien, die durch ihr robustes Auftreten gekennzeichnet sind, werden bei Kindern unterschiedlicher Sprachumgebungen in ähnlicher Weise beobachtet und gelten somit als universell (Nathani et al., 2007).

Diese frühe Sprachentwicklung kann nur durch wenige Einflussfaktoren beeinträchtigt werden. Neben dem Vorliegen von Frühgeburtlichkeit, zerebralen oder kardiopulmonalen Erkrankungen sowie bestimmter medizinischer Syndrome (darunter Trisomie 21), ist der wohl wichtigste Einflussfaktor ein funktionierendes Hörsystem, das dem Säugling eine auditive Rückkopplung seiner erzeugten Lautierungen gewährleistet (Barre et al., 2011; Berger et al., 1983; Hawa et al., 2014; Moura et al., 2008; Nazzi et al., 2015; O'Hare et al., 2016; Otapowicz et al., 2005; Reiter et al., 2012; van Noort-van der Spek et al., 2012; Vohr, 2014).

Dennoch wird in der wissenschaftlichen Fachliteratur kontrovers diskutiert, welchen Einfluss ein funktionierendes Hörsystem und das auditive Feedback auf die frühesten vorsprachlichen Entwicklungsstadien haben. Bezüglich der Phase des kanonischen Babbelns, die bereits durch das Erzeugen wohlgeformter Silbensequenzen charakterisiert ist, konnten in einigen Studien Unterschiede zwischen hörgeschädigten und gesunden Säuglingen nachgewiesen werden: Bei Säuglingen mit Hörverlust war das Auftreten von

kanonischem Babbeln verzögert und die Silbenanzahl und -komplexität geringer als bei gleichaltrigen hörgesunden Säuglingen (Moeller et al., 2007; Oller et al., 1988; Scheiner et al., 2004; von Hapsburg et al., 2006). Während sich SprachentwicklungsforscherInnen über die Bedeutung des Hörens in der Phase des kanonischen Babbelns einig sind, bestehen allerdings unterschiedliche Auffassungen über die davor auftretenden Stadien. Aufgrund der Beobachtung, dass einige typische vorkanonische Laute sowohl bei normalhörenden als auch bei hörgeschädigten Säuglingen in offenbar ähnlicher Weise produziert werden und die geordnete Reihenfolge vom Weinen/Phonation über die primitive Artikulation (Gurren/Cooing) zum sogenannten Expansionsstadium (vorkanonisches Babbeln) auch bei hörgeschädigten Säuglingen auftreten kann, wird in der Fachwissenschaft postuliert, dass die Sprachentwicklung in den vorkanonischen Stadien nicht auf ein funktionierendes Hörsystem angewiesen sei (Huang et al., 2005; Oller et al., 1985; Scheiner et al., 2004).

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse verschiedener Studien, die schon in den Entwicklungsphasen vor dem Auftreten des kanonischen Babbelns Unterschiede zwischen normalhörenden und hörgeschädigten Säuglingen aufzeigen (Kishon-Rabin et al., 2005; Koopmans-van Beinum et al., 2001; Shehata-Dieler et al., 2013; Stoel-Gammon, 1988). Im Alter von 1-4 Monaten beginnen Säuglinge in spielerischen Situationen und typischerweise in Interaktion mit einer Bezugsperson, sehr charakteristische Komfortlaute zu erzeugen (Gurren, engl. Cooing), indem Zungenrücken oder -wurzel während der Lautierung an den Rachen oder Gaumen stoßen (primitive Artikulation). Die darauffolgende Phase (Expansionsstadium), die vor der Phase des kanonischen Babbelns auftritt, ist charakterisiert durch das Kombinieren des schon bekannten Cooings mit vielen neuen Elementen, weshalb dieses Stadium auch als „stimmliches Spielen“ (vocal play) bezeichnet wird (Stark, 1980). Weitere Studien an normalhörenden Säuglingen stützen die Annahme, dass das Hören sprachlicher Signale schon sehr früh - in den ersten zwei bis drei Lebensmonaten – die vorsprachliche Lautwahrnehmung bzw. Kommunikation beeinflusst (Bourvis et al., 2018; Wanrooij et al., 2014). Einige, weiter unten in diesem Kapitel erwähnte bildgebende neurophysiologische Untersuchungen, stützen ebenfalls diese These.

Darüber hinaus konnte bereits der Einfluss des Hörvermögens auf das Weinen des Neugeborenen nachgewiesen werden: Es wurde festgestellt, dass sich die Schreie normalhörender von hörgeschädigten Säuglingen hinsichtlich Klang, Rhythmus und Melodie unterscheiden (Möller et al., 1999). Die Arbeitsgruppen um das Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES) konnten aufzeigen, dass das intrauterin gehörte muttersprachliche Intonationsmuster in den Schreien des Neugeborenen reproduziert wird und zu für die jeweilige Muttersprache prosodisch typischen Unterschieden zwischen französischen und deutschen Säuglingen führt (Mampe et al., 2009). In Anbetracht der aufgezeigten Erkenntnisse stellt sich also die Frage, ob ein funktionierendes Hörsystem nicht bereits lange vor dem Beginn des kanonischen Babbelns – d.h. in den ersten Lebensmonaten – eine Rolle spielt.

In diesem Fall könnte die Forschung bestimmte Lautäußerungen bzw. Lauteigenschaften als Marker für ein funktionierendes bzw. geschädigtes Hörsystem beim Säugling identifizieren. Dieses Wissen könnte dann ergänzend zu den schon bereits bestehenden Früherkennungsmethoden zur Diagnostik von Hörstörungen im frühen Säuglingsalter angewendet werden oder sogar zur objektiven Evaluation des Nutzens von Hörhilfen.

Vor dem Hintergrund des im Folgenden erläuterten, flächendeckenden Neugeborenenhörscreenings (NHS) stellt sich die Frage, wozu eine zusätzliche Untersuchung von Säuglingen vokalisiertem Lauten diagnostisch vorteilhaft sein könnte. Existieren nicht bereits geeignete Diagnostikverfahren, um Hörfunktionsstörungen frühzeitig zu erkennen?

Diese Frage beantwortet sich, wenn man die aktuell bekannten Verfahren zur Frühdiagnostik von Hörstörungen betrachtet. In Deutschland wurde 2008 das flächendeckende, zweistufige Neugeborenenhörscreening (NHS) für alle Säuglinge eingeführt (Bundesministerium für Gesundheit, 2008). In der Regel findet die erste Stufe des Neugeborenenhörscreenings in den ersten drei Lebenstagen statt (NHS-1). Bei Auffälligkeiten im NHS-1 bzw. Risikofaktoren für Hörstörungen, wird eine weitere Untersuchung im Alter von 2,5-3 Monaten angeschlossen (NHS-2). Eine Versorgung mit Hörhilfen erfolgt frühestens im Alter von 4 Monaten. Als übliche Verfahren für beide Stufen des NHS stehen die Messung von otoakustischen Emissionen (OAE) sowie von frühen akustisch evozierten Potentialen (FAEP) zur Verfügung.

Als otoakustische Emissionen werden die physiologischen Schallaussendungen der Cochlea, die spontan oder bei akustischer Reizung entstehen, bezeichnet. Das Ausbleiben der OAE bedeutet allerdings nicht das unmittelbare Vorliegen einer Hörstörung, da die Auswertung durch verschiedene Faktoren (z.B. Hintergrundgeräusche, unruhiger Säugling) eingeschränkt sein kann (Götte et al., 2010).

Das zweite Verfahren beruht auf der Messung von akustisch evozierten Potentialen, die durch einen akustischen Reiz ausgelöst werden und den Verlauf der Hörbahn abbilden. Der Verlauf dieser Nervenaktionspotentialänderungen wird mittels EEG-Ableitung grafisch dargestellt (s. Abbildung 1). Die Potentiale, die innerhalb der ersten 10ms abgeleitet werden, nennt man frühe akustisch evozierte Potentiale (FAEP). Sie werden bei der Hirnstammaudiometrie (engl.: brainstem evoked response audiometry, BERA) abgeleitet, indem Elektroden auf der Kopfhaut des Säuglings angebracht und über eine Sonde bzw. einen Kopfhörer akustische Stimuli (Klicks) in das Ohr gesendet werden.

Die BERA-Untersuchung weist zwar eine hohe Sensitivität zur Identifikation einer Schwerhörigkeit im mittleren Frequenzbereich auf (Cebulla et al., 2014; Cebulla et al., 2012), eine robuste Schätzung von Hörschwellen im Tieftonbereich ist aus methodischen Gründen (Frequenzabhängigkeit der Klick-BERA) damit jedoch nicht möglich (Götte et al., 2010; Hoppe, 2008; Lehnhardt et al., 2001). Eine wichtige Voraussetzung, die zum Teil einen hohen Aufwand erfordert, ist ein schlafender, ruhiger Säugling, da Signale, die bei Bewegungen eines wachen Säuglings entstehen, schwer von den Signalen der Hörbahn zu unterscheiden sind (Götte et al., 2010). Ein weiterer Nachteil der Methode ist die Tatsache, dass das Hörvermögen nur bis zur Ebene des Hirnstamms getestet wird und keine Aussage über die Funktion der Hörrinde im Cortex liefert (s. Abbildung 1). Der auditive Cortex ist insbesondere für die korrekte Wahrnehmung und Interpretation von Hörsignalen (Sprachverständnis im Wernicke-Zentrum) sowie die Rückkopplung mit dem motorischen Sprachzentrum (Broca-Zentrum) verantwortlich (Trepel et al., 2015).

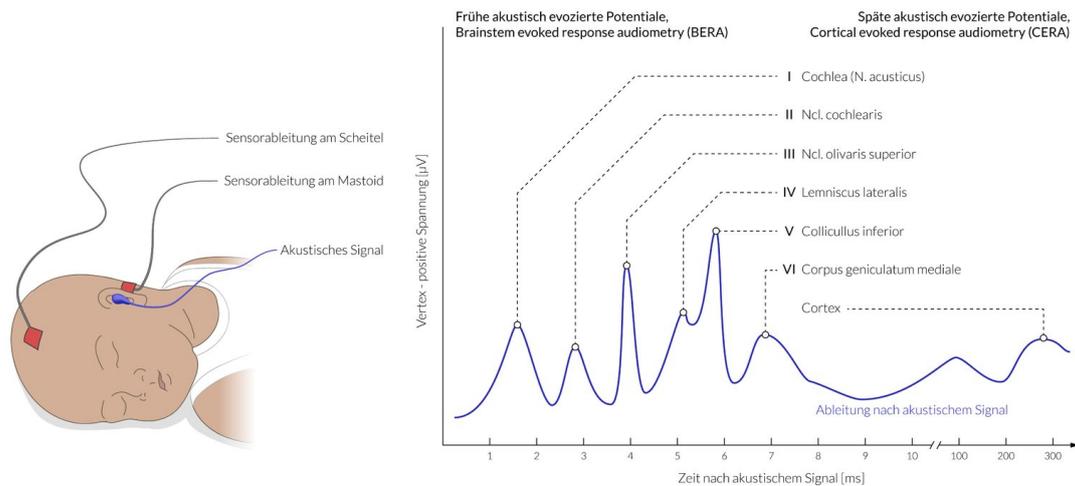


Abbildung 1: Elektrische Reaktionsaudiometrie, Abbildung nach Amboss GmbH (2017), Kapitel: Audiometrische Verfahren in der HNO.

Legende: „Links im Bild ist ein sediertes oder schlafendes Kind zu sehen. Die Ableitungselektroden werden an das Mastoid (-) und den Scheitel (+) geklebt, anschließend wird ein akustischer Reiz über den Kopfhörer (blau) gegeben. Rechts ist die physiologische Ableitung der Potentiale in den verschiedenen Regionen der Hörbahn dargestellt.“ Website: Amboss GmbH (2017), Drucklizenz vorhanden.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, existiert eine Methode, die die späten akustisch evozierten Potentiale (SAEP) misst und damit theoretisch Informationen über den Cortex liefern könnte. Die als Hirnrindenaudiometrie (engl. Cortical evoked response audiometry, CERA) bezeichnete Methode, die bereits 1939 entwickelt wurde, wird heutzutage jedoch nur noch selten angewendet. Dies liegt zum einen daran, dass der Vigilanzzustand bzw. die Hirnaktivität des Patienten bei jeder Messung im etwa gleichen mittleren Niveau liegen sollte, was bei Säuglingen nur schwer zu erreichen ist. Zum anderen ist die Hörschwellenbestimmung mittels Hirnrindenaudiometrie insbesondere in der Pädaudiologie stark abhängig vom Erfahrungswert des Untersuchers, da die Reifung des auditiven Kortex über mehrere Jahre bis hin zur Adoleszenz stattfindet und die Form der Hirnrindenpotentiale beeinflusst (Davis, 1939; Hoppe, 2008).

Es ist aus den hier aufgeführten Argumenten klinisch erstrebenswert, eine ergänzende Methode zur individualisierten, frühzeitigen Detektion einer potenziellen Hörminderung bei Säuglingen zu etablieren.

Die Aufnahmen der Säuglingsvokalisationen erfordern keinen schlafenden Säugling und sie sind gut archivierbar. Ein weiterer Unterschied zwischen dem Neugeborenenhörscreening (mittels BERA und OAE) und der Untersuchung der vorsprachlichen Vokalisationen (z.B. Komfortlautäußerungen) besteht darin, dass bei der Sprachwahrnehmung und beim Spracherwerb auch Strukturen oberhalb des Hirnstamms beteiligt sind. Diese Annahme basiert auf dem Erkenntnis von bildgebenden Untersuchungen, die aufzeigen konnten, dass auditive Sprache bereits bei Säuglingen die gleichen kortikalen Aktivierungsmuster wie bei Erwachsenen hervorruft: Auditive sprachliche Signale, insbesondere das Hören der mütterlichen Stimme, führen zur Aktivierung eines bilateralen frontotemporalen Netzwerks, das linkshemisphärisch dominiert (Beauchemin et al., 2011; Dehaene-Lambertz et al., 2003; Dehaene-Lambertz et al., 2006; Dehaene-Lambertz et al., 2010; Imada et al., 2006). Bereits im Alter von vier Monaten ist der Einfluss des muttersprachlichen Betonungsmusters rhythmischer Silben in unterschiedlichen Hirnantworten zwischen deutschen und französischen Säuglingen zu erkennen (Friederici et al., 2007). Weitere MRT-Untersuchungen liefern Hinweise darauf, dass das Lernen einer Vokalwahrnehmung schon im Alter von zwei bis drei Monaten stattfindet (Wanrooij et al., 2014). Überdies konnte nachgewiesen werden, dass bereits bei Feten eine Aktivierung des primär auditiven Kortex als Reaktion auf auditive Signale stattfindet (Jardri et al., 2008) und eine pränatale Sprachexposition zu einer verstärkten Hirnaktivität postnatal führt (Partanen et al., 2013). Die Ergebnisse stützen die Hypothese, dass die Fähigkeit zu sprechen zwar angeborene, anatomische Mechanismen voraussetzt, sich jedoch nur durch Lernen und Erfahrung in einer auditiven Sprachumgebung entwickeln kann, und dass diese Entwicklung schon sehr früh, möglicherweise bereits pränatal, beginnt. Es wird folglich angenommen, dass die zusätzliche nichtinvasive Methode der Untersuchung von Säuglingsvokalisationen, ergänzende hilfreiche Informationen für die pädaudiologische Praxis in der Frühdiagnose von Hörstörungen liefern kann.

Aufgrund der hier aufgeführten Erkenntnisse ist es leicht nachvollziehbar, dass es bei Fehlen auditiver Erfahrungen, wie es bei einer unerkannten und unbehandelten Taubheit der Fall ist, zu einer verzögerten Sprachentwicklung kommt (Oller et al., 1988; Tomblin et al., 2015). Da eine Sprachentwicklungsverzögerung zu weitreichenden Konsequenzen

(z.B. Lese-Rechtschreibschwäche, niedriger Schulabschluss, psychosoziale Auffälligkeiten) führen kann (Silva et al., 1987; Snowling et al., 2006; Stern et al., 1995), ist das Hauptziel der Frühförderung von Kindern mit Hörstörungen, die Sprachentwicklung des betroffenen Kindes zu optimieren, um ihm auf diese Weise eine Teilhabe am gesellschaftlichen und sozio-emotionalen Leben zu ermöglichen.

Auch diesbezüglich kann die frühzeitige Untersuchung von Lautäußerungen einen Beitrag leisten: Indem von Geburt an die Sprachentwicklungsschritte eines Säuglings in regelmäßigen Abständen begleitet werden, kann beispielsweise der Erfolg einer Cochleaimplantation bzw. Versorgung mit Hörgeräten gemessen und die Behandlung dementsprechend angepasst werden. Dies bestätigen mehrere Studien, in denen die Vokalisationen hörgeschädigter Säuglinge vor und nach einer Cochleaimplantation miteinander verglichen wurden: Die Säuglinge vokalisiert nach einer erfolgreichen Cochleaimplantation ähnlich häufig wie hörgesunde Säuglinge, vermutlich aufgrund des auditiven Feedbacks (Fagan, 2014). Je früher eine Cochleaimplantation erfolgte, desto geringer war die Verzögerung im Vergleich zu hörgesunden Kindern in Bezug auf den Beginn des kanonischen Babbels (Schauwers et al., 2004). Eine Studie aus Würzburg weist darauf hin, dass eine Cochleaimplantation bzw. die Versorgung mit Hörgeräten die präverbale Vokalisationen schon lange vor dem Einsatz des kanonischen Babbels, also vor dem 6.-8. Monat, positiv beeinflusst (Shehata-Dieler et al., 2013).

Die Methode würde auf diese Weise selbst Jahre später eine objektive Kontrolle bzw. einen Vergleich von verschiedenen Therapieansätzen ermöglichen. Da die Beobachtung der Sprachentwicklung z.B. in Form von Fragebögen eine einfache und für Eltern leicht erlernbare Methode darstellt, die Sprachleistungen des eigenen Kindes zu überprüfen (Cuda et al., 2013; Kishon-Rabin et al., 2005; McCreery et al., 2015), könnte auf diese Weise die Eigeninitiative und Betreuung von Familien mit schwerhörigen Kindern verbessert werden.

Vor diesem Hintergrund wurde am Universitätsklinikum Würzburg eine interdisziplinäre Kohortenstudie mit dem Titel „Analyse von Komfortlauten (babbling) bei Säuglingen zum Zeitpunkt des Neugeborenen-Hörscreening-2“ unter der Leitung von Frau Prof. Dr. med. W. Shehata-Dieler (Leitende Ärztin der Audiologie, Pädaudiologie, Elektrophysiologie und Phoniatrie der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten,

plastische und ästhetische Operationen der Universität Würzburg) und Frau Prof. Dr. rer. nat. K. Wermke (Leiterin des ZVES an der Poliklinik für Kieferorthopädie) initiiert (s. Kapitel 2.2). Im Rahmen der Kohortenstudie soll untersucht werden, ob eingeschränkte Hörleistungen die vorsprachliche Entwicklung im Alter von 2,5 bis 6 Monaten, also bereits vor dem Einfluss des kanonischen Babbeln, beeinflussen. Dies erfolgt anhand von Komfortvokalisationen („Nichtschrei-Vokalisationen“) im Vergleich zu normalhörenden, gleichaltrigen Säuglingen.

Aufgrund der Komplexität des Projektaufbaus, erfolgte eine Untergliederung in mehrere Teilprojekte. In diesem Rahmen ist auch die hier vorliegende Arbeit entstanden. Sie soll einen Beitrag in der Beantwortung der Kohortenstudie zugrundeliegenden Fragestellungen leisten und wichtige hypothesengenerierende Ansätze für die Gesamtauswertung der Kohortenstudie liefern. Hierbei soll ein Vergleich von hochgradig sensorineural hörgeschädigten Säuglingen mit gleichaltrigen, normalhörenden Säuglingen gezogen werden.

Bei Betrachtung des Titels der hier vorliegenden Arbeit, ist schließlich noch eine Frage offen: Wieso wurde der Fokus bei der Untersuchung der Komfortlaute auf die temporalen und rhythmischen Eigenschaften gelegt?

Alle temporalen und rhythmischen Komponenten sowie die Intonation und Melodie von Sprachlauten werden durch den Begriff der „Prosodie“ zusammengefasst.

Wie eine Vielzahl von Studien beschreiben, weisen Säuglinge (und bereits Föten) während des frühen Spracherwerbs eine besondere Vorliebe für sämtliche prosodische Merkmale der Sprache auf (DeCasper et al., 1994; Friederici et al., 2007; Hohle et al., 2009; Papoušek et al., 1989; Suppanen et al., 2019; Telkemeyer et al., 2009; Weber et al., 2004; Wermke et al., 2011; Zeskind et al., 1993). Die Prosodie ermöglicht dem Säugling die Identifikation essenzieller Teilstrukturen, aus denen die Sprache aufgebaut ist, und bildet so die Grundlage für das auditive System, um ähnliche Laute bzw. die eigene Muttersprache bei erneuter Präsentation wiederzuerkennen. Die prosodischen Eigenschaften spielen folglich in der Entwicklungsphase, die auch in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, eine wesentliche Rolle. In bisherigen Forschungsarbeiten zur vorsprachlichen Entwicklungsphase sind allerdings kaum die temporalen und rhythmischen Eigenschaften von Komfortlauten und deren Abhängigkeit von einem

funktionierenden Hörsystem untersucht worden (s. Kapitel 4). Die meisten Studien, die prosodische Merkmale von Säuglingsvokalisationen untersuchten, konzentrierten sich dabei auf die Phase des kanonischen Babbelns (Dikkenberg-Pot et al., 1997; Ramsdell-Hudock et al., 2018) oder auf das Weinen bzw. Schreien von Säuglingen (Mampe, 2013; Sereschk, 2018; Wermke, 2002; Wermke et al., 2002). Falls in einer Studie die prosodischen Eigenschaften von Komfortlauten im Alter vor dem 6. Lebensmonat erforscht wurden, fehlte der Vergleich mit hörbeeinträchtigten Säuglingen (Bloom, 1989; Fagan, 2009; Maya Gratier et al., 2015; Laufer et al., 1977). Die hier vorliegende Arbeit liefert somit nach Recherchen der Autorin erstmalig einen systematischen Vergleich der Komfortlaute in diesem Alter zwischen hörgesunden und hochgradig hörbeeinträchtigten Säuglingen in Bezug auf ihre temporalen und rhythmischen Eigenschaften.

Zur Messung der prosodischen Eigenschaften von Säuglingsvokalisationen können temporale Parameter wie die Lautlänge oder Pausenlänge zwischen zwei Lauten erfasst werden, indem Lautsequenzen in kleinere, rhythmische Einheiten unterteilt werden (Lynch et al., 1995). Um eine objektive Analyse der rhythmischen Eigenschaften von Lautsequenzen zu gewährleisten, wurde in der hier vorliegenden Arbeit erstmalig eine Methode eingesetzt, die auch in der Rhythmusanalyse in der Musik und Biologie Anwendung findet. Sie beruht auf der Erfassung sogenannter Inter-Onset-Intervalle (s. Kapitel 2.7.2) und der Berechnung eines normierten paarweisen Variabilitätsindex (Grabe et al., 2005; Quinto et al., 2013; Ravignani et al., 2017; Toussaint, 2012).

Mithilfe objektiver Signalanalyse-Methoden soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag dazu leisten, folgende Fragestellungen zu beantworten:

1. Unterscheidet sich die Vokalisationslänge der Komfortlaute normalhörender und hochgradig hörgeschädigter Säuglinge?
2. Ist die Pausenlänge zwischen zwei Komfortlauten abhängig von einem funktionierenden Hörsystem oder ist diese genetisch determiniert?
3. Hat die Hörleistung einen Einfluss auf die Länge der Inter-Onset-Intervalle sowie den paarweisen normierten Variabilitätsindex und damit auf die Rhythmik von Lautsequenzen?

4. Ist die Sprachentwicklung in Bezug auf ihre rhythmischen und temporalen Eigenschaften in den ersten Lebensmonaten von der Hörleistung und somit von der auditiven Rückkopplung abhängig?

2 Material und Methoden

2.1 Ethik- und Tierversuchsvotum

Für die Kohortenstudie, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit erstellt wurde, ist ein von der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Julius-Maximilians-Universität Würzburg ausgestelltes Ethikvotum (308/17me) vorliegend. Sie wurde unter Beachtung der ethischen Grundsätze der Deklaration von Helsinki (aktuelle Revision vom Oktober 2013) durchgeführt. Von den Eltern bzw. Sorgeberechtigten jedes Säuglings, der als Teilnehmer an der Kohortenstudie mitwirkt, liegt eine schriftliche Einwilligung sowohl zur Teilnahme an der Studie als auch zum Erhalt und der Kenntnisnahme der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) vor.

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei beide Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

2.2 Einbettung der Arbeit in das Gesamtprojekt

Der Ablauf der Kohortenstudie, in die die vorliegende Arbeit eingebettet ist, ist in vereinfachter Form in Abbildung 2 dargestellt.

Ein Großteil der in dieser Arbeit ausgewerteten Lautaufnahmen stammt aus dieser Kohortenstudie. Zusätzlich gingen in die vorliegende Arbeit, wie in Kapitel 2.3 begründet, anonymisierte Daten aus Vorläuferprojekten des ZVES der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg in die Analyse ein. Im Folgenden werden alle gesunden und hörgeschädigten (männlichen und weiblichen) Säuglinge, deren Lautaufnahmen in der vorliegenden Arbeit ausgewertet wurden, als „Probanden“ bezeichnet. Die gesamte Probandengruppe setzte sich aus 16 gesunden Säuglingen, die die Kontrollgruppe bildeten, und 8 hochgradig hörgeschädigten Säuglingen, die die Patientengruppe bildeten, zusammen (s. 2.3)

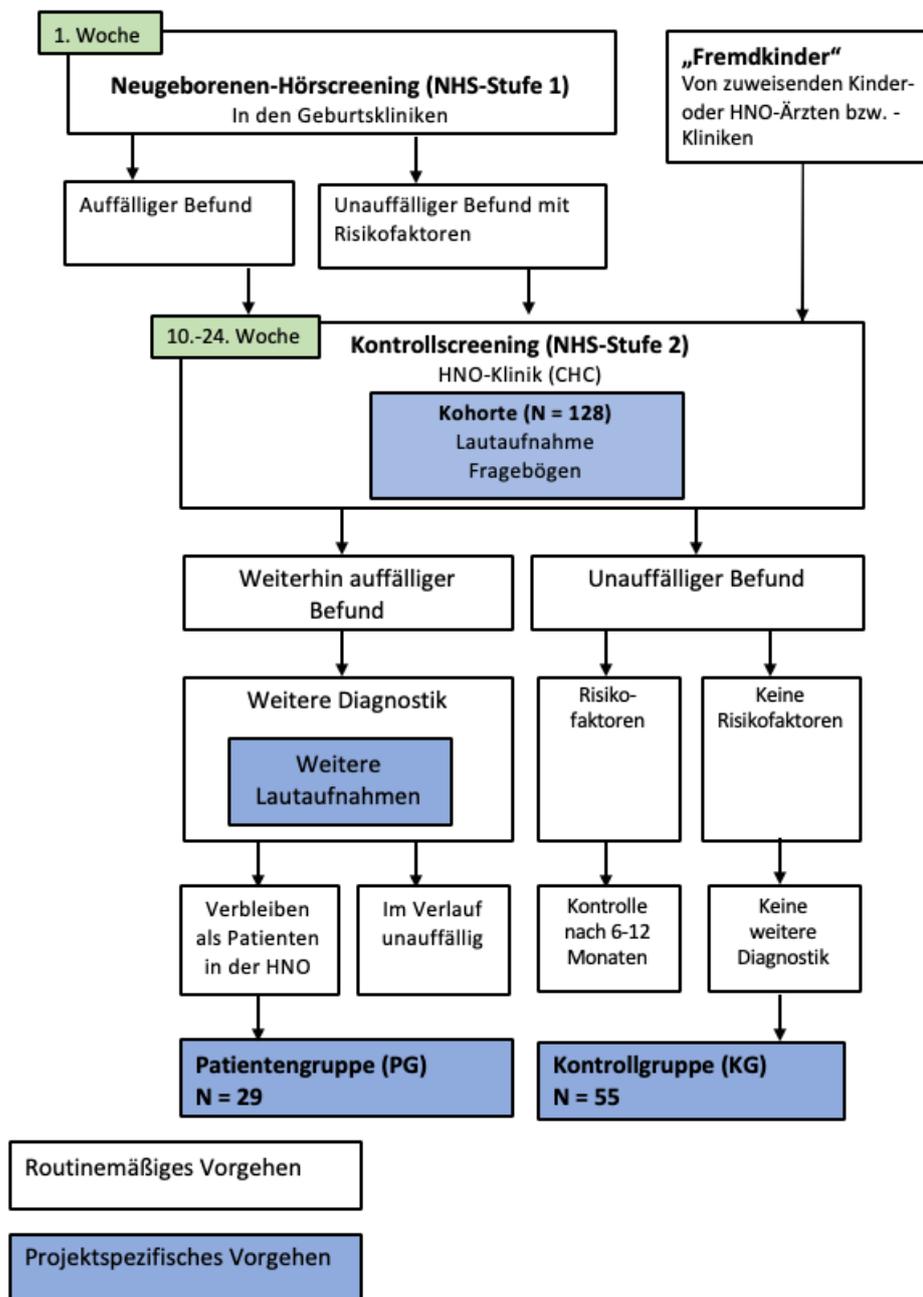


Abbildung 2: Studiendesign des Projekts „Analyse von Komfortlauten (babbling) bei Säuglingen zum Zeitpunkt des Neugeborenen-Hörscreening-2“

Legende: Eigene Darstellung, modifiziert nach Abbildung 1 im Studienprotokoll für den Ethikantrag der Kohortenstudie (S.10).

Die Untersuchung basiert auf dem zweistufigen NHS, das 1997 in der Universitätsklinik Würzburg zur Früherkennung von Hörstörungen eingeführt wurde (Shehata-Dieler et al., 2002). Die Messungen werden jeweils mit dem BERaphon® durchgeführt (Cebulla et al., 2012). Die erste Stufe (NHS-1) findet in der Geburtsklinik der Universitätsklinik

Würzburg in den ersten Lebenstagen statt. Alle Neugeborenen, die bei diesem Hörtest auffällig sind, erhalten zwischen der 10.-24. Lebenswoche einen Termin zur Nachkontrolle im Comprehensive Hearing Center (CHC) der Hals-Nasen-Ohren-Klinik Würzburg. Bei diesem wird die Messung mit dem BERAphon® in einer abgeschirmten und schallisolierten Untersuchungskabine (schallarmer Raum nach DINISO 8253, Abschnitt 11; IAC, Niederkrüchten, Deutschland) wiederholt. Ebenso wird einigen Säuglingen trotz unauffälligem Testergebnis im NHS-1 eine Nachkontrolle im CHC empfohlen, wenn sie Risikofaktoren, wie beispielsweise eine familiäre Disposition für Hörstörungen, aufweisen. Weiterhin wird dieser Hörtest auch bei Säuglingen, die von ambulanten HNO- und Kinderärzten oder auswärtigen Kliniken mit Verdacht auf Hörstörung in die Uniklinik Würzburg überwiesen werden, durchgeführt.

Im Rahmen der Kohortenstudie erfolgt auf der Stufe des NHS-2 ergänzend zur Routine die Datenerhebung in Form von Lautaufnahmen und Fragebögen (s. Kapitel 2.4).

Die Säuglinge, die im NHS-2 als unauffällig getestet werden und keine Risikofaktoren aufweisen, gelten als gesund und es erfolgt keine weitere Diagnostik in der HNO-Klinik Würzburg. Im Projekt werden diese Probanden der Kontrollgruppe zugeordnet, da sie keine Hörstörung aufweisen.

Bei Säuglingen, die im NHS-2 nochmals auffällig waren, werden weitere diagnostische Maßnahmen in der HNO-Klinik Würzburg durchgeführt. Wird im Verlauf eine Schallempfindungsstörung (SES) diagnostiziert, verbleiben diese Säuglinge als Patienten in der HNO-Klinik in Behandlung und ihre Lautaufnahme wird der Patientengruppe (PG) zugeordnet (s. Abbildung 2).

Die Kohorte im Gesamtprojekt besteht folglich aus allen Säuglingen, die in dem zeitlichen Rahmen der Kohortenstudie im NHS-1 auffällig waren und deren Hörleistungen im CHC der HNO-Klinik Würzburg (NHS-2) kontrolliert wurden. Der Begriff „drop outs“ bezeichnet alle Säuglinge, von denen keine Lautaufnahme vorliegt, weil die Eltern nicht mit der Teilnahme einverstanden waren oder nicht zum Kliniktermin erschienen sind, oder die während der Lautaufnahme keine spontanen Komfortlaute äußerten. Als einziges Ausschlusskriterium für die Kohortenstudie galt die Diagnose einer Mehrfachschädigung bei einem Säugling.

Auf diese Weise konnten im Verlauf des ersten Projektjahres 101 Probanden rekrutiert werden, von denen 44 Probanden als auffällig und 57 Probanden als unauffällig in der Kontrolluntersuchung des NHS-2 klassifiziert wurden. Die Lautaufnahmen der Probanden wurden anonymisiert im Datensystem des ZVES gespeichert. Die genauen Kriterien, nach denen die Probanden für die vorliegende Arbeit ausgewählt wurden, sind in Kapitel 2.3 beschrieben.

Die Autorin der vorliegenden Arbeit war mit zwei weiteren Doktoranden an der Kohortenstudie seit Beginn beteiligt. In einer ersten Phase fand die Projektvorbereitung für die Kohortenstudie und die Testung der Lautaufnahmesituation in der HNO-Klinik Würzburg sowie die Erstellung der Elterninformation, des Aufnahmeprotokolls, der Fragebögen und der Einwilligungserklärung statt. Weiterhin konnten, dank der freundlichen Unterstützung und statistischen Beratung durch den Lehrstuhl für Klinische Epidemiologie und Biometrie (Prof. Dr. Dr. G. Gelbrich), der zeitliche Rahmen und die erforderliche Stichprobengröße für eine Power von 99% abgeschätzt werden.

Der hohe organisatorische und zeitliche Aufwand erforderte die Beteiligung von weiteren Doktoranden an der Datenerhebung. Dies war besonders bei der Rekrutierung der Patientengruppe entscheidend, da nur etwa ein bis fünf von 1000 Neugeborenen in Deutschland an einer Hörminderung von mindestens 40 dB leiden (Burke et al., 2013).

Während die Datenerhebung und der erste Schritt der Rohdatenaufbereitung (manuelle Segmentierung und Archivierung der Rohdaten) von mehreren Doktoranden durchgeführt wurde, konzentrierte sich jeder Doktorand für die darauffolgenden Schritte der Datenaufbereitung und -auswertung auf seine spezifische Fragestellung im Projekt.

2.3 Probandenkollektiv

In der vorliegenden Arbeit wurden Lautaufnahmen von insgesamt 24 Probanden annotiert und ausgewertet, von denen 16 der Kontrollgruppe und 8 der Patientengruppe zugeordnet wurden. Die Einteilung in Kontroll- oder Patientengruppe wurde nach folgenden Kriterien getroffen:

- **Kontrollgruppe (KG):** Ein Proband wurde anhand der klinischen Daten als „hörgesund“ klassifiziert, insbesondere aufgrund eines unauffälligen NHS-2.
- **Patientengruppe (PG):** Bei einem Probanden wurde eine hochgradige Schallempfindungsstörung (SES) vom WHO-Grad 3 diagnostiziert, d.h. einen gemittelten Hörverlust im Tonaudiogramm von 61-80 dB (bei 0,5 kHz, 1 kHz, 4 kHz).

Die Daten für die beiden Gruppen stammen zum großen Teil aus der in Kapitel 2.2 beschriebenen Kohortenstudie. Der Datensatz dieser Kohortenstudie stellte sich allerdings aufgrund unterschiedlicher Ausprägung der Hörstörungen und des Vorliegens weiterer Erkrankungen, die nicht das Gehör betreffen, als sehr heterogen dar. Um auszuschließen, dass sich Unterschiede in den beiden Gruppen aufgrund anderer Erkrankungen ergeben, wurden nur Probanden ausgewählt, bei denen das Vorliegen von Frühgeburtlichkeit, bleibenden kardiovaskulären, respiratorischen oder neurologischen Erkrankungen, Lippen-Kiefer-Gaumenspalten sowie Trisomie 21 oder sonstigen Syndromen anhand der klinischen Daten ausgeschlossen wurde (s. Kapitel 1). Auf diese Weise wurden 16 Probanden aus den Daten der Kohortenstudie rekrutiert, von denen neun Hörgesunde der Kontrollgruppe und sieben hochgradig Hörgeschädigte der Patientengruppe zugeordnet wurden.

Zudem wurde der Datensatz durch anonymisiert vorliegende Aufnahmen von Vorläuferprojekten des ZVES ergänzt, in denen Probanden der gleichen Altersgruppe und unter vergleichbaren Bedingungen aufgenommen wurden. Die Erhebung der Lautaufnahmen erfolgte bei allen Probanden nach den Protokollvorgaben des ZVES-Labors für klinische Dokumentationen (s. Kapitel 2.4). Auf diese Weise wurde die

Kontrollgruppe durch sieben hörgesunde Probanden und die Patientengruppe durch einen hochgradig hörgeschädigten Probanden ergänzt.

2.3.1 Kontrollgruppe (KG)

Die Kontrollgruppe bestand aus 16 Probanden, von denen elf männlich und fünf weiblich waren. In Tabelle 1 sind die quantitativen Eigenschaften der Probanden der Kontrollgruppe charakterisiert. Sie sind nach dem Alter zum Zeitpunkt der Lautaufnahme sortiert. Das Alter zum Zeitpunkt der Lautaufnahme betrug im Durchschnitt 112,7 Tage (Minimum: 65 Tage bei Proband AA und Maximum: 149 Tage bei Proband AP).

Tabelle 1: Parameter der Probanden der Kontrollgruppe

Legende: k.A.=keine Angabe, m=männlich, MW = arithmetischer Mittelwert; SSW=Schwangerschaftswochen, w=weiblich.

| Probanden-code | Alter bei Aufnahme [Tage] | Geschlecht | Gestationsalter [SSW] | Geburts-gewicht [g] | Geburts-länge [cm] | Quotient ¹ | Kopf-umfang [cm] |
|----------------|--------------------------------|------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| AA | 65 | m | 40+0 | 4.610 | 54 | 85,4 | 38 |
| AB | 62; 63; 64; 79 ² | w | 40+0 | 3.790 | 55 | 68,9 | 36 |
| AC | 82 | m | 39+5 | 3.380 | 50,0 | 67,6 | 35,0 |
| AD | 99 | m | 40+4 | 3.090 | 50,0 | 61,8 | 30,0 |
| AE | 106 | m | 41+0 | 3.140 | 51,0 | 61,6 | 35,0 |
| AF | 109 | w | 41+0 | 3.120 | 51,0 | 61,2 | 35,5 |
| AG | 113 | w | 39+5 | 3.195 | 50,0 | 63,9 | 36,0 |
| AH | 116 | w | 39+5 | 3.200 | 51,0 | 62,7 | 33,5 |
| AI | 120 | m | 39+6 | 3.645 | 53,0 | 68,8 | 35,0 |
| AJ | 124 | m | 40+1 | 3.520 | 51,0 | 69,0 | 34,0 |
| AK | 125 | m | 38+5 | 4.180 | 53,0 | 78,9 | 37,0 |
| AL | 131 | m | 40+3 | 4.050 | 51,0 | 79,4 | 36,0 |
| AM | 131 | m | k.A. | k.A. | k.A. | k.A. | k.A. |
| AN | 132 | m | 39+2 | 2.800 | k.A. | k.A. | k.A. |
| AO | 134 | w | 37+1 | 2.850 | 50,0 | 57,0 | 34,0 |
| AP | 149 | m | 37+5 | 2.800 | 50,0 | 56,0 | 34,5 |
| MW | 112,7 | | 39+5 | | x | x | x |

¹Quotient aus Geburtsgewicht und Geburtslänge

²Aufnahme der Probandin AB im Alter von 62, 63, 64 und 79 Tagen

2.3.2 Patientengruppe (PG)

Die Patientengruppe wurde aus acht Probanden mit beidseitiger SES gebildet, von denen sechs männlich und zwei weiblich waren. Dies entspricht einem Geschlechterverhältnis von 3:1. Die Probanden sowie ihre Codes sind nach dem gleichen Schema wie in der KG angeordnet mit dem einzigen Unterschied, dass ihre Codes mit dem Buchstaben B beginnen. Ihre Eigenschaften sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Lautaufnahme bei Probanden der PG betrug 101,6 Tage (Minimum: 79 Tage bei Proband BA und Maximum: 145 Tage bei Proband BH).

Tabelle 2: Parameter der Probanden der Patientengruppe

Legende: k.A.=keine Angabe, m=männlich, MW = arithmetischer Mittelwert; SSW=Schwangerschaftswochen, w=weiblich.

| Probanden-code | Alter bei Aufnahme [Tage] | Geschlecht | Gestationsalter [SSW] | Geburtsgewicht [g] | Geburtslänge [cm] | Quotient ¹ | Kopfumfang [cm] |
|----------------|---------------------------|------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| BA | 79 | m | 41+2 | 3.810 | 50,0 | 76,2 | 35,0 |
| BB | 88 | w | 41+3 | 3.960 | 51,0 | 77,6 | k.A. |
| BC | 98 | m | 40+2 | 3.255 | 49,5 | 65,8 | 34,0 |
| BD | 103; 145 ² | m | 40+0 | 3.100 | 48,0 | 64,6 | 34,5 |
| BE | 105 | w | 40+6 | 3.540 | 48,0 | 73,8 | 36,0 |
| BF | 108 | m | 39+2 | 4.455 | 56,0 | 79,6 | k.A. |
| BG | 111 | m | 39+4 | 4.455 | 56,0 | 79,6 | k.A. |
| BH | 72; 128 ³ | m | 38+4 | 3.745 | 54,0 | 69,4 | 36,0 |
| MW | 101,6 | | 40+0 | 3.790 | 51,6 | 73,3 | 35,1 |

¹Quotient aus Geburtsgewicht und Geburtslänge

²Aufnahme des Probanden BD im Alter von 72 und 128 Tagen

³Aufnahme des Probanden BH im Alter von 103 und 145 Tagen

2.4 Datenerhebung

Wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert, stammen die Lautaufnahmen der 24 hier untersuchten Probanden aus unterschiedlichen Projekten des ZVES, wobei die Datenerhebung bei allen Säuglingen in gleicher Art und Weise nach dem Standardprotokoll des ZVES erfolgte. Nachfolgend wird das Vorgehen der Erhebung der Lautaufnahmen für die Kohortenstudie dargestellt, an der die Autorin beteiligt war.

Wie aus dem Studiendesign (s. Abbildung 2) ersichtlich wird, erfolgten die Lautaufnahmen im Rahmen der Kohortenstudie zum Zeitpunkt des NHS-2 im CHC. Die beteiligten Doktoranden wurden im Vorhinein über anstehende Untersuchungstermine eines Säuglings durch die Mitarbeiterinnen des CHC (Frau Walk und Frau Hock) informiert.

Da die Durchführung einer BERA-Untersuchung ein Schlafen des Säuglings voraussetzt, ist der Kontrolltermin im CHC oft mit langen Wartezeiten für die Eltern verbunden. In dieser Zeit wurden die Eltern durch einen der am Projekt beteiligten Doktoranden und einen aufklärenden Arzt ausführlich über das Studienziel und die Vorgehensweise einer Lautaufnahme informiert und ihnen die Elterninformation ausgehändigt. Nachdem alle Fragen beantwortet und die Einwilligungserklärung sowie die Datenschutzverordnung durch die Eltern bzw. Sorgeberechtigten des Kindes unterschrieben waren, wurde in Absprache mit den Mitarbeitern und Ärzten der HNO-Klinik Würzburg (um den klinischen Ablauf im CHC nicht zu verzögern) eine Lautaufnahme durchgeführt.

Diese erfolgte entweder in einer für elektromagnetische Einstrahlungen abgeschirmten und schallisolierten Untersuchungskabine oder, falls dies nicht möglich war, in einem separaten, ruhigen Raum des CHC. Dabei wurden, wie auch bei allen anderen Aufnahmen, die durch Mitarbeiter des ZVES durchgeführt werden, ein tragbares digitales Aufnahmegerät der Firma TASCAM, Modell DR-100 (48 kHz Fs, 16 Bit linear) und ein externes Mikrofon der Firma Earthworks TC20 verwendet. Zu Beginn der Aufnahme erfolgte eine Ansage durch den jeweiligen Doktoranden, die Datum, Uhrzeit, Pseudonym (Probandencode), Aufnahmeort sowie weitere Bemerkungen (wie beispielsweise zum Verhaltenszustand des Säuglings) beinhaltete. Daraufhin wurde der Säugling in Rückenlage durch Augenkontakt mit einer Bezugsperson, und durch vokale Anregung dazu animiert, Komfortlaute zu äußern. Die spontane Art und Weise, wie Mütter, Väter und Bezugspersonen mit Säuglingen und Kleinkindern sprechen, bezeichnet man als

„Infant Directed Speech“ (IDS) bzw. „motherese“, die durch ausgeprägte Modulation der Tonhöhe und Verlängerung der Silben gekennzeichnet ist und eine wichtige Rolle in der sozialen und kognitiven Entwicklung von Säuglingen spielt (Englund et al., 2020; Saint-Georges et al., 2013). Da diese Sprachweise die Aufmerksamkeit der Säuglinge auf den sprachlichen Input lenken und das Erzeugen eigener Vokalisationen auslösen kann (Kalashnikova et al., 2018; Pablo et al., 2020), wurde sie auch während der Aufnahmesituation im CHC eingesetzt. Zum Teil konnte die spontane Äußerung von Komfortlauten auch unter Zuhilfenahme einer Attrappe in Form einer Puppe mit deutlichen Gesichtszügen unterstützt werden.

Ein gesunder Säugling im 3.-4. Lebensmonat konzentriert sich in der Regel in der gewählten Aufnahmesituation (Rückenlage des Säuglings, face-to-face Interaktion) vollkommen auf die Fixierung des Gesichts oder einer entsprechenden Attrappe. Da das Erzeugen von ersten Komfortlauten für Säuglinge in diesem Alter eine große Anstrengung erfordert, sind sie mit dieser „Aufgabe“ völlig ausgelastet und im Unterschied zu älteren Säuglingen weniger schnell durch die Umgebung oder das Mikrofon abgelenkt. In manchen Fällen schien der Säugling nach den Lautierungen erschöpft und es kam zu Blickkontaktvermeidung und Weinen. Um die Säuglinge nicht zu überfordern, galt dies als Abbruchkriterium für die Aufnahme. In den übrigen Fällen wurde die Aufnahme nach ca. 10-15 Minuten gestoppt. Am Ende erfolgte eine Absage durch den am Projekt beteiligten Doktoranden mit Wiederholung von Datum, Uhrzeit und Pseudonym, um Probandenverwechslungen zu verhindern. Die Dekodierungsliste für die Pseudonyme verblieb im CHC bei Frau Prof. Dr. med. W. Shehata-Dieler.

2.5 Auswahl der Vokalisationen

In dieser Arbeit wurden, wie in Kapitel 1 erläutert, nur Laute ausgewertet, die sich dem Typ der Komfortvokalisationen zuordnen ließen. Die Mehrheit dieser Säuglingsvokalisationen erfolgt während der Ausatmungsphase (Exspiration) und hier, wie bereits in den ersten Schreien Neugeborener, ist der typische Rhythmus der Sprechatmung eines Erwachsenen mit kürzerer Inspiration und einer darauffolgenden längeren Exspiration zu erkennen (Lieberman, 1985; Sereschk, 2018).

Aus beiden Gruppen erzeugten die Probanden regelmäßig Laute während der Einatmung (sogenannte inspiratorische oder ingressive Laute). Wie vorangehende Untersuchungen zeigen konnten, ist das Auftreten dieser inspiratorischen Laute bei Säuglingen physiologisch und für die sprachliche Entwicklung nicht relevant (Sereschk, 2018; Wermke et al., 2018).

Vor diesem Hintergrund konzentrierte sich die Autorin der vorliegenden Arbeit bei der Auswertung ausschließlich auf die expiratorischen Komfortlaute. Im Nachfolgenden werden diese Vokalisationen als „E-Vokalisationen“ bezeichnet. Allerdings wurden auch die inspiratorischen Laute annotiert („IP“ für Inspirationsphonation, s. Tabelle 3 in Kapitel 2.6.2.2), um gegebenenfalls eine erweiterte Analyse im Rahmen der Kohortenauswertung an diesem Datensatz zu ermöglichen.

2.6 Datenaufbereitung

2.6.1 Manuelle Segmentierung der Rohdaten

In Zusammenarbeit der am Projekt beteiligten Doktoranden wurden die Rohdaten aller Probanden, die aufgenommen wurden, im ZVES mithilfe von Routineverfahren für die spätere Auswertung aufbereitet. Ein großer Teil dieses Bearbeitungsschrittes erfolgte dabei durch zwei Doktoranden im Rahmen des Projekts (Daria Blum und Fabian Clad), die nicht an den Aufnahmen im CHC beteiligt waren.

Die Rohdaten mussten zunächst auf einen Computer im ZVES eingelesen und unter dem Probandencode im Rahmen der Pseudonymisierung abgespeichert werden. Anschließend erfolgte die Bearbeitung mit dem Analyseprogramm PRAAT (Boersma und Weenink, 2014).

Für jede E-Vokalisation errechnet PRAAT automatisch ein Frequenzspektrogramm gemeinsam mit einem Zeitsignal, sowie ein Textfeld, in dem Bemerkungen zu einzelnen Zeitabschnitten möglich sind (Textgrid). In Abbildung 3 ist ein Beispiel einer E-Vokalisation eines Probanden aus der KG dargestellt.

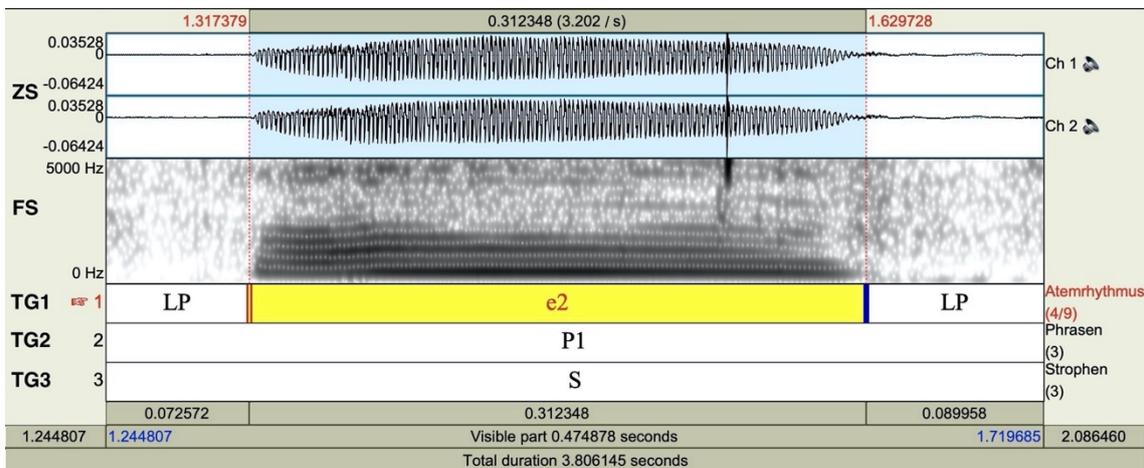


Abbildung 3: PRAAT-Ausgabebeispiel einer E-Vokalisation eines Probanden aus der Kontrollgruppe im Alter von 65 Tagen.

Legende: FS = Frequenzspektrogramm; TG1 = Textgrid 1 (Atemrhythmus); TG2 = Textgrid 2 (Phrasen); TG3 = Textgrid 3 (Strophen); ZS = Zeitsignal.

Dabei wird auf der X-Achse die Zeit in Sekunden und auf der Y-Achse die Frequenz in Hertz (bis zu einem Bereich von 5kHz) angegeben. Im oberen Fenster befindet sich das Zeitsignal (ZS) bzw. die Pegelamplitude der in diesem Beispiel ausgewählten E-Vokalisation (Stereoaufnahme). Im darunter liegenden Fenster ist ein

Frequenzspektrogramm (FS) im Bereich bis 5kHz zu erkennen, das den Verlauf der Melodie darstellt.

Unterhalb dieser beiden Fenster sind die dazugehörigen drei Textgrids abgebildet, mittels derer die Lautaufnahmen in verschiedene zeitliche Abschnitte eingeteilt wurden. Dabei entspricht das erste Textgrid (TG1) dem „Atemrhythmus“ des Probanden, im zweiten Textgrid (TG2) sind sogenannte „Phrasen“ und im dritten (TG3) sogenannte „Strophen“ gekennzeichnet (s. hierzu Kapitel 2.6.2).

2.6.2 Einteilung einer Lautaufnahme in zeitliche Abschnitte

2.6.2.1 Allgemeine Gliederung einer Lautaufnahme

Die Rohdaten von bis zu 15 Minuten Aufnahmelänge mussten zunächst in verschiedene, zeitliche Abschnitte gegliedert werden, um eine Auswertung der E-Vokalisationen zu gewährleisten. Zuerst wurden die Rohdaten mit dem Bearbeitungsprogramm PRAAT in kleinere Abschnitte (sog. „Langserien“ mit einer Länge von ca. 20-50 Sekunden) segmentiert. Hierbei wurde darauf geachtet, dass zusammenhängende E-Vokalisationen eines Probanden nicht getrennt wurden. Es wurde demnach mittels Cursorsetzung erst eine neue Langserie begonnen, wenn der Proband eine Vokalisationspause einlegte, um die zusammenhängenden E-Vokalisationen nicht zu unterbrechen.

Zunächst ist in Abbildung 4 ein allgemeiner Überblick über die Gliederung einer Langserie in verschiedene zeitliche Abschnitte dargestellt. Die genauen Erläuterungen sowie die Gründe für diese Einteilung werden im darauffolgenden Kapitel aufgeführt.

In einer Langserie wurden zunächst alle zeitlichen Start- und Endpunkte der E-Vokalisationen gekennzeichnet und der entsprechende Abschnitt im Textgrid fortlaufend durchnummeriert (e1, e2, etc.). Die dazwischenliegenden Pausen wurden bezüglich ihrer temporalen Eigenschaften in Zwischenpausen (ZP), die kürzer als sieben Sekunden andauern, und in Phrasenpausen (PP), die länger als sieben Sekunden andauern, eingeteilt. Die Zwischenpausen bilden zusammen mit den E-Vokalisationen eine Phrase (P). Dabei beginnt und endet eine Phrase jeweils mit einer E-Vokalisation. Die Phrasenpausen liegen folglich zwischen den Phrasen. Alle Phrasen und Phrasenpausen einer Langserie bilden zusammen eine Strophe. Eine Langserie umfasst somit die gesamte Strophe mit einem kurzen Abschnitt jeweils am Anfang und am Ende derselben, in denen keine auswertbaren Säuglingsvokalisationen auftraten.

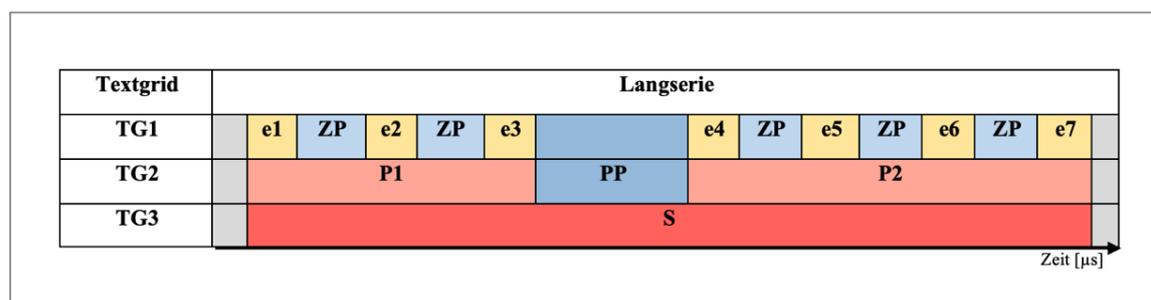


Abbildung 4: Schema zur Gliederung einer Langserie in zeitliche Abschnitte

Legende: e(n) = E-Vokalisationen, P(n) = Phrasen, PP= Phrasenpause, S = Strophe, TG = Textgrid, ZP = Zwischenpause.

2.6.2.2 Erläuterungen der einzelnen Arbeitsschritte

Nach der Erstellung von Langserien, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, erfolgte die Kennzeichnung von E-Vokalisationen mithilfe eines von Michael Eisenmann programmierten Skriptes („Annotationhelper“) (Eisenmann, 2021). Dieses kennzeichnet zunächst automatisch grob die Grenzen der E-Vokalisationen und Zwischenpausen in einer Lautaufnahme und erstellt ein dazugehöriges Textgrid („Atemrhythmus“ in TG1 in Abbildung 3). Die automatische Cursorsetzung wurde von der Autorin überprüft und im Anschluss, falls erforderlich, korrigiert, basierend auf einer gekoppelten auditiven und visuellen Analyse.

Um die auditive Kontrolle korrekt durchführen zu können, wurde in einer Vorbereitungsphase das auditive Erkennen von In- und Expirationen eines Säuglings an bereits vorhandenen, durch andere Mitarbeiter des ZVES annotierten Aufnahmen trainiert. Die visuelle Kontrolle erfolgte anhand dem Zeitsignal (ZS) im ersten Fenster und anhand des Frequenzspektrogramms (FS) im zweiten Fenster in PRAAT. In Abbildung 3 ist der Beginn und das Ende der E-Vokalisation „e2“ an der Pegelamplitude leicht zu erkennen, da ein Laut als Abweichung von der Nulllinie dargestellt wird. Im Programm selbst ist das visuelle Kennzeichnen von Beginn und Ende einer E-Vokalisation weitaus exakter als in Abbildung 3 möglich, indem eine Vergrößerung ausgewählter Bereiche Cursor-Verschiebungen auf der X-Achse im Mikrosekunden-Bereich ermöglicht. Die Angabe der hieraus resultierenden Messgenauigkeit erfolgt in Kapitel 2.7.3.

Anschließend wurden alle Abschnitte, die eine E-Vokalisation beinhalteten, fortlaufend durchnummeriert. Alle Abschnitte, die keine E-Vokalisation beinhalteten, entsprachen,

wie in Kapitel 2.6.2.1 erläutert, entweder den Zwischenpausen (kürzer als sieben Sekunden) oder den Phrasenpausen (länger als sieben Sekunden). Um inhaltliche Informationen bezüglich der Zwischen- bzw. Phrasenpausen für die spätere Auswertung zu liefern, wurden für diese Abschnitte weitere Abkürzungen (s. Tabelle 3) eingeführt. In Tabelle 3 sind alle in Textgrid 1 verwendeten Abkürzungen mit den dazugehörigen Erklärungen dargestellt.

Tabelle 3: Erklärungen für die in Textgrid 1 verwendeten Abkürzungen

| Zugehörigkeit | Abkürzung in TG 1 | Erklärung |
|------------------|-------------------|---|
| E-Vokalisationen | e(n) | E-Vokalisation: Ein Proband erzeugt eine Komfortvokalisation während der Expiration. Die E-Vokalisationen werden in der gesamten Langserie fortlaufend durchnummeriert. |
| Zwischenpausen | LP | Lautpause: Eine Pause zwischen zwei E-Vokalisationen, in denen nur die Atmung des Probanden zu hören ist. |
| | KLP | Kurzlautpause: In einer Pause zwischen zwei E-Vokalisationen kommen zusätzliche, hier nicht ausgewertete, vegetative Laute des Probanden vor wie beispielsweise Lachen, Husten, Niesen etc. |
| | IP | Inspirationsphonation: Der Proband erzeugt eine Vokalisation während einer Inspiration (s. Kapitel 2.5) |

Parallel wurde ein zweites Textgrid angelegt (TG 2), um die oben beschriebenen Abschnitte den Phrasen bzw. Phrasenpausen zuzuordnen (s. Tabelle 4).

Eine Phrase (P) wurde in der vorliegenden Arbeit definiert als das Auftreten von mindestens zwei aufeinanderfolgenden E-Vokalisationen beliebiger Länge, deren Zwischenpausen nicht länger als sieben Sekunden andauerten. Das bedeutet, dass eine Phrase mit dem zeitlichen Startpunkt einer E-Vokalisation beginnt, und mit dem zeitlichen Endpunkt der letzten E-Vokalisation dieser Phrase endet. Eine Phrase endet mit dem Beginn einer länger als sieben Sekunden andauernden Pause.

Eine solche Pause wird als „Phrasenpause“ (PP) bezeichnet. Diese liegt folglich zwischen der letzten E-Vokalisation der ersten Phrase und der ersten E-Vokalisation der darauffolgenden Phrase. Mit der ersten E-Vokalisation nach der Phrasenpause beginnt eine neue Phrase.

Falls es in einer Langserie mehrere Phrasen gab, wurden diese fortlaufend durchnummeriert.

Tabelle 4: Erklärungen für die in Textgrid 2 verwendeten Abkürzungen

Abkürzung in Textgrid 2 Erklärung

| | |
|------|--|
| P(n) | Phrase: Das Auftreten von mindestens zwei aufeinanderfolgenden E-Vokalisationen, deren Zwischenpausen nicht länger als sieben Sekunden andauern. Falls mehrere Phrasen in einer Langserie auftreten, werden diese fortlaufend durchnummeriert. |
| PP | Phrasenpause: Eine Pause zwischen zwei E-Vokalisationen dauert länger als sieben Sekunden an. Die Phrasenpause beginnt mit dem zeitlichen Endpunkt der letzten E-Vokalisation einer Phrase und endet mit dem Beginn der ersten E-Vokalisation der darauffolgenden Phrase. |

Eine Phrase zeigt dabei an, dass die in ihr enthaltenen E-Vokalisationen (rhythmisch) zusammengehören, ähnlich einer Äußerung eines Gesprächspartners im Dialog. Bereits im Säuglingsalter ist eine Mutter- bzw. Bezugsperson-Kind-Interaktion festzustellen, bei der sich beide Partner in der Rolle als „Sprecher“ und „Hörer“ abwechseln („turn-taking“). Für eine koordinierte Bezugsperson-Kind-Interaktion ist eine zeitliche Abstimmung der beiden Interaktionspartner besonders wichtig (Maya Gratier et al., 2015; Hilbrink et al., 2015; Kuhl et al., 1996; Papoušek, 1994; Papoušek et al., 1989; Reissland et al., 1999). Während der Bezugsperson-Kind-Interaktionen sind häufig rhythmische Elemente zu beobachten, die durch gegenseitige Imitationen, Wiederholungen sowie überlappende Vokalisationen geprägt werden (M. Gratier et al., 2011; Maya Gratier et al., 2015; Kokkinaki et al., 2000). Eine Phrase in der hier vorliegenden Arbeit beinhaltet aus diesem Grund alle E-Vokalisationen eines Probanden, die eine rhythmische Einheit, d.h. zusammengehörige Laute ähnlich den Äußerungen eines Gesprächspartners im Dialog, bilden. Da dies häufig in Interaktion mit der Bezugsperson geschieht, sind die Bezugsperson-Kind-Interaktionen auch innerhalb einer Phrase vorhanden.

Das zeitliche Kriterium von sieben Sekunden wurde durch die vorherige Beobachtung der rhythmischen Einheiten durch die Autorin der vorliegenden Arbeit ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass die E-Vokalisationen eines Probanden als zusammengehörige rhythmische Einheit (Phrase) am besten beschrieben werden können, wenn das

dazwischenliegende Intervall (Phrasenpause) maximal sieben Sekunden andauerte. Bei Wahl eines kürzeren Zeitintervalls für die Phrasenpausen hätte das Risiko bestanden, zu viele zusammenhängende Sequenzen von Säuglingsvokalisationen zu durchtrennen. Auch die Literatur stützt die These eines zwischen drei und zehn Sekunden andauernden Intervalls zwischen den rhythmischen Einheiten von Säuglingsvokalisationen (Maya Gratier et al., 2015; Kokkinaki et al., 2000). Eine ausführliche Begründung der Auswahl dieses Kriteriums findet sich in Kapitel 4.5.

Zusätzlich wurde ein drittes Textgrid (TG 3) für die Kennzeichnung von „Strophen“ angelegt. Eine Strophe (S) markiert das gesamte zeitliche Intervall aller Abschnitte, die in den ersten beiden Textgrids festgelegt wurden. Sie beginnt damit am Anfang der ersten E-Vokalisation der ersten Phrase einer Langserie und endet mit dem zeitlichen Endpunkt der letzten E-Vokalisation der letzten Phrase derselben Langserie.

Zur Verdeutlichung dieser komplexen Einteilung ist in Abbildung 5 - Abbildung 7 ein Beispiel einer Langserie dargestellt, in der sich die Strophe S aus den zwei Phrasen P1 und P2 sowie deren Phrasenpause PP zusammensetzt. Dabei zeigen Abbildung 6 und Abbildung 7 jeweils Vergrößerungen der Phrasen P1 bzw. P2 aus Abbildung 5.

Die Phrase 1 beginnt mit der ersten E-Vokalisation (e1) und endet mit der zweiten E-Vokalisation (e2). Nach der zweiten E-Vokalisation folgt die Phrasenpause PP. Danach beginnt die Phrase 2 mit der dritten E-Vokalisation (e3) und endet mit der neunten E-Vokalisation (e9).

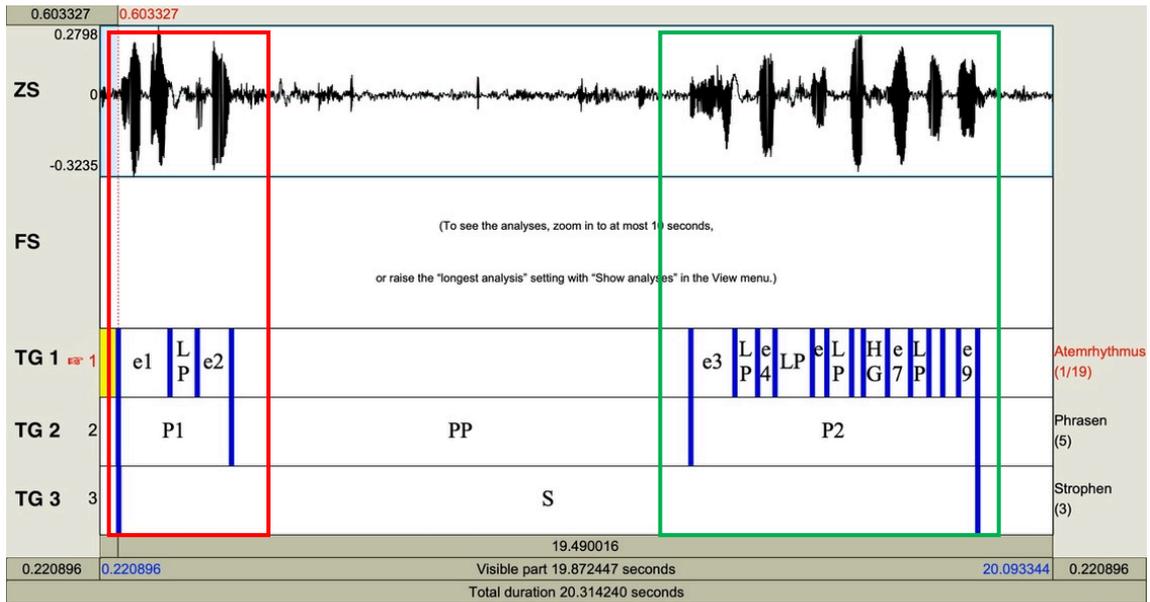


Abbildung 5: Beispiel einer Langserie eines gesunden Probanden im Alter von 109 Tagen mit dem dazugehörigen, annotierten Textgrid in PRAAT.

Legende: e(n) = E-Vokalisationen, FS = Frequenzspektrum, LP = Lautpause, P(n) = Phrasen, PP = Phrasenpause, S = Strophe, TG(n) = Textgrid, ZS = Zeitspektrum.
 Der rote Rahmen zeigt den Ausschnitt an, der in Abbildung 6 vergrößert zu sehen ist, während der grüne Rahmen den Ausschnitt aus Abbildung 7 markiert.

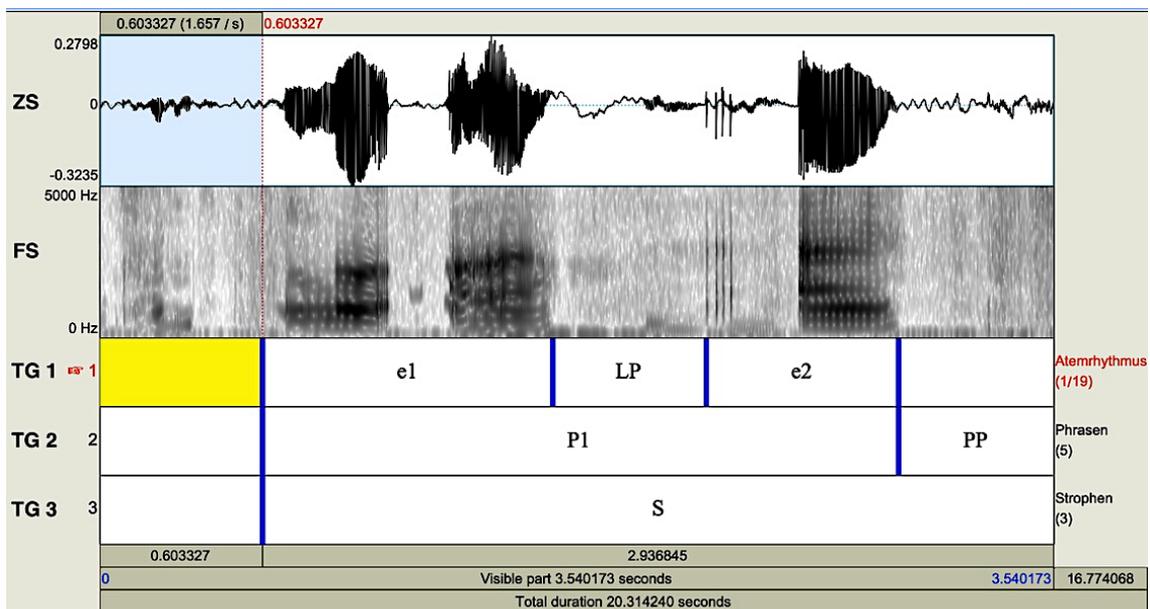


Abbildung 6: Ausschnitt der Phrase 1 (P1) – roter Rahmen in Abbildung 5.

Legende: e(n) = E-Vokalisationen, FS = Frequenzspektrum, LP = Lautpause, P(n) = Phrasen, PP = Phrasenpause, S = Strophe, TG(n) = Textgrid, ZS = Zeitspektrum.

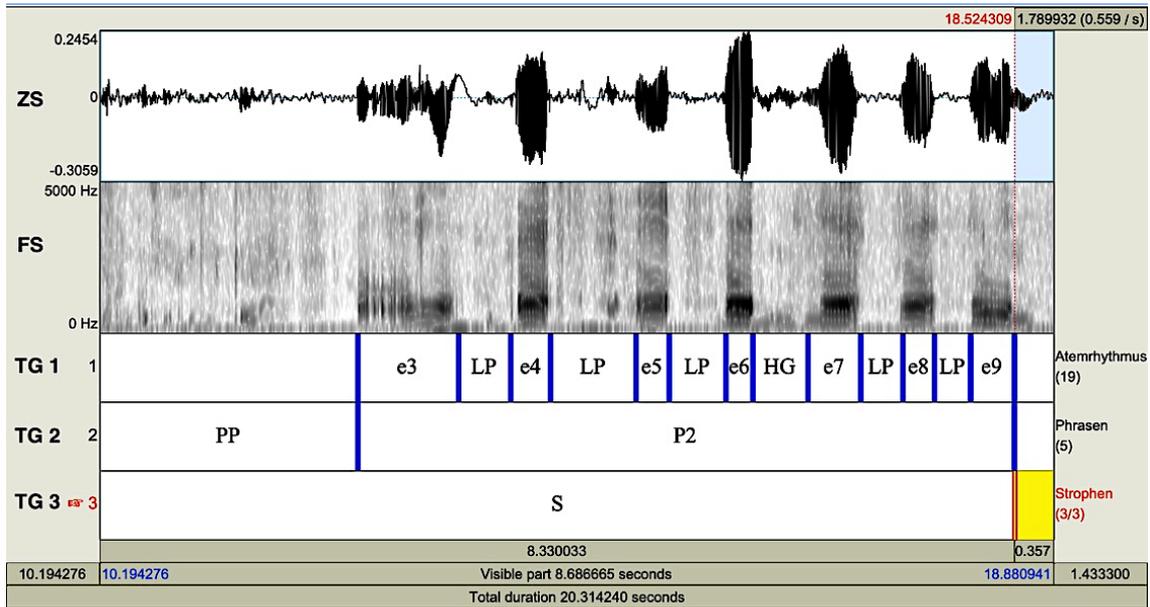


Abbildung 7: Ausschnitt der Phrase 2 (P2) – grüner Rahmen in Abbildung 5.

Legende: e(n) = E-Vokalisationen, FS = Frequenzspektrogramm, LP = Lautpause, P(n) = Phrasen, PP = Phrasenpause, S = Strophe, TG(n) = Textgrid, ZS = Zeitspektrogramm.

Die Gesamtzeitdauer der analysierten Lautaufnahmen betrug ca. 3,6 Stunden. Diese Aufnahmen wurden für die audio-visuelle Analyse in 161 Langserien mit einer Gesamtzeitdauer von ca. 107 Minuten gegliedert. Nach der Durchführung dieser Arbeitsschritte wurden die bearbeiteten Audio-Dateien mit den dazugehörigen Textgrids in einem separaten Ordner abgespeichert. Die Ergebnisse sind auf diese Weise reproduzierbar. Die genauen Angaben zur Datenbasis finden sich im folgenden Kapitel.

2.7 Datenauswertung

2.7.1 Datenbasis

In Tabelle 5 ist die Anzahl der Langserien, Phrasen und E-Vokalisationen pro Proband dargestellt. Die Lautaufnahmen der gesamten Probandengruppe wurden in 161 Langserien mit 236 Phrasen gegliedert.

Die Auswertung umfasste 1.489 E-Vokalisationen, wovon 842 (56,5 %) von den Probanden der KG und 647 (43,5 %) von den Probanden der PG stammen. Von einem Probanden der KG wurden durchschnittlich 52,6 Laute analysiert, von einem Probanden der PG durchschnittlich 80,9 Laute.

Betrachtet man die gesamte Probandengruppe, so enthält eine Phrase zwischen 2 und 48 Komfortlauten. Der Durchschnittswert liegt bei 6,31 Lauten pro Phrase.

Die Phrase mit der höchsten Anzahl an Komfortlauten ($N = 48$) tritt in der PG auf, während die maximale Anzahl an Lauten in einer Phrase der KG $N = 34$ beträgt. Im Durchschnitt enthält eine Phrase in der KG 6,03 Komfortlaute, in der PG 6,74.

Tabelle 5: Datenbasis

Legende: KG = Kontrollgruppe; PG = Patientengruppe.

| Gruppe | Proband | Alter bei Aufnahme [Tage] | Anzahl Langserien | Anzahl Phrasen | Anzahl E-Vokalisationen |
|--------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--|
| KG | AA | 65 | 7 | 7 | 32 |
| | AB | 62 | 9 | 20 | 85 |
| | | 63 | 4 | 14 | 53 |
| | | 64 | 13 | 16 | 72 |
| | | 79 | 8 | 12 | 106 |
| | | AC | 82 | 2 | 2 |
| | AD | 99 | 2 | 4 | 19 |
| | AE | 106 | 7 | 11 | 72 |
| | AF | 109 | 5 | 6 | 35 |
| | AG | 113 | 3 | 4 | 12 |
| | AH | 116 | 1 | 1 | 6 |
| | AI | 120 | 3 | 5 | 15 |
| | AJ | 124 | 3 | 4 | 20 |
| | AK | 125 | 4 | 7 | 67 |
| | AL | 131 | 2 | 3 | 13 |
| | AM | 131 | 5 | 6 | 113 |
| | AN | 132 | 6 | 7 | 40 |
| | AO | 134 | 6 | 6 | 51 |
| | AP | 149 | 3 | 5 | 21 |
| | | Σ KG | / | 93 | 140 |
| PG | BA | 79 | 8 | 14 | 173 |
| | BB | 88 | 7 | 11 | 39 |
| | BC | 98 | 3 | 4 | 20 |
| | BD | 72 | 3 | 6 | 54 |
| | | 128 | 10 | 10 | 51 |
| | BE | 105 | 6 | 10 | 31 |
| | BF | 108 | 10 | 8 | 53 |
| | BG | 111 | 8 | 17 | 114 |
| | BH | 103 | 3 | 5 | 22 |
| | | 145 | 10 | 11 | 90 |
| | Σ PG | / | 68 | 96 | 647 |
| Gesamtsumme | | / | 161 | 236 | 1.489 |

2.7.2 Beschreibung der untersuchten Messgrößen

Im ersten Schritt der Datenauswertung wurden mithilfe eines speziellen PRAAT-Skriptes (s. 2.6.2.2) die Zeiten der annotierten Abschnitte entsprechend ihrer Annotation aus dem Originalzeitsignal ermittelt und automatisch in Excel-Tabellen (Microsoft Excel Version 16.30, 2019) abgespeichert. Für jede annotierte Langserie gab es eine Zeitentabelle (Timetable). Die einzelnen Zeitentabellen wurden dann routinemäßig im ZVES-Labor zu einer Gesamttabelle zusammengestellt. Die weitere Auswertung dieser Gesamtzeitentabelle erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS (Superior Performing Software System, Version 25.0). In Tabelle 6 sind die Messgrößen aufgelistet, die zur Analyse der temporalen und rhythmischen Lauteigenschaften verwendet wurden.

Tabelle 6: Messgrößen zur Analyse der temporalen und rhythmischen Lauteigenschaften

| Messgröße | Definition [Einheiten] |
|-----------|--|
| tP | Phrasenlänge: Länge der einzelnen Phrasen [s] |
| tE | Länge einer E-Vokalisation [ms] |
| tZP | Länge einer Zwischenpause [ms] |
| tIOI | Länge von IOI ($tIOI_1 = tE_1 + tZP_1$) [ms] |
| nPVI | Normierter paarweiser Variabilitätsindex (Formel s.u.) |

Bei der Erstellung der Messgröße „tIOI“ orientierte sich die Autorin an einer Arbeit zur Messung der rhythmischen Komplexität von Ravignani und Norton (2017). Um die Rhythmik von Lautsequenzen untersuchen zu können, wurde hier ein zeitliches Intervall, das „Inter-Onset-Interval“ (IOI), berechnet. Ein IOI wird in der Analyse von Lautsequenzen als die Zeit zwischen dem Beginn eines Lauts (E-Vokalisation) und dem Beginn des nächsten Lauts definiert. Ein Histogramm aller IOIs kann Aufschluss über die rhythmische Struktur einer Lautsequenz geben. Eine geringe Varianz der Werte spricht dabei für eine isochrone Struktur der Sequenz (Ravignani et al., 2017).

In der vorliegenden Arbeit (s. Abbildung 8) entspricht ein IOI der Summe aus der Länge einer E-Vokalisation (tE) und der jeweils nachfolgenden Zwischenpausenlänge (tZP).

In Abbildung 8 werden die Inter-Onset-Intervalle mit den dazugehörigen Textgrids veranschaulicht.

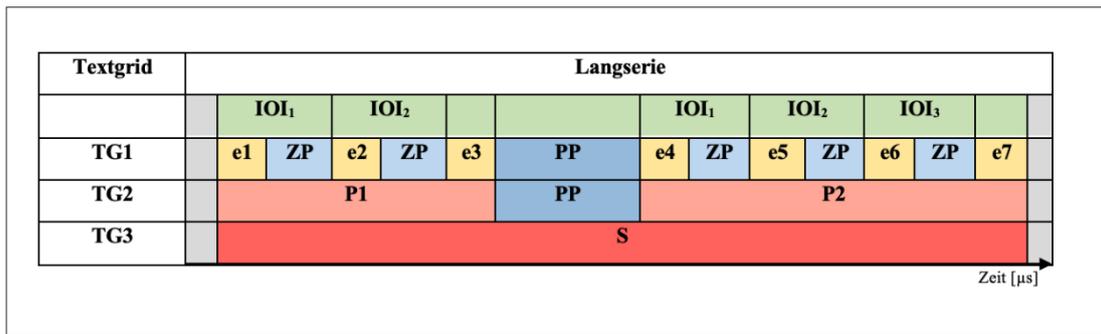


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Inter-Onset-Intervalle (IOI) in einer Langserie

Legende: e = E-Vokalisation; IOIn = Inter-Onset-Intervall aus e(n) und jeweils nachfolgender ZP; P = Phrase; PP = Phrasenpause; S = Strophe; ZP = Zwischenpause.

Zur besseren Charakterisierung der rhythmischen Struktur wurde der normierte paarweise Variabilitätsindex (engl. normalized pairwise variability index, nPVI) berechnet. Die Entwicklung des nPVI diente ursprünglich der Messung der zeitlichen Variabilität von aufeinanderfolgenden Sequenzen, um verschiedene Sprechrhythmen miteinander vergleichen zu können (Grabe et al., 2005). Er wird wie folgt berechnet:

$$nPVI = \frac{100}{n - 1} \left[\left| \frac{IOI_2 - IOI_1}{\frac{IOI_2 + IOI_1}{2}} \right| + \dots + \left| \frac{IOI_n - IOI_{n-1}}{\frac{IOI_n + IOI_{n-1}}{2}} \right| \right]$$

Abbildung 9: Berechnung des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI), Formel nach Ravignani und Norton (2017)

Legende: IOI(n) = Inter-Onset-Intervall, nPVI = normierter paarweiser Variabilitätsindex.

2.7.3 Reliabilität

Um die Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit der errechneten Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Annotationen für einen Teil der Sequenzen nach zwölf Monaten nochmalig vorgenommen und mit den in der statistischen Auswertung verwendeten Originalwerten verglichen. Hierzu wurden aus jeder Probandengruppe (KG und PG) fünf Probanden zufällig ausgewählt. Das Geschlecht wurde dabei so gewählt, dass aus jeder Gruppe drei männliche und zwei weibliche Säuglinge vertreten waren, da in beiden Gruppen die Anzahl an männlichen Probanden überwog. Insgesamt wurden auf diese Weise für 170 Paare an Messwerten die mittlere Differenz sowie die Standardabweichung berechnet. Dabei zeigte sich ein mittlerer Zeitunterschied für die verglichenen Messgrößen tP, tIOI, tE und tZP von 0,00160s, die Standardabweichung beträgt 0,02026s. Die erhaltenen Mittelwerte und ihre dazugehörigen

Standardabweichungen werden bei der späteren Interpretation der Messergebnisse als Messgenauigkeitsgrenze berücksichtigt.

Tabelle 7: Messungen zur Reliabilitätsprüfung für die Messgrößen tP, tIOI, tE und tZP.

Legende: SD=Standardabweichung; tE = Länge einer E-Vokaliastion; tIOI = Länge eines Inter-Onset-Intervalls; tP = Phrasenlänge; tZP = Länge einer Zwischenpause.

| | tP | tIOI | tE | tZP | Arithmetisches Mittel |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|------------|------------------------------|
| Mittlere Differenz [s] | 0,00174 | 0,00175 | 0,00057 | 0,00232 | 0,00160 |
| SD [s] | 0,01343 | 0,01716 | 0,02361 | 0,02683 | 0,02026 |

2.7.4 Statistische Analyse

Die statistische Analyse der oben beschriebenen Messgrößen erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS (Superior Performing Software System Version 25.0).

Die beiden untersuchten Gruppen (KG und PG) wurden als unabhängige Stichproben betrachtet. Die einzelnen Messungen am selben Aufnahmetag bzw. am gleichen Probanden an verschiedenen Aufnahmetagen stellen abhängige Stichproben dar.

Die statistische Analyse erfolgte auf verschiedenen Ebenen. Zunächst wurde die deskriptive Analyse für jede Messgröße sowohl für die gesamte Probandengruppe als auch separat für die beiden Gruppen KG und PG durchgeführt. Als grafische Darstellung für die Analyseschritte wurden Histogramme, Streudiagramme und Box-Whisker-Plots gewählt.

Das Boxplot-Diagramm dient der grafischen Veranschaulichung von Minimum, Maximum und Median sowie der 25%- und 75%-Perzentile. In der Box liegen die mittleren 50% des Datensatzes.

Zur besseren Einschätzung potenzieller Entwicklungsverläufe der verschiedenen Messgrößen, wurde in den Streudiagrammen eine Loess-Kurve mit dem einheitlichen Glättungsparameter 80% erstellt.

Um eine geeignete Analyse der spezifischen Datenstruktur der vorliegenden Arbeit zu gewährleisten, musste eine komplexe statistische Analyse angewendet werden. Hierzu hat die Autorin der vorliegenden Arbeit an der „Statistik-Akademie“ der Statistikerin

Daniela Keller teilgenommen und sich bezüglich der Eignung der hier verwendeten Methoden als auch deren Anwendung auf die spezifischen Daten beraten lassen. Anhand dieser Beratung wurden alle Analysen von der Autorin der vorliegenden Arbeit selbstständig durchgeführt.

Für die multifaktorielle Analyse ist die Autorin wie folgt vorgegangen: Ein Gruppenunterschied bezüglich einer Messgröße kann sowohl durch feste Effekte (fixed effects) als auch durch zufällige Effekte (random effects) beeinflusst werden. Die festen Effekte entsprechen meist den zu prüfenden Einflussfaktoren, wie hier beispielsweise der Faktor „Hörbeeinträchtigung“ (Gruppe PG) oder „gesundes Hörvermögen“ (Gruppe KG). Diese festen Effekte könnten auch mit den klassischen Methoden (z.B. T-Test oder ANOVA) untersucht werden. Hierbei können jedoch nicht die zufälligen Effekte (random effects) wie die hier vorliegende hierarchische Datenstruktur berücksichtigt werden. Beispielsweise kann die Tatsache, dass ein Proband an mehreren Aufnahmetagen aufgenommen wurde, Einfluss auf die Messgrößen haben. Aus diesem Grund ergibt sich die Notwendigkeit der Anwendung eines gemischtes Mehrebenenmodells. Eine Modellierung ermöglicht im Gegensatz zu den klassischen Methoden die Anpassung an reale Probandendaten und somit die Repräsentation subjekt-spezifischer Effekte.

Zur Verdeutlichung stellt Abbildung 10 die hier vorliegende hierarchische Datenstruktur dar. Das Element „Gruppe“ stellt, wie oben erläutert, den festen Effekt dar und wird deshalb keiner Ebene zugeordnet.

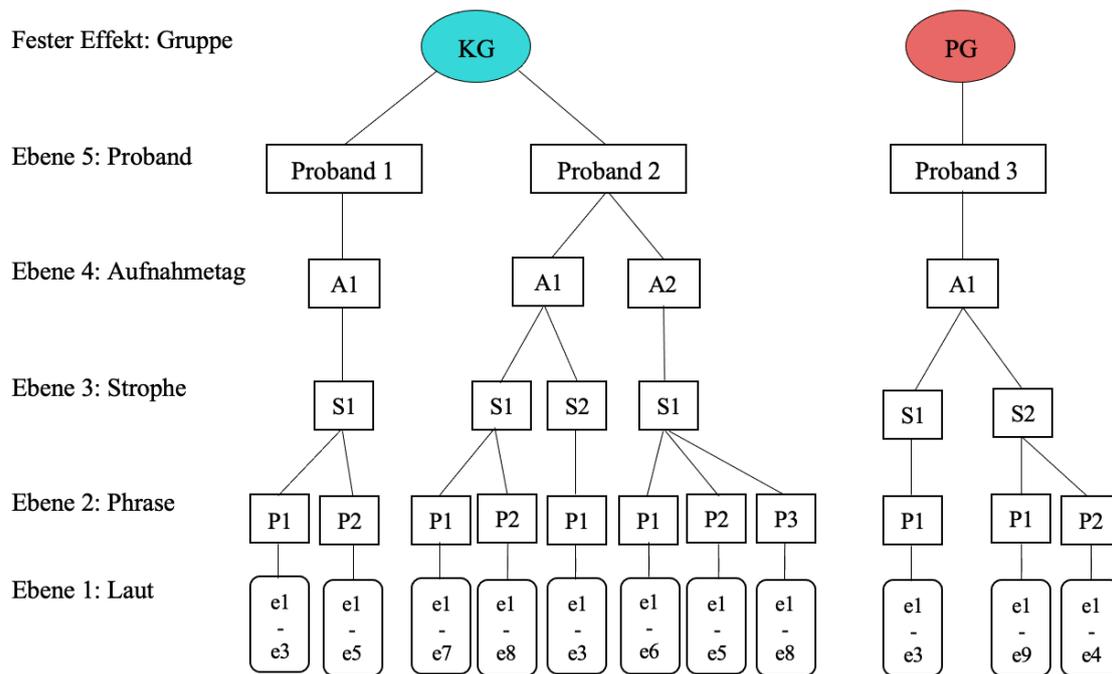


Abbildung 10: Darstellung der hierarchischen 5-Ebenenstruktur (eigene Darstellung)

Legende: A = Aufnahme-tag; e = e-Vokalisation; KG = Kontrollgruppe; P = Phrase; PG = Patientengruppe; S = Strophe.

Um die Notwendigkeit der Anwendung gemischter Mehrebenenmodelle in der Datenanalyse abzuschätzen, eignet sich die Methode der Intraklassen-Korrelation. Das dazugehörige Maß ist der sogenannte Intraklassen-Korrelationskoeffizient (engl.: intraclass correlation coefficient, ICC) (Hox, 2010; Rabe-Hesketh et al., 2012; Wirtz et al., 2002). Wenn der ICC den Wert 1 annimmt, sind alle Beobachtungen innerhalb der Gruppen identisch und somit die Unterschiede zwischen den Gruppen auf die nächsthöhere Ebene zurückzuführen. Sind sich umgekehrt die Beobachtungen innerhalb einer Gruppe nicht ähnlicher als Beobachtungen zwischen den Gruppen, nimmt der ICC den Wert 0 an. In einem solchen Fall würde nicht zwingend ein Mehrebenenmodell benötigt werden. Lee nennt dabei eine Grenze von 0,1 für den ICC, ab dem eine hierarchische Struktur berücksichtigt werden muss (Lee, 2000). In der hier vorliegenden Arbeit lagen alle ICC-Werte der Messgrößen, die in hierarchischen Strukturen vorlagen, über dem Wert 0,1, weshalb die Anwendung eines Mehrebenenmodells für diese Messgrößen notwendig wurde.

Zur Beschreibung hierarchischer Modelle dient die sukzessive Erweiterung klassischer linearer Modelle, sodass schließlich das hierarchische Modell mit Prädiktoren auf allen

Modellebenen entsteht. In der praktischen Anwendung ergeben sich auf diese Weise mehrere Modelle mit Kovariablen in differenten Zusammenstellungen. Hiervon sollte die Modellschätzung mit der besten Anpassungsgüte favorisiert werden. Als Gütekriterium zur Modellauswahl, mithilfe dessen verschiedene Modelle für eine Messgröße verglichen werden können, dient das Akaike Informationskriterium (AIC). Dabei kann ein kleinerer AIC-Wert auf eine erfolgreichere Repräsentation der Daten durch die Modellschätzung zurückgeführt werden, da ein niedriger AIC-Wert für einen geringeren Abstand zwischen den reellen Daten und dem geschätzten Wert steht (Fahrmeir et al., 2013).

Um die Voraussetzungen für lineare Mehrebenenmodelle zu erfüllen, erfolgte die Prüfung der metrischen Messgrößen und der berechneten Residuen auf Linearität und Normalverteilung (mithilfe von Q-Q-Plots). Lag keine Normalverteilung vor, konnte ggf. durch Transformation der Daten (z.B. Logarithmieren; Bildung des Kehrwerts) eine annähernde Normalverteilung erreicht werden.

Falls für eine Messgröße pro Kombination Proband-Aufnahmetag-Phrase nur ein Messwert vorlag, konnte auf die Abbildung hierarchischer Strukturen und somit auf die Anwendung eines Mehrebenenmodells verzichtet werden. Dies wurde zudem durch einen ICC-Wert $< 0,1$ bestätigt. In diesen Fällen wurde bei normalverteilten Messgrößen die Signifikanzprüfung bei zwei unabhängigen Variablen mittels einfaktorieller Varianzanalyse durchgeführt (mittels T-Test).

Das Signifikanzniveau aller hier durchgeführten Tests lag bei $p \leq 0,05$.

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der Phrasenlängen (tP)

In Tabelle 8 ist die deskriptive Analyse aller Phrasenlängen für die gesamte Probandengruppe und gruppenspezifisch dargestellt. Die Variationsbreite aller Phrasenlängen lag zwischen 0,93s und 81,76s. Die Variationsbreite der Phrasenlängen war zwischen KG und PG ähnlich (s. Tabelle 8).

In Abbildung 11 sind die Verteilungseigenschaften aller untersuchten Phrasenlängen dargestellt. Der Modalwert der Verteilung liegt zwischen 0s und 10s.

Tabelle 8: Deskriptive Analyse der Phrasenlängen (tP) [s]

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max=Maximum, Min=Minimum, MW=arithmetischer Mittelwert, N=Anzahl, PG = Patientengruppe, SD=Standardabweichung.

| | N [dimensionslos] | MW [s] | SD [s] | Median [s] | Min [s] | Max [s] |
|---------------|-----------------------------|------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| KG | 140 | 15,37 | 13,29 | 12,15 | 0,93 | 75,31 |
| PG | 96 | 15,72 | 16,41 | 11,21 | 1,38 | 81,76 |
| Gesamt | 236 | 15,51 | 14,60 | 11,85 | 0,93 | 81,76 |

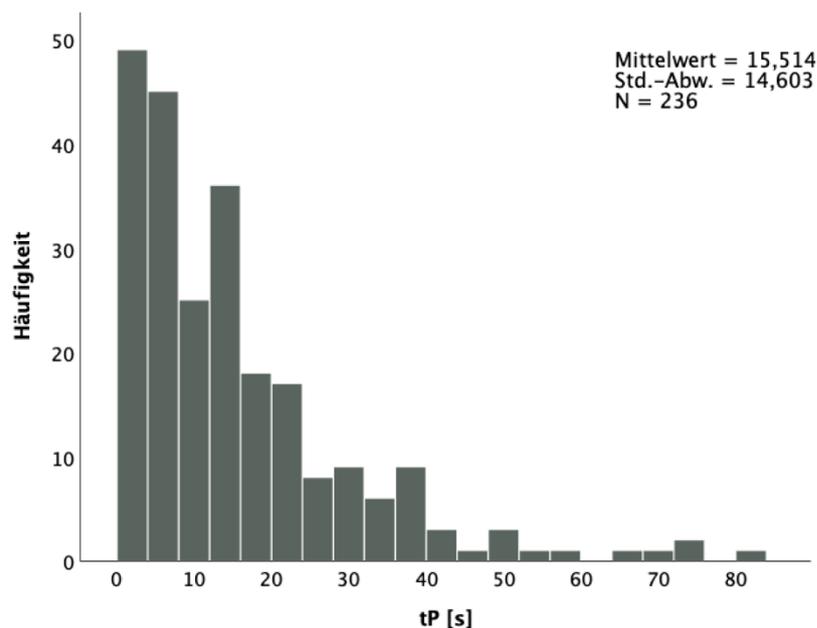


Abbildung 11: Histogramm der Phrasenlängen der gesamten Probandengruppe

Legende: N = Anzahl der Phrasen; Std.-Abw. = Standardabweichung; tP = Phrasenlängen.

Die Häufigkeitsverteilung der Phrasenlängen ist in Abbildung 12 und in Abbildung 13 separat für die Gruppen KG und PG dargestellt. Der Modalwert liegt in beiden Gruppen zwischen 0 und 5s, allerdings sind die nachfolgenden Zeitintervalle („bins“, engl.) bis 20s deutlich geringer besetzt in der PG.

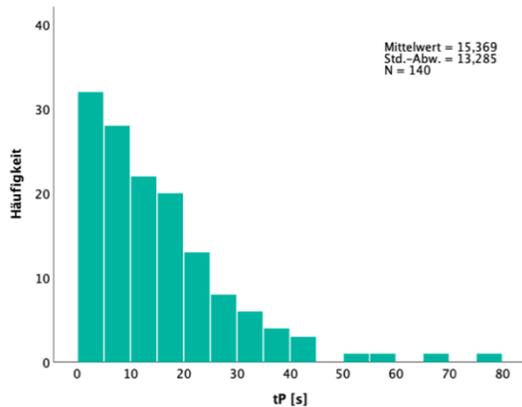


Abbildung 12: Histogramm der Phrasenlängen der Kontrollgruppe

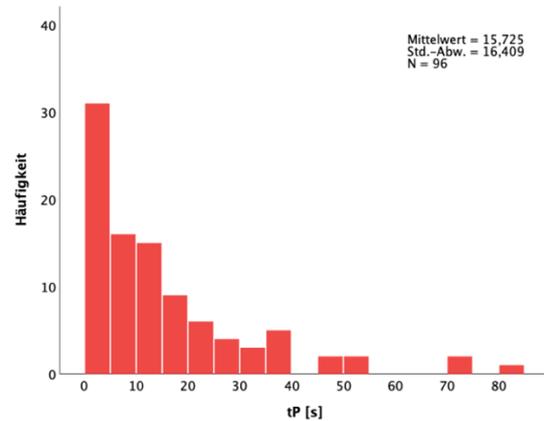


Abbildung 13: Histogramm der Phrasenlängen der Patientengruppe

Legende: N = Anzahl der Phrasen; Std.-Abw. = Standardabweichung; tP = Phrasenlängen.

Durch eine logarithmische Transformation der Werte konnte eine annähernde Normalverteilung für die Messgröße tP hergestellt werden (s. Abbildung 32 im Anhang). Die beiden in Tabelle 15 dargestellten finalen Modelle konnten zeigen, dass weder das Alter in Tagen (p-Wert = 0,434), noch die Gruppe (p-Wert = 0,780) bzw. die Interaktion zwischen Gruppe und Alter (p-Wert = 0,076) einen Einfluss auf die Phrasenlänge hatten. Somit fanden sich keine signifikanten Unterschiede der Bezugsgröße „Phrasenlänge“ zwischen den Gruppen KG und PG. Für alle hier aufgeführten Modelle waren die Voraussetzungen (Normalverteilung, Linearität, Homoskedastizität) erfüllt (s. Abbildung 33 bis Abbildung 36 im Anhang). Die jeweilige Entwicklung des AIC-Werts für die verschiedenen Modellebenen ist für beide Modelle im Anhang in Tabelle 30 dargestellt. In beiden Fällen erbrachte das Modell mit der Ebene „Proband“ den kleinsten AIC-Wert und wurde aus diesem Grund als finales Modell ausgewählt (s. Tabelle 30 im Anhang).

Tabelle 9: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße tP [s] für die gesamte Probandengruppe

Legende: Alter = Alterseffekt; Gruppe * Alter = Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt; Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | Modell 1 | | | Modell 2 | |
|---|------------|---------|---------|------------|--------|
| | Konstanter | Alter | Gruppe | Konstanter | Gruppe |
| | Term | | * Alter | Term | |
| Schätzung fester Parameter | 1,123 | -0,002 | 0,005 | 0,947 | 0,015 |
| Bootstrap Verzerrung | 0,020 | -0,0002 | 0,001 | -0,004 | 0,002 |
| Standardfehler | 0,227 | 0,002 | 0,003 | 0,045 | 0,059 |
| p-Wert: Signifikanz | 0,001 | 0,434 | 0,076 | 0,001 | 0,780 |
| 95% Untergrenze | 0,718 | -0,006 | 0,0006 | 0,852 | -0,091 |
| Konfidenzintervall Obergrenze | 1,60 | 0,002 | 0,012 | 1,035 | 0,132 |
| des Parameter- schätzers | | | | | |

Angaben zu den Modellen:

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße tP [s]; Modellebenen: Proband

Modell 1:

AIC-Wert1: 274,147

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,035; Bootstrap: Verzerrung = 0,019; Standardfehler = 0,020; Signifikanz = 0,010; 95%

Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,021, Obergrenze = 0,098

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

Modell 2:

AIC-Wert2: 272,336

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,031; Bootstrap: Verzerrung = -0,019; Standardfehler = 0,018; Signifikanz = 0,011;

95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,018, Obergrenze = 0,088

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

3.2 Analyse der Länge der E-Vokalisationen (tE)

Die Ergebnisse der deskriptiven Analyse aller analysierten expiratorischen Komfortvokalisationen sind in Tabelle 10 dargestellt. Die Vokalisationslängen liegen in der gesamten Probandengruppe zwischen 33ms und 6s.

Tabelle 10: Deskriptive Analyse der Länge der E-Vokalisationen (tE) [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max=Maximum, Min=Minimum, MW=arithmetischer Mittelwert, N=Anzahl, PG = Patientengruppe, SD=Standardabweichung.

| | N [dimensionslos] | MW [ms] | SD [ms] | Median [ms] | Min [ms] | Max [ms] |
|---------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| KG | 844 | 1.103,52 | 745,57 | 949,10 | 40,40 | 5.212,00 |
| PG | 647 | 950,48 | 757,16 | 727,50 | 33,20 | 6.199,50 |
| Gesamt | 1.491 | 1.037,02 | 754,20 | 825,00 | 33,20 | 6.199,50 |

Abbildung 14 verdeutlicht die Verteilungseigenschaften der Vokalisationslängen der gesamten Probandengruppe mithilfe eines Histogramms. In 50% der hier analysierten Fälle liegt die Vokalisationslänge zwischen 493ms und 1.351ms. In 10,1 % der analysierten Fälle erreichen die Vokalisationslängen Werte, die größer als 2 s sind. In nur 2,2% der analysierten Fälle sind die Vokalisationslängen in der gesamten Probandengruppe länger als 3 s.

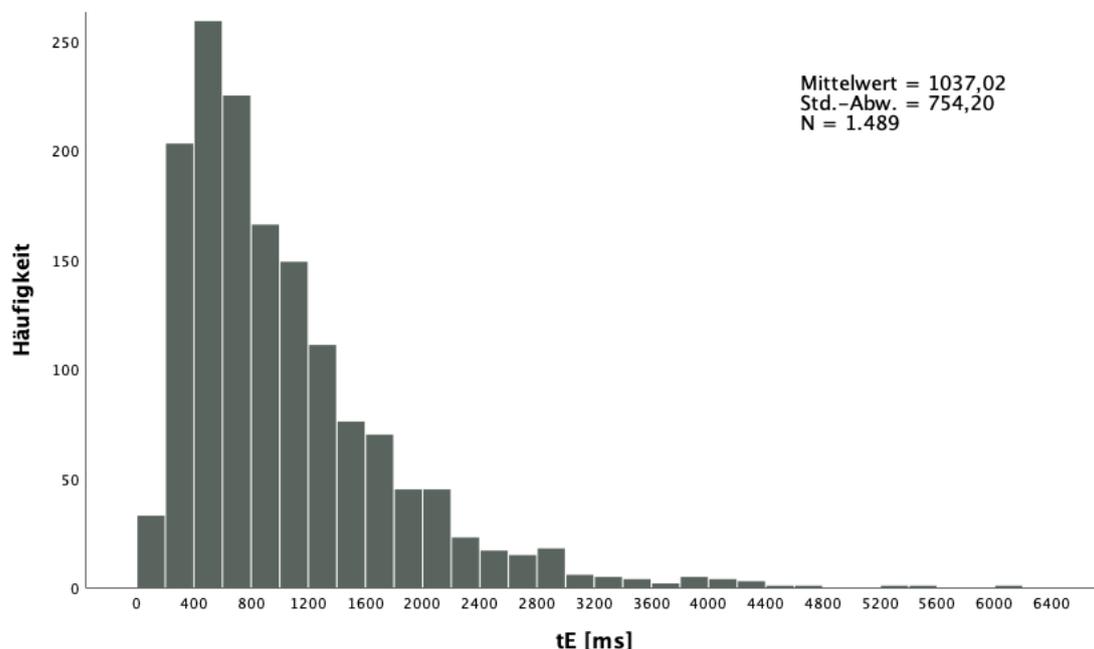


Abbildung 14: Histogramm der Vokalisationslängen (tE) der gesamten Probandengruppe

Legende: N = Anzahl der E-Vokalisationen; Std.-Abw. = Standardabweichung; tE = Vokalisationslänge.

Die folgenden zwei Histogramme (s. Abbildung 15 und Abbildung 16) stellen die Häufigkeitsverteilungen der Vokalisationslängen der Komfortlaute jeweils für die zwei Gruppen KG und PG dar. Der Modalwert in der KG befindet sich zwischen 400 und 600ms, in der PG zwischen 400 und 800ms. In der KG sind 11,6 % der analysierten Fälle länger als 2.000ms, in der PG 8,0 %.

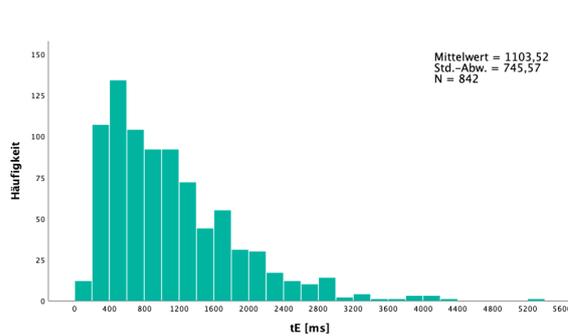


Abbildung 15: Histogramm der Vokalisationslängen (tE) der Kontrollgruppe

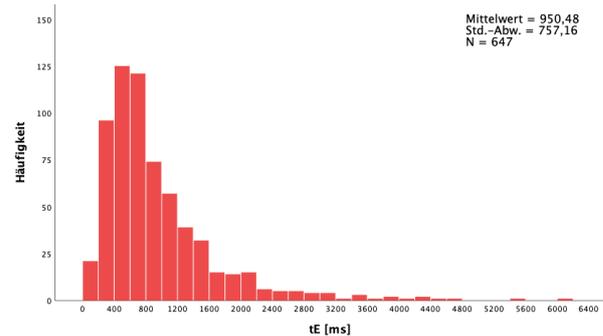


Abbildung 16: Histogramm der Vokalisationslängen (tE) der Patientengruppe

Legende: N = Anzahl der Phrasenlängen; Std.-Abw. = Standardabweichung; tP = Phrasenlängen.

In Abbildung 17 ist die Vokalisationslänge der Komfortlaute (tE) an den einzelnen Aufnahmetagen im Altersverlauf in einem Streudiagramm dargestellt. Die für jede Gruppe angepasste Loess-Kurve zeigt eine Abnahme der Vokalisationslängen im Altersverlauf für die KG, während die Vokalisationslängen in der PG im Altersverlauf zunehmen. Im Streudiagramm sind die Vokalisationslängen der KG im Alter bis 121 Tage tendenziell länger als die der PG, während sie ab einem Alter von 122 Tagen tendenziell kürzer als die der PG sind. Anhand des Schnittpunkts der Loess-Kurven im Streudiagramm wurde der Grenzwert zur Einteilung in zwei Altersgruppen gewählt, sodass die erste Altersgruppe alle Probanden bis zu einem Alter von 121 Tagen und die zweite Altersgruppe alle Probanden ab einem Alter von 122 Tagen einschloss. Die deskriptive Analyse in Tabelle 11 stellt die Vokalisationslängen mit Aufteilung in diese zwei Altersgruppen dar. Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 18 veranschaulicht die Gruppenunterschiede zwischen KG und PG für jede der beiden Altersgruppen.

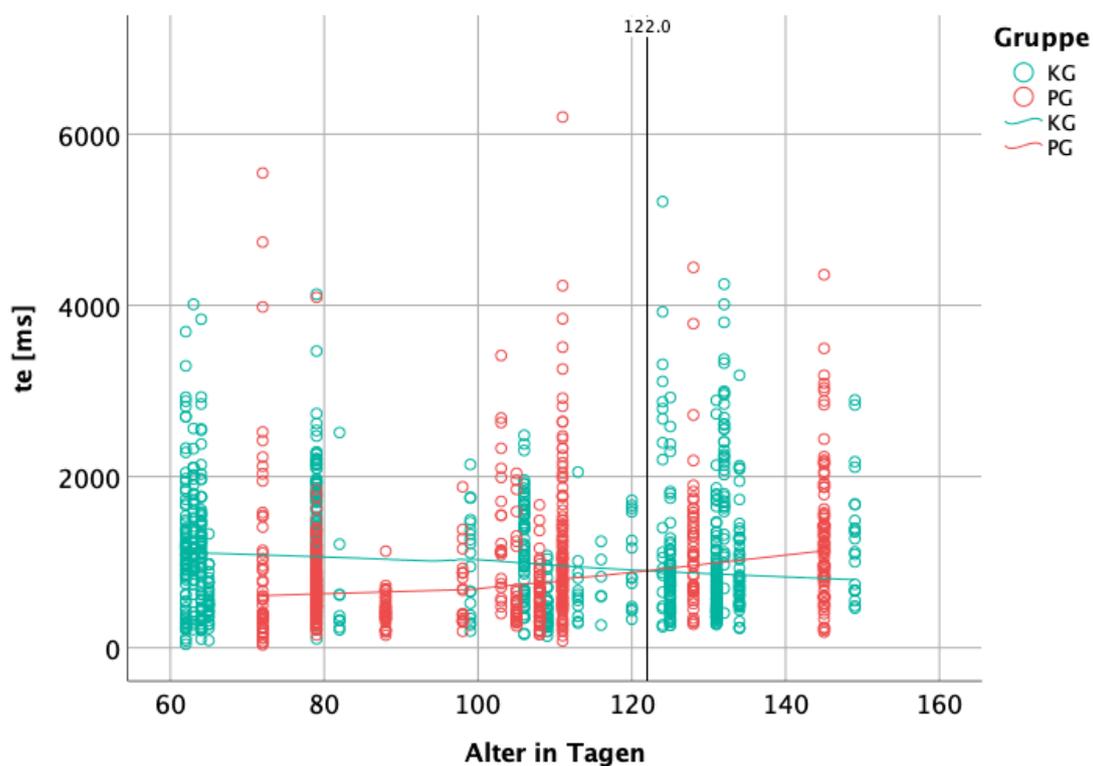


Abbildung 17: Streudiagramm zur Darstellung des Alterseffekts der Messgröße tE [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

Tabelle 11: Deskriptive Analyse von tE [ms] mit Aufteilung in zwei Altersgruppen (≤ 121 und ≥ 122 Tage)

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max=Maximum, Min=Minimum, MW=arithmetischer Mittelwert, N=Anzahl, PG = Patientengruppe, SD=Standardabweichung.

| | | N [dimensionslos] | MW [ms] | SD [ms] | Median [ms] | Min [ms] | Max [ms] |
|---|---------------|----------------------|------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| Alter ≤ 121 Tage | KG | 515 | 1.119,84 | 689,55 | 1.061,10 | 40,40 | 4.130,00 |
| | PG | 506 | 857,60 | 719,16 | 671,20 | 33,20 | 6.199,50 |
| | Gesamt | 1.021 | 989,87 | 716,16 | 797,60 | 33,20 | 6.199,50 |
| Alter ≥ 122 Tage | KG | 327 | 1.077,81 | 826,59 | 779,90 | 230,90 | 5.212,00 |
| | PG | 141 | 1.283,80 | 797,90 | 1.140,40 | 181,30 | 4.442,90 |
| | Gesamt | 468 | 1.139,87 | 822,66 | 872,80 | 181,30 | 5212,00 |

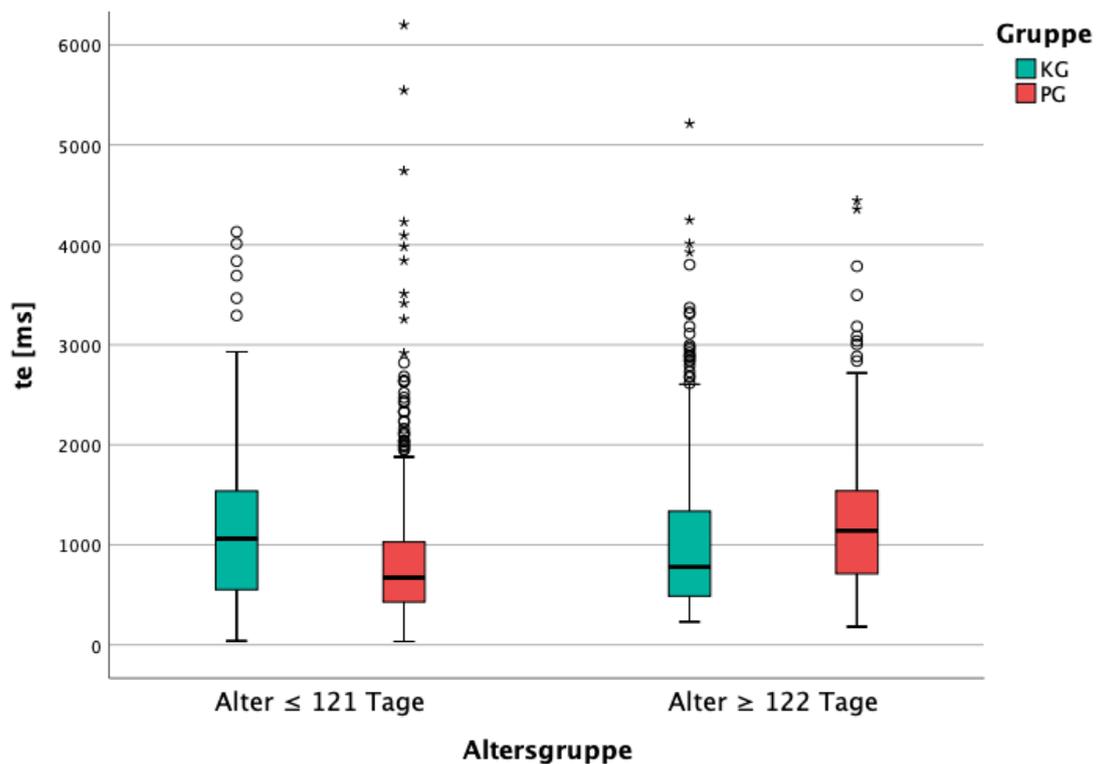


Abbildung 18: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der altersabhängigen Gruppeneffekte der Messgröße tE [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

Für die Signifikanztestung der hier beobachteten Gruppenunterschiede wurde durch eine logarithmische Transformation der Werte eine annähernde Normalverteilung für die Messgröße tE hergestellt (s. Abbildung 37 im Anhang). Da sich die Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt im gemischten Modell als statistisch signifikant (p -Wert = 0,002) erwies (s. Tabelle 12), durfte der Gruppeneffekt (Zugehörigkeit zur Gruppe KG bzw. PG) nicht für die gesamte Probandengruppe betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde jeweils ein einzelnes Modell für jede Altersgruppe gerechnet. Für alle hier aufgeführten Modelle waren die Voraussetzungen (Normalverteilung, Linearität, Homoskedastizität) erfüllt (s. Abbildung 38 - Abbildung 43 im Anhang). Die jeweilige Entwicklung des AIC-Werts ist für jedes Modell im Anhang in Tabelle 31 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für beide Altersgruppen das Modell mit den zwei Ebenen „Proband und Aufnahmetag“ ausgewählt. Dieses erbrachte für die Altersgruppe bis 121 Tage den kleinsten AIC-Wert (s. Tabelle 13 und Tabelle 31 im Anhang) und war somit in dieser Gruppe am besten geeignet. Für die Altersgruppe ab 122 Tagen existierte noch ein etwas besser geeignetes Modell, das nur mit der Ebene „Proband“ aufgebaut wurde (AIC-Wert = 72,13; p -Wert = 0,085, s. Tabelle 31 im Anhang). Aufgrund des sehr ähnlichen p -Werts zum finalen Modell (s. Tabelle 14) veränderte dies jedoch nichts an der Interpretation der Ergebnisse.

Das finale Modell für die Altersgruppe bis 121 Tage zeigte, dass die Unterschiede zwischen KG und PG statistisch signifikant sind (p -Wert = 0,006, s. Tabelle 13). Somit sind die logarithmierten Vokalisationslängen in der Altersgruppe bis 121 Tage in der KG länger als in der PG. Obwohl die deskriptive und grafische Analyse ab einem Alter von 122 Tagen tendenziell kürzere Vokalisationslängen der KG im Vergleich zur PG zeigte (s. Tabelle 11, Abbildung 17 und Abbildung 18), konnte das finale Modell keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen KG und PG nachweisen (p -Wert = 0,087, s. Tabelle 14).

Tabelle 12: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße tE [ms] für die gesamte Probandengruppe

Legende: Alter = Alterseffekt (Altersgruppe ≤ 121 und Altersgruppe ≥ 122 Tage); Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe); Gruppe * Alter = Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt

| | Konstanter | Gruppe | Alter | Gruppe * |
|---------------------------------------|------------|--------|--------|----------|
| | Term | | | Alter |
| Schätzung fester Parameter | 2,376 | 0,490 | 0,005 | -0,004 |
| Verzerrung | 0,010 | -0,012 | 0,000 | 0,000 |
| Standardfehler | 0,087 | 0,101 | 0,001 | 0,001 |
| p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | <0,001 | 0,001 | <0,001 | 0,002 |
| 95% Konfidenzintervall | | | | |
| des Parameterschätzers | | | | |
| Untergrenze | 2,243 | 0,214 | 0,003 | -0,005 |
| Obergrenze | 2,608 | 0,644 | 0,006 | -0,001 |

Angaben zum Modell:

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße te [ms]; Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit
AIC-Wert: 461,01

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,019; Bootstrap: Verzerrung = 0,002; Standardfehler = 0,003; Signifikanz = <0,001; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,016, Obergrenze = 0,027

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 5.000 Bootstrap-Stichproben.

Tabelle 13: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße tE [ms] für die Altersgruppe ≤ 121 Tage

Legende: Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | Konstanter Term | Gruppe |
|---------------------------------------|-----------------|--------|
| Schätzung fester Parameter | 2,809 | 0,083 |
| Verzerrung | 0,026 | -0,010 |
| Standardfehler | 0,042 | 0,029 |
| p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | <0,001 | 0,006 |
| 95% Konfidenzintervall | | |
| des Parameterschätzers | | |
| Untergrenze | 2,781 | 0,013 |
| Obergrenze | 2,927 | 0,124 |

Angaben zum Modell:

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße te [ms]; Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit
AIC-Wert: 383,69

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,018; Verzerrung = 0,001; Standardfehler = 0,003; Signifikanz = <0,001; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,013, Obergrenze = 0,026

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 8.000 Bootstrap-Stichproben.

Tabelle 14: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße tE [ms] für die Altersgruppe ≥ 122 Tage

Legende: Gruppe: Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | | Konstanter Term | Gruppe | |
|------------------|---------------------------------------|--------------------|--------|--------|
| Bootstrap | Schätzung fester Parameter | 3,024 | -0,050 | |
| | Verzerrung | 0,000 | 0,000 | |
| | Standardfehler | 0,023 | 0,03 | |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | <0,001 | 0,087 | |
| | 95% Konfidenzintervall | Untergrenze | 2,977 | -0,108 |
| | des Parameterschätzers | Obergrenze | 3,069 | 0,010 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße te [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahme-tag

AIC-Wert: 74,13

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,023; Verzerrung = 0,002; Standardfehler = 0,005; Signifikanz = <0,001; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,016, Obergrenze = 0,036

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 8.000 Bootstrap-Stichproben.

3.3 Analyse der Zwischenpausenlängen (tZP)

In Tabelle 15 ist die deskriptive Analyse aller analysierten Zwischenpausenlängen für die gesamte Probandengruppe sowie separat für die Gruppen KG und PG dargestellt. Der Median beträgt in der gesamten Probandengruppe 791,13ms, in der KG 793,06ms und in der PG 790,99ms. Alle weiteren Messwerte sind Tabelle 15 zu entnehmen.

Tabelle 15: Deskriptive Analyse der Zwischenpausenlängen (tZP) [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max=Maximum, Min=Minimum, MW= arithmetischer Mittelwert, N=Anzahl, PG = Patientengruppe, SD=Standardabweichung.

| | N [dimensionslos] | MW [ms] | SD [ms] | Median [ms] | Min [ms] | Max [ms] |
|---------------|-------------------|------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| KG | 699 | 1.688,46 | 1.760,19 | 793,06 | 108,54 | 6.955,57 |
| PG | 541 | 1.500,03 | 1.541,25 | 790,99 | 179,72 | 6.638,23 |
| Gesamt | 1.240 | 1.606,25 | 1.670,17 | 791,13 | 108,54 | 6.955,57 |

In Abbildung 19 ist die Häufigkeitsverteilung der Zwischenpausenlängen für die gesamte Probandengruppe dargestellt. Der Modalwert der Verteilung liegt zwischen 250ms und 500ms. In 50% der analysierten Fälle liegen die Zwischenpausenlängen in der gesamten Probandengruppe zwischen 408ms und 2378ms.

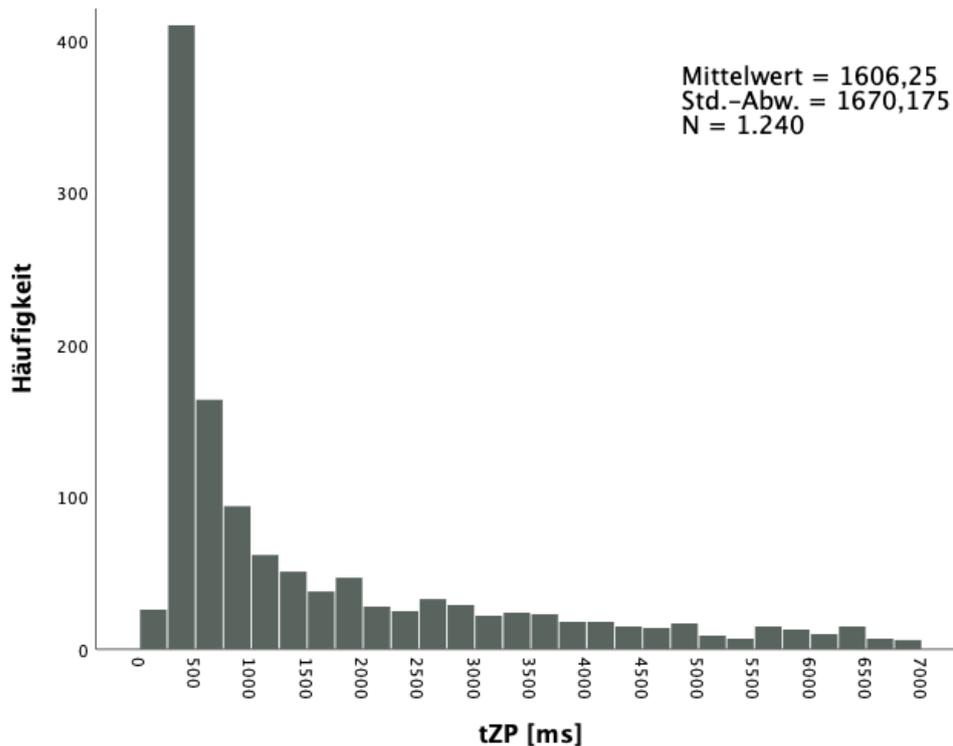


Abbildung 19: Histogramm der Zwischenpausenlängen (tZP) der gesamten Probandengruppe

Legende: N = Anzahl der Zwischenpausen; Std.-Abw. = Standardabweichung; tZP = Zwischenpausenlängen.

Die folgenden zwei Histogramme (s. Abbildung 20 und Abbildung 21) stellen die Häufigkeitsverteilungen der Zwischenpausenlängen jeweils für die zwei Gruppen KG und PG dar. In beiden Gruppen befinden sich die Modalwerte zwischen 250ms und 500ms. In 50% der Fälle liegen die Zwischenpausenlängen der KG zwischen 400ms und 2,6s. In der PG liegen 50% der Fälle zwischen 415ms und 2,0s. Es gab also geringfügige Unterschiede bei insgesamt sehr ähnlichen Verteilungen.

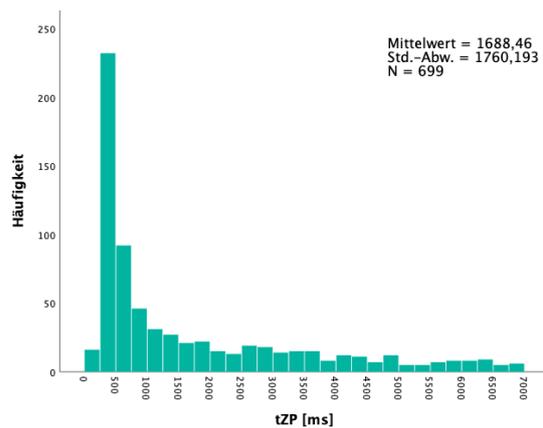


Abbildung 20: Histogramm der Zwischenpausenlängen (tZP) der Kontrollgruppe

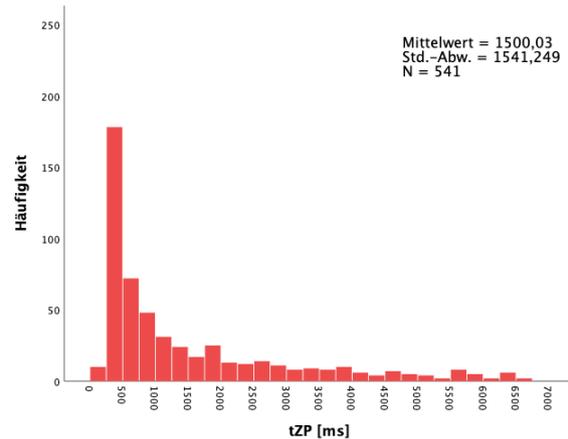


Abbildung 21: Histogramm der Zwischenpausenlängen (tZP) der Patientengruppe

Legende: N = Anzahl der Zwischenpausen; Std.-Abw. = Standardabweichung; tZP = Zwischenpausenlängen.

In Abbildung 22 ist die Zwischenpausenlänge (tZP) an den einzelnen Aufnahmetagen im Altersverlauf in einem Streudiagramm dargestellt. Während man in der KG tendenziell eine Abnahme der Zwischenpausenlänge im Altersverlauf beobachten kann, weist die Loess-Kurve der Zwischenpausenlänge der PG einen schwankenden Kurvenverlauf auf. Im Streudiagramm sind die Zwischenpausenlängen der KG bis zu einem Alter von ca. 98,6 Tagen (Schnittpunkt der Loess-Kurven im Streudiagramm) tendenziell länger als die der PG, während sie nach diesem Zeitpunkt tendenziell kürzer als die der PG sind. Die deskriptive Analyse in Tabelle 16 stellt die Vokalisationslängen mit Aufteilung in die zwei Altersgruppen, die aus dem Streudiagramm hervorgehen, dar. Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 23 veranschaulicht die Gruppenunterschiede zwischen KG und PG für jede der beiden Altersgruppen.

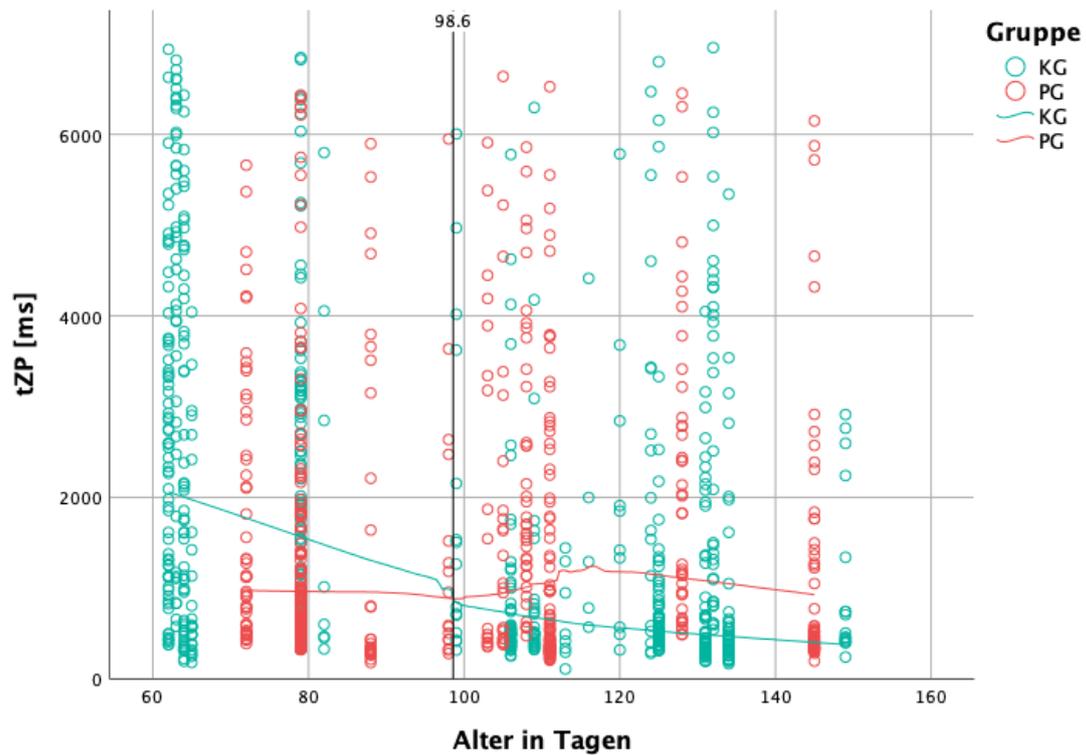


Abbildung 22: Streudiagramm zur Darstellung des Alterseffekts der Messgröße tZP [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

Tabelle 16: Deskriptive Analyse von tZP [ms] mit Aufteilung in zwei Altersgruppen (≤ 98 und ≥ 99 Tage)

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max = Maximum, Min = Minimum, MW = arithmetischer Mittelwert, N = Anzahl, PG = Patientengruppe, SD = Standardabweichung.

| | | N | MW | SD | Median | Min | Max |
|-------------------------|--------|-----------------|----------|----------|----------|--------|----------|
| | | [dimensionslos] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] |
| Alter \leq 98 Tage | KG | 282 | 2.536,81 | 1.912,49 | 2.132,09 | 181,45 | 6.936,75 |
| | PG | 254 | 1.443,58 | 1.491,51 | 793,38 | 179,72 | 6.431,10 |
| | Gesamt | 536 | 2.018,75 | 1.808,77 | 1.213,27 | 179,72 | 6.936,75 |
| Alter \geq 99 Tage | KG | 417 | 1.114,77 | 1.382,07 | 501,19 | 108,54 | 6.955,57 |
| | PG | 287 | 1.549,99 | 1.584,89 | 768,42 | 196,04 | 6.638,23 |
| | Gesamt | 704 | 1.292,19 | 1.482,57 | 545,32 | 108,54 | 6.955,57 |

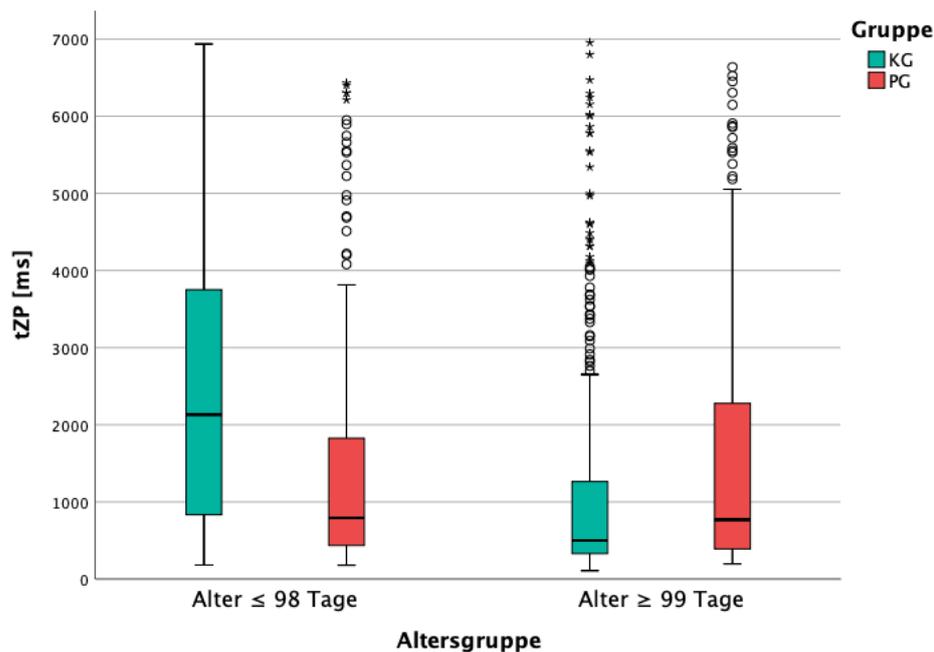


Abbildung 23: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der altersabhängigen Gruppeneffekte der Messgröße tZP [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

Für die Signifikanztestung der hier beobachteten Gruppenunterschiede wurde durch das Logarithmieren und die Bildung des Kehrwerts der Messgröße tZP eine annähernde Normalverteilung hergestellt (s. Abbildung 44 im Anhang). Da sich die Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt im finalen Modell als statistisch signifikant (p -Wert = 0,001) erwies (s. Tabelle 17), durfte der Gruppeneffekt (Zugehörigkeit zur Gruppe KG bzw. PG) nicht für die gesamte Probandengruppe betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde jeweils ein einzelnes Modell für jede Altersgruppe gerechnet. Für alle hier aufgeführten Modelle waren die Voraussetzungen (Normalverteilung, Linearität, Homoskedastizität) erfüllt (s. Abbildung 45 - Abbildung 50 im Anhang). Die jeweilige Entwicklung des AIC-Werts ist für jedes Modell im Anhang in Tabelle 32 dargestellt.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für beide Altersgruppen das Modell mit den zwei Ebenen „Proband und Aufnahme-tag“ ausgewählt. Dieses erbrachte für die Altersgruppe bis zu einem Alter von 98 Tagen den kleinsten AIC-Wert (s. Tabelle 18 und Tabelle 32 im Anhang) und war somit in dieser Gruppe am besten geeignet. Für die Altersgruppe ab einem Alter von 99 Tagen existierte noch ein etwas besser geeignetes Modell, das mit den drei Ebenen „Proband, Aufnahme-tag und Phrase“ aufgebaut wurde (AIC-Wert = -2.502,085,13; p -Wert = 0,001, s. Tabelle 32 im Anhang). Aufgrund des exakt gleichen p -

Werts und vergleichbaren AIC-Werts wie im finalen Modell (s. Tabelle 19), beeinflusste die Auswahl des Modells jedoch nicht die Interpretation der Ergebnisse.

Die jeweiligen finalen Modelle ergaben für beide Altersgruppen statistisch signifikante Unterschiede. Folglich sind die transformierten Zwischenpausenlängen bis zu einem Alter von 98 Tagen in der KG signifikant länger als in der PG (p-Wert = 0,002, s. Tabelle 18). Bei den Probanden ab 99 Tagen sind die transformierten Zwischenpausenlängen in der KG signifikant kürzer als in der PG (p-Wert = 0,001, s. Tabelle 19).

Tabelle 17: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die transformierte Messgröße tZP [ms] für die gesamte Probandengruppe

Legende: Alter = Alterseffekt (Altersgruppe < 122 und Altersgruppe \geq 122 Tagen); Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe); Gruppe * Alter = Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt.

| | | Konstanter | Gruppe | Alter | Gruppe * | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------|----------|----------|---------|
| | | Term | | | Alter | |
| Schätzung fester Parameter | | 0,31373 | -0,05273 | 0,00022 | 0,00052 | |
| Bootstrap | Verzerrung | -0,00001 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00000 | |
| | Standardfehler | 0,01006 | 0,01189 | 0,00009 | 0,00011 | |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,00100 | 0,00100 | 0,00700 | 0,00100 | |
| | 95% Konfidenzintervall | Untergrenze | 0,29248 | -0,07571 | 0,00003 | 0,00029 |
| | des Parameterschätzers | Obergrenze | 0,33484 | -0,02942 | 0,00039 | 0,00073 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Transformierte Werte für die Messgröße tZP [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahmetag, Phrasennummer; AIC-Wert: -4.384,44

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,00043; Bootstrap: Verzerrung = 0,00011; Standardfehler = 0,00007; Signifikanz = 0,00100; 95% Konfidenzintervall der Varianz Untergrenze = 0,00043, Obergrenze = 0,00070.

Tabelle 18: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tZP für die Altersgruppe ≤ 98 Tage

Legende: Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | | Konstanter Term | Gruppe |
|------------------|---|-----------------|----------|
| Bootstrap | Schätzung fester Parameter | 0,34214 | -0,02513 |
| | Verzerrung | -0,00094 | 0,00065 |
| | Standardfehler | 0,00536 | 0,00581 |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,00100 | 0,00200 |
| | 95% Konfidenzintervall Untergrenze | 0,32741 | -0,03515 |
| | des Parameterschätzers Obergrenze | 0,35041 | -0,01193 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Transformierte Werte für die Messgröße tZP [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit; AIC-Wert: -1.887,30

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,00027; Verzerrung = 0,00004; Standardfehler = 0,00010; Signifikanz = 0,01400; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,00012, Obergrenze = 0,00054
 Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

Tabelle 19: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tZP für die Altersgruppe ≥ 99 Tage

Legende: Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | | Konstanter Term | Gruppe |
|------------------|---|-----------------|----------|
| Bootstrap | Schätzung fester Parameter | 0,33427 | 0,01343 |
| | Verzerrung | -0,00001 | -0,00012 |
| | Standardfehler | 0,00292 | 0,00400 |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,00100 | 0,00100 |
| | 95% Konfidenzintervall Untergrenze | 0,32838 | 0,00561 |
| | des Parameterschätzers Obergrenze | 0,33992 | 0,02128 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Transformierte Werte für die Messgröße tZP [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit; AIC-Wert: -2.489,30

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,00050; Bootstrap: Verzerrung = 0,00007; Standardfehler = 0,00009; Signifikanz = 0,00100; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,00042, Obergrenze = 0,00078

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

3.4 Analyse der Inter-Onset-Intervalle

3.4.1 Analyse der Länge der Inter-Onset-Intervalle (tIOI)

In Tabelle 20 ist die deskriptive Analyse für die gesamte Probandengruppe sowie separat für die Gruppen KG und PG dargestellt. Der Median betrug in der gesamten Probandengruppe 1,9 s, in der KG 2,0 s und in der PG 1,8 s. Alle weiteren Messwerte sind Tabelle 20 zu entnehmen.

Tabelle 20: Deskriptive Analyse von tIOI [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max = Maximum, Min = Minimum, MW = arithmetischer Mittelwert, N = Anzahl, PG = Patientengruppe, SD = Standardabweichung.

| | N [dimensionslos] | MW [ms] | SD [ms] | Median [ms] | Min [ms] | Max [ms] |
|---------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| KG | 699 | 2.772,63 | 2.081,38 | 2.026,36 | 333,54 | 9.848,59 |
| PG | 541 | 2.440,34 | 1.707,24 | 1.779,86 | 471,43 | 10.076,24 |
| Gesamt | 1.240 | 2.627,65 | 1.933,40 | 1.907,06 | 333,54 | 10.076,24 |

In Abbildung 24 ist die Häufigkeitsverteilung der Inter-Onset-Intervalle der gesamten Probandengruppe dargestellt. Mindestens 50 % der analysierten Inter-Onset-Intervalle lagen zwischen 1,17 und 3,7s. Der Modalwert der Verteilung liegt zwischen 800ms und 1,6s. In 3,6 % der analysierten Fälle erreichten die Inter-Onset-Intervalle Werte, die länger als 7s waren.

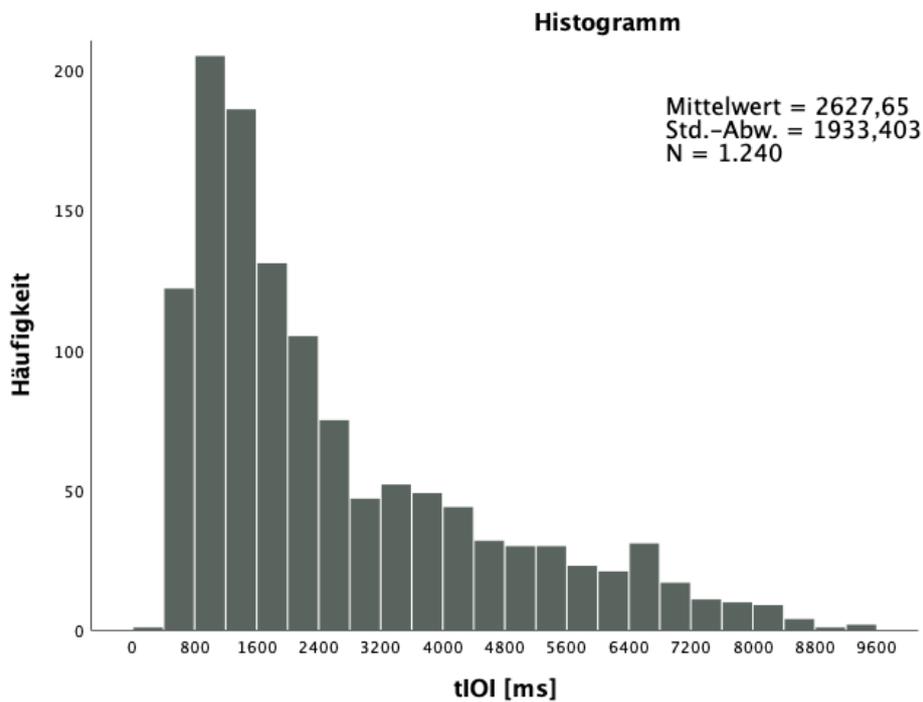


Abbildung 24: Histogramm der Inter-Onset-Intervalle (tIOI) der gesamten Probandengruppe

Legende: N = Anzahl der Inter-Onset-Intervalle; Std.-Abw. = Standardabweichung; tIOI = Länge der Inter-Onset-Intervalle.

Die folgenden zwei Histogramme (s. Abbildung 25 und Abbildung 26) stellen die Häufigkeitsverteilungen der IOI jeweils für die zwei Gruppen KG und PG dar. In der KG waren 5% der analysierten Fälle länger als 7 s und 10,9% länger als 6 s, während in der PG 1,7% der Fälle länger als 7 s und 5,5% länger als 6 s waren.

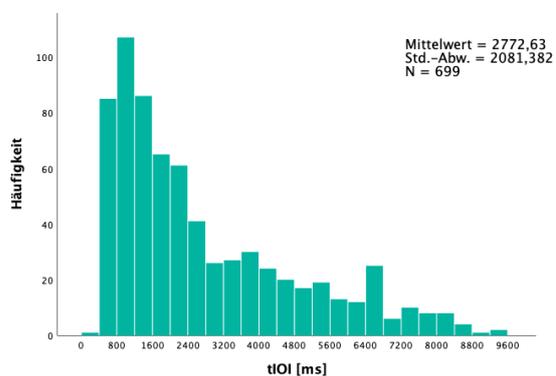


Abbildung 25: Histogramm der Inter-Onset-Intervalle der Kontrollgruppe

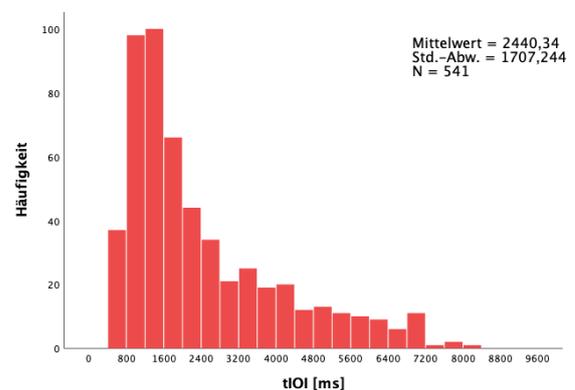


Abbildung 26: Histogramm der Inter-Onset-Intervalle der Patientengruppe

Legende: N = Anzahl der Inter-Onset-Intervalle; Std.-Abw. = Standardabweichung; tIOI = Länge der Inter-Onset-Intervalle.

In Abbildung 27 ist die Länge der Inter-Onset-Intervalle (tIOI) an den einzelnen Aufnahmetagen im Altersverlauf in einem Streudiagramm dargestellt. Während man in der KG tendenziell eine Abnahme dieser Messgröße im Altersverlauf beobachten konnte, wies sie in der PG eine leichte Zunahme im Altersverlauf auf. Im Streudiagramm sind die tIOI der KG bis zu einem Alter von ca. 103,3 Tagen (Schnittpunkt der Loess-Kurven im Streudiagramm) tendenziell länger als die der PG, während sie nach diesem Zeitpunkt tendenziell kürzer als die der PG sind. Die deskriptive Analyse in Tabelle 21 stellt die Vokalisationslängen mit Aufteilung in die zwei Altersgruppen, die aus dem Streudiagramm hervorgehen, dar. Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 28 veranschaulicht die Gruppenunterschiede zwischen KG und PG für jede der beiden Altersgruppen.

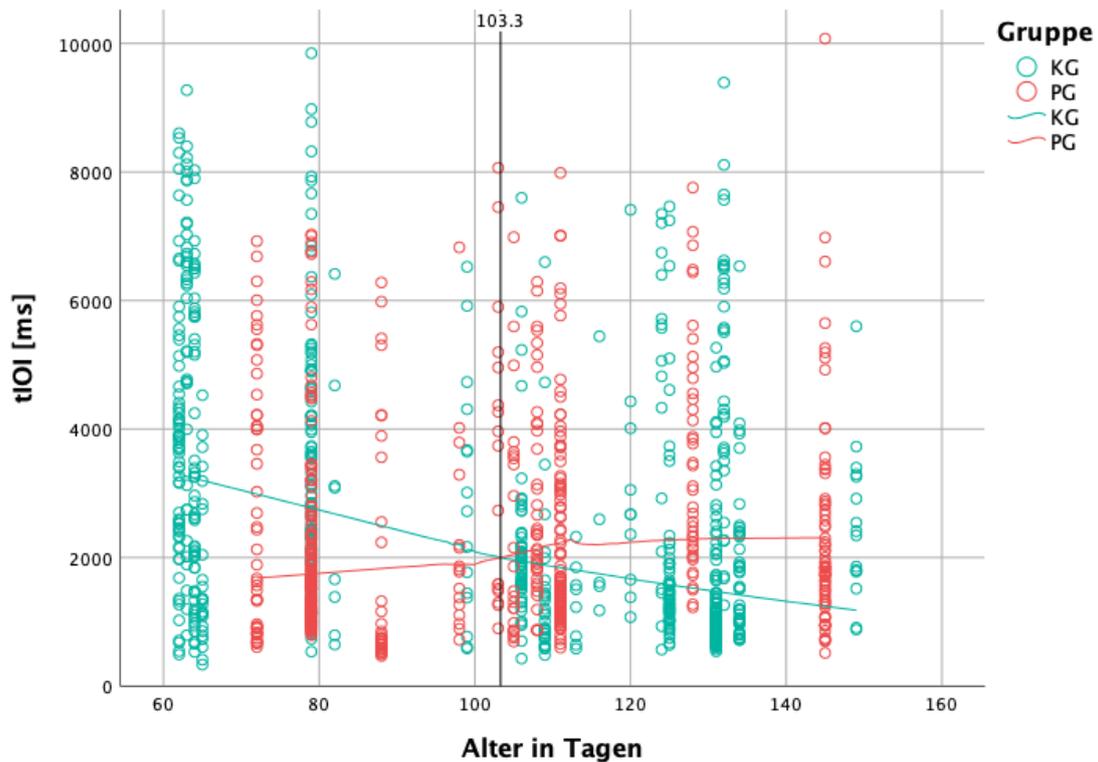


Abbildung 27: Streudiagramm zur Darstellung des Alterseffekts der Messgröße tIOI [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

Tabelle 21: Deskriptive Analyse von tIOI [ms] mit Aufteilung in zwei Altersgruppen (≤ 103 und ≥ 104 Tage)

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max = Maximum, Min = Minimum, MW = arithmetischer Mittelwert, N = Anzahl, PG = Patientengruppe, SD = Standardabweichung.

| | | N [dimensionslos] | MW [ms] | SD [ms] | Median [ms] | Min [ms] | Max [ms] |
|--------------------------|--------|----------------------|------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| Alter \leq 103 Tage | KG | 297 | 3.676,66 | 2.208,58 | 3.321,27 | 333,54 | 9.848,59 |
| | PG | 271 | 2.273,37 | 1.703,93 | 1.575,84 | 471,43 | 8.065,55 |
| | Gesamt | 568 | 3.007,13 | 2.102,65 | 2.312,81 | 333,54 | 9.848,59 |
| Alter \geq 104 Tage | KG | 402 | 2.104,72 | 1.699,30 | 1.521,29 | 428,26 | 9.392,48 |
| | PG | 270 | 2.607,93 | 1.697,24 | 2.039,64 | 515,74 | 10.076,24 |
| | Gesamt | 672 | 2.306,90 | 1.715,07 | 1.699,93 | 428,26 | 10.076,24 |

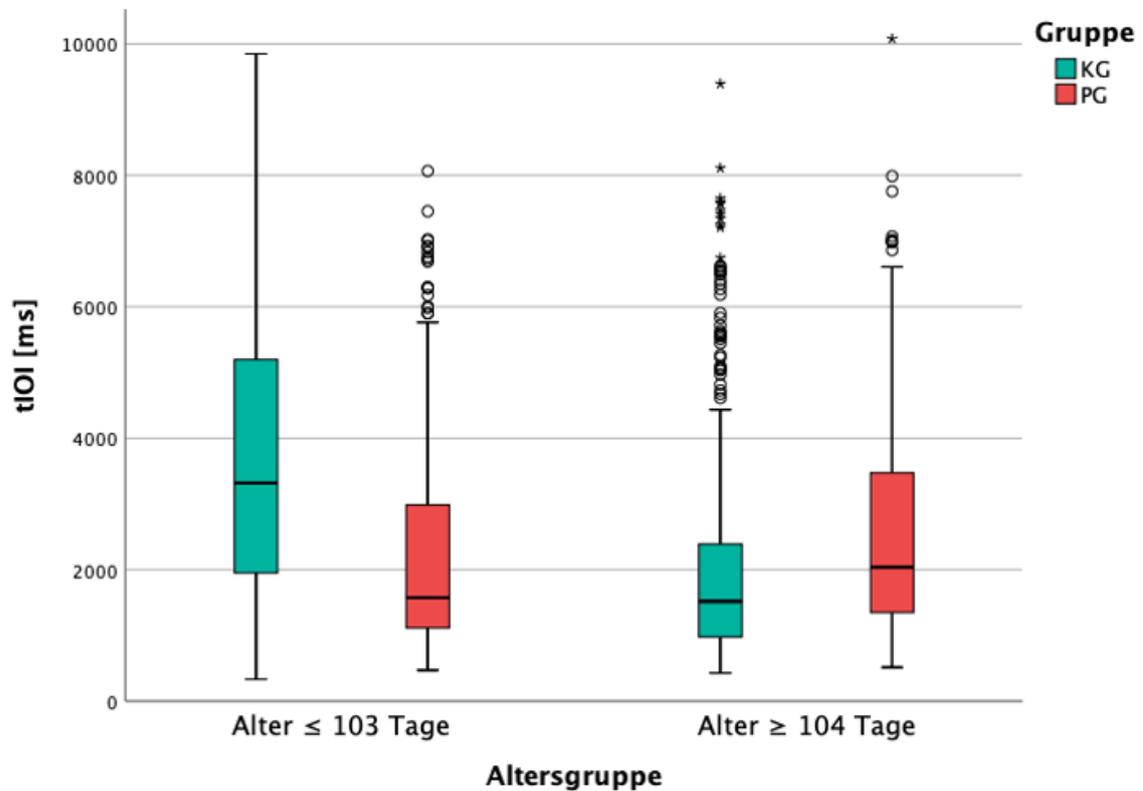


Abbildung 28: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der altersabhängigen Gruppeneffekte der Messgröße tIOI [ms]

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

Für die Signifikanztestung der hier beobachteten Gruppenunterschiede wurde durch das Logarithmieren der Messgröße tIOI eine annähernde Normalverteilung hergestellt (s. Abbildung 51 im Anhang). Da sich die Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt im finalen Modell als statistisch signifikant (p -Wert = $<0,00001$) erwies (s. Tabelle 22/Tabelle 17), durfte der Gruppeneffekt (Zugehörigkeit zur Gruppe KG bzw. PG) nicht für die gesamte Probandengruppe betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde jeweils ein einzelnes Modell für jede Altersgruppe gerechnet. Für alle hier aufgeführten Modelle waren die Voraussetzungen (Normalverteilung, Linearität, Homoskedastizität) erfüllt (s. Abbildung 52 - Abbildung 57 im Anhang). Die jeweilige Entwicklung des AIC-Werts ist für jedes Modell im Anhang in Tabelle 33 dargestellt.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für beide Altersgruppen das Modell mit den zwei Ebenen „Proband und Aufnahmetag“ ausgewählt. Dieses erbrachte für die Altersgruppe bis zu einem Alter von 103 Tagen den kleinsten AIC-Wert (s.

Tabelle 23 und Tabelle 33 im Anhang) und war somit in dieser Gruppe am besten geeignet. Für die Altersgruppe ab einem Alter von 104 Tagen existierte noch ein etwas besser geeignetes Modell, das nur mit der Ebene „Proband“ aufgebaut wurde (AIC-Wert = 59,221; p -Wert = 0,002, s. Tabelle 33 im Anhang). Aufgrund des exakt gleichen p -Werts und vergleichbaren AIC-Werts wie im finalen Modell (s. Tabelle 24), veränderte die Auswahl jedoch nichts an der Interpretation der Ergebnisse.

Die jeweiligen finalen Modelle ergaben für beide Altersgruppen statistisch signifikante Unterschiede. Folglich sind die logarithmierten Längen der Inter-Onset-Intervalle bis zu einem Alter von 103 Tagen in der KG signifikant länger als in der PG (p -Wert = 0,001, s.

Tabelle 23). In der Altersgruppe ab 104 Tagen sind die logarithmierten Längen der Inter-Onset-Intervalle in der KG signifikant kürzer als in der PG (p -Wert = 0,002, s. Tabelle 24).

Tabelle 22: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße tIOI [ms] für die gesamte Probandengruppe

Legende: Alter = Alterseffekt; Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe); Gruppe * Alter = Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt.

| | | Konstanter | Gruppe | Alter | Gruppe * | |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | Term | | | Alter | |
| Schätzung fester Parameter | | | | | | |
| Bootstrap | Verzerrung | 0,00124 | -0,00231 | -0,00001 | 0,00003 | |
| | Standardfehler | 0,07301 | 0,08877 | 0,00063 | 0,00080 | |
| | Signifikanz (2-seitig) | <0,00001 | <0,00001 | 0,00500 | <0,00001 | |
| | 95% Konfidenzintervall | Untergrenze | 2,97326 | 0,28603 | 0,00074 | -0,00569 |
| | des Parameterschätzers | Obergrenze | 3,24800 | 0,62909 | 0,00314 | -0,00267 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße tIOI [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit; AIC-Wert: 293,60

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,02164; Bootstrap: Verzerrung = 0,00265; Standardfehler = 0,00321; Signifikanz = <0,00001; 95% Konfidenzintervall der Varianz Untergrenze = 0,01837, Obergrenze = 0,03103.

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 5.000 Bootstrap-Stichproben.

Tabelle 23: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tIOI für die Altersgruppe ≤ 103 Tage

Legende: Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | | Konstanter Term | Gruppe | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------|---------|
| Schätzung fester Parameter | | | | |
| Bootstrap | Verzerrung | 0,02898 | -0,01770 | |
| | Standardfehler | 0,05181 | 0,04751 | |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,00100 | 0,00100 | |
| | 95% Konfidenzintervall | Untergrenze | 3,22462 | 0,04169 |
| | des Parameterschätzers | Obergrenze | 3,41149 | 0,22352 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Transformierte Werte für die Messgröße tZP [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit; AIC-Wert: 222,07

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,01687; Bootstrap: Verzerrung = 0,00143; Standardfehler = 0,00592; Signifikanz = 0,01500; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,00789, Obergrenze = 0,03078.

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

Tabelle 24: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tIOI für die Altersgruppe ≥ 104 Tage

Legende: Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | | Konstanter Term | Gruppe |
|------------------|---|-----------------|----------|
| Bootstrap | Schätzung fester Parameter | 3,34747 | -0,07187 |
| | Verzerrung | 0,00026 | -0,00028 |
| | Standardfehler | 0,01898 | 0,02479 |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,00100 | 0,00200 |
| | 95% Konfidenzintervall Untergrenze | 3,30917 | -0,12040 |
| | des Parameterschätzers Obergrenze | 3,38660 | -0,02266 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Transformierte Werte für die Messgröße tZP [ms]

Modellebenen: Proband, Aufnahmezeit; AIC-Wert: 61,22

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,02352; Bootstrap: Verzerrung = 0,0026; Standardfehler = 0,00422; Signifikanz = 0,00100; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = 0,01879, Obergrenze = 0,03495.

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

3.4.2 Analyse der Varianz der Inter-Onset-Intervalle pro Proband (Varianz_IOI)

In Abbildung 29 wird die Varianz der IOI pro Proband und Gruppe dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Probanden der KG eine Varianz zwischen $0,39s^2$ und $5,49s^2$ aufweisen, während die Varianz der Probanden der PG zwischen $1,97s^2$ und $3,69s^2$ liegt. Im anschließend durchgeführten Levene-Test (Test der Homogenität der Varianzen) wurde festgestellt, dass der Unterschied zwischen den zwei Gruppen KG und PG statistisch signifikant ist (p-Wert = 0,004).

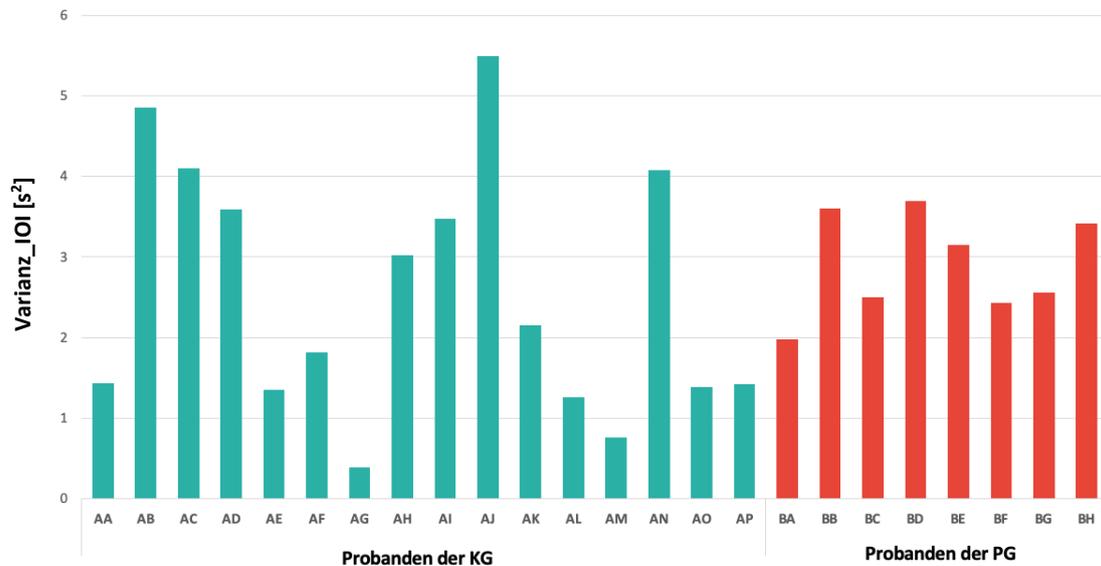


Abbildung 29: Darstellung der Messgröße Varianz_IOI pro Proband und Gruppe

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

3.4.3 Analyse des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI) und des mittleren nPVI pro Proband

In Tabelle 25 ist die deskriptive Analyse des nPVI für die gesamte Probandengruppe sowie separat für die Gruppen KG und PG dargestellt.

In Abbildung 30 ist der nPVI im Altersverlauf in einem Streudiagramm dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass der nPVI in beiden Probandengruppen keine starken Schwankungen im Altersverlauf zeigt und somit tendenziell konstant verläuft.

Zur Prüfung auf signifikante Effekte wurde durch das Logarithmieren der Messgröße nPVI eine annähernde Normalverteilung erreicht (s. Abbildung 58 im Anhang). Für beide hier aufgeführten Modelle waren die Voraussetzungen (Normalverteilung, Linearität, Homoskedastizität) erfüllt (s. Abbildung 59 bis Abbildung 60 im Anhang). Die jeweilige Entwicklung des AIC-Werts ist für beide Modelle im Anhang in Tabelle 34 dargestellt.

Da sich die Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt im finalen Modell nicht als statistisch signifikant (p -Wert = 0,724) erwies (s. Tabelle 26), konnte der Gruppeneffekt (Zugehörigkeit zur Gruppe KG bzw. PG) in einem weiteren Modell für die gesamte Probandengruppe betrachtet werden. Das finale Modell für den Gruppeneffekt, das in Tabelle 27 dargestellt ist, konnte statistisch signifikante Unterschiede zwischen KG und

PG nachweisen (p-Wert = 0,001). Der nPVI der KG ist somit statistisch signifikant kleiner als der nPVI der PG.

Tabelle 25: Deskriptive Analyse des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI) [dimensionslos]

Legende: KG = Kontrollgruppe, Max = Maximum, Min = Minimum, MW = arithmetischer Mittelwert, N = Anzahl, PG = Patientengruppe, SD = Standardabweichung.

| | N | MW | SD | Median | Min | Max |
|---------------|-----|-------|-------|--------|------|--------|
| KG | 108 | 61,40 | 39,30 | 53,94 | 0,96 | 215,04 |
| PG | 64 | 85,56 | 64,49 | 61,15 | 6,84 | 387,05 |
| Gesamt | 172 | 70,39 | 51,34 | 57,91 | 0,96 | 387,05 |

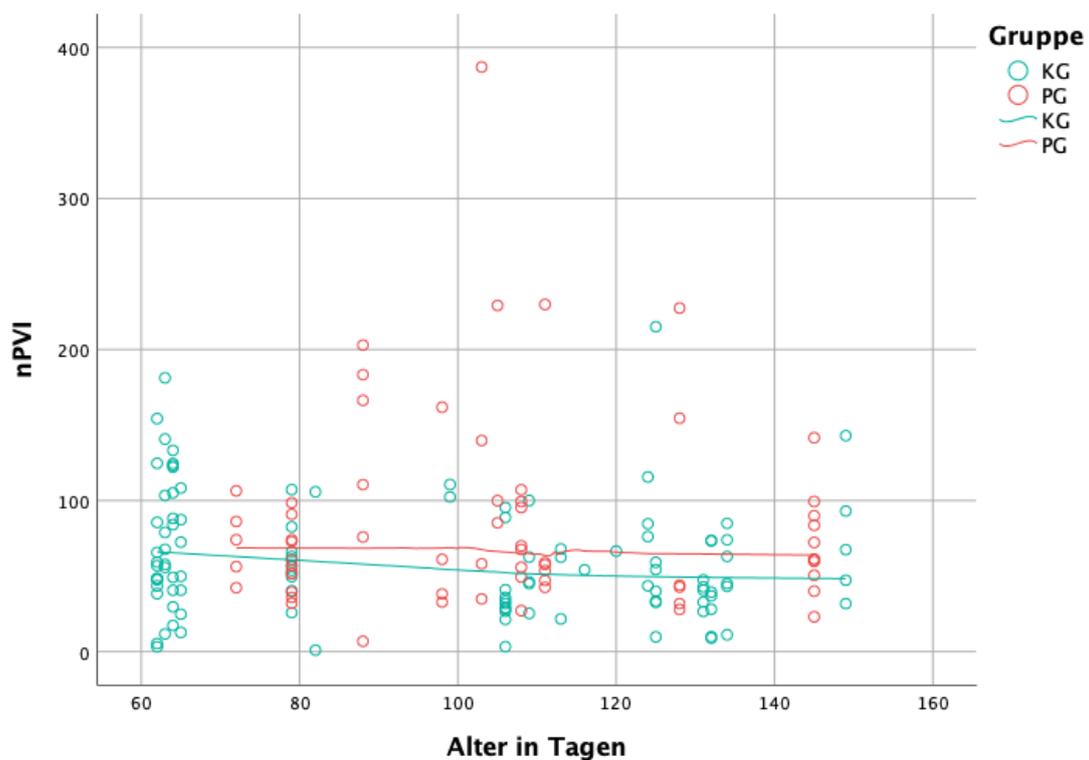


Abbildung 30: Streudiagramm zur Darstellung des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI) im Altersverlauf

Legende: KG = Kontrollgruppe; PG = Patientengruppe.

Tabelle 26: Finales Modell zur Untersuchung der Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße nPVI für die gesamte Probandengruppe

Legende: Gruppe * Alter = Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekt.

| | | Konstanter Term | Gruppe * Alter |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------|
| Schätzung fester Parameter | | 1,8532 | -0,0009 |
| Bootstrap | Verzerrung | 0,0843 | 0,0020 |
| | Standardfehler | 0,2134 | 0,0030 |
| | Signifikanz (2-seitig) | 0,0010 | 0,7020 |
| | 95% Konfidenzintervall | | |
| | des Parameterschätzers | Untergrenze | 1,5679 |
| | Obergrenze | 2,4045 | 0,0081 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße nPVI

Modellebenen: Proband; AIC-Wert: 130,66

Zufällige Konstante: Schätzung = <0,0001; Bootstrap: Verzerrung = 0,0207; Standardfehler = 0,0271;

Signifikanz = 0,006; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = <0,0001, Obergrenze = 0,1000

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

Tabelle 27: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße nPVI für die gesamte Probandengruppe

Legende: Gruppe = Gruppeneffekt (Kontroll- und Patientengruppe).

| | | Konstanter Term | Gruppe |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------|
| Schätzung fester Parameter | | 1,839 | -0,170 |
| Bootstrap | Verzerrung | 0,005 | -0,024 |
| | Standardfehler | 0,038 | 0,061 |
| | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,001 | 0,001 |
| | 95% Konfidenzintervall | | |
| | des Parameterschätzers | Untergrenze | 1,767 |
| | Obergrenze | 1,917 | -0,084 |

Angaben zum Modell

Abhängige Variable: Logarithmierte Werte für die Messgröße nPVI

Modellebenen: Proband; AIC-Wert: 127,54

Zufällige Konstante: Schätzung = 0,0009; Bootstrap: Verzerrung = 0,0204; Standardfehler = 0,0276;

Signifikanz = 0,9370; 95% Konfidenzintervall der Varianz: Untergrenze = <0,0001, Obergrenze = 0,1078

Bootstrap: Die Bootstrap-Ergebnisse beruhen auf 1.000 Bootstrap-Stichproben.

Wie in Kapitel 2.7.2 beschrieben, wurde der nPVI pro Phrase berechnet. Auf diese Weise erklärt sich die hohe Schwankung der Anzahl der nPVI-Werte pro Proband: Die Analyse umfasste pro Proband zwischen 1 und 42 nPVI-Werten.

Um für jeden Probanden die gleiche Anzahl an nPVI-Werten analysieren zu können, wurde schließlich der arithmetische Mittelwert des nPVI pro Proband (MW_nPVI) berechnet.

Zur Prüfung der Gruppeneffekte erfolgte durch das Logarithmieren des mittleren nPVI (MW_nPVI) das Herstellen einer annähernden Normalverteilung (s. Abbildung 61 im Anhang). Bei der Signifikanzprüfung konnte auf das Anwenden von Mehrebenenmodellen verzichtet werden, da die zu prüfende Messgröße nicht in einer hierarchischen Struktur vorlag. Die Prüfung mittels t-Test konnte die signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen KG und PG bestätigen (p-Wert = 0,003, s. Tabelle 28). Zur grafischen Verdeutlichung der Gruppenunterschiede des mittleren nPVI pro Proband (MW_nPVI) ist in Abbildung 31 ein Boxplot-Diagramm dargestellt.

Tabelle 28: Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße MW_nPVI

Legende: MW_nPVI = mittlerer normierter paarweiser Variabilitätsindex pro Proband; F = F-Wert beim Levene-Test; T = T-Wert beim T-Test.

| | | Varianzen sind gleich | Varianzen sind nicht gleich |
|-----------------------------------|---|----------------------------------|--|
| Levene-Test der | F | 0,002 | |
| Varianz- gleichheit | Signifikanz | 0,967 | |
| T-Test für die | T | -3,415 | -3,483 |
| Mittelwert- gleichheit | p-Wert: Signifikanz (2-seitig) | 0,002 | 0,003 |
| | Mittlere Differenz | -0,188 | -0,188 |
| | Standardfehler der Differenz | 0,055 | 0,054 |
| | 95% Konfidenz- intervall der Differenz | Untergrenze -0,302 | Untergrenze -0,303 |
| | | Obergrenze -0,074 | Obergrenze -0,073 |

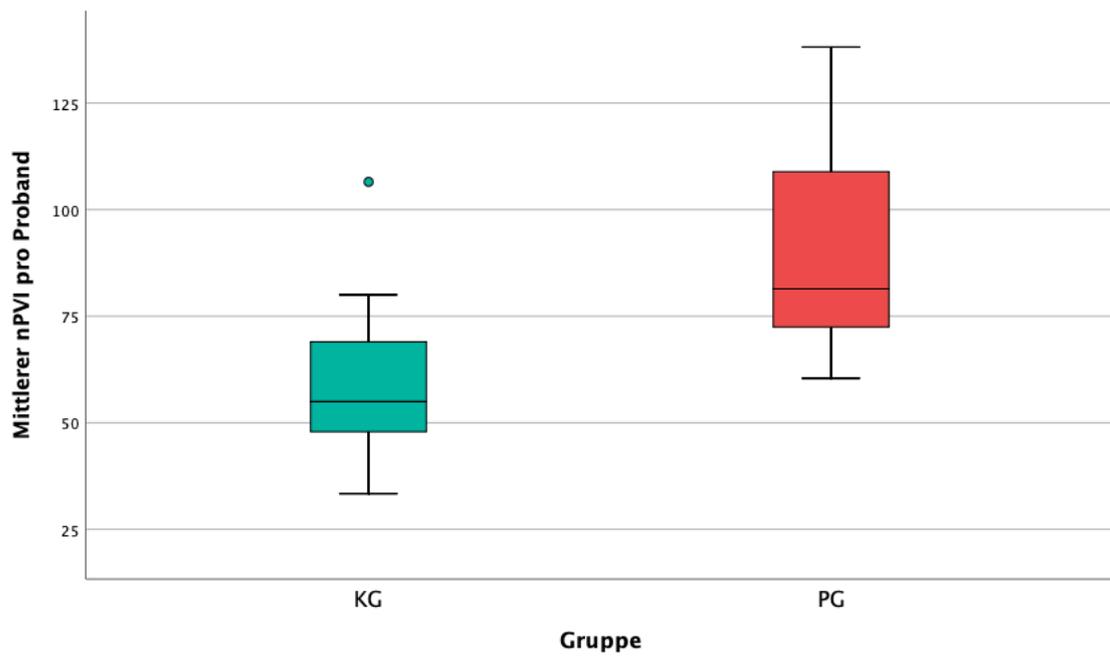


Abbildung 31: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Gruppenunterschiede des mittleren nPVI pro Proband

Legende: KG = Kontrollgruppe, PG = Patientengruppe.

4 Diskussion

Eine unerkannte oder unbehandelte Hörstörung im Säuglings- und Kindesalter kann weitreichende Konsequenzen mit negativer Auswirkung auf die Sprachentwicklung und das soziale Verhalten haben (s. Kapitel 1). Es ist belegt, dass Kinder, bei denen eine Hörminderung frühzeitig erkannt wird, die Möglichkeit haben, deutlich bessere Sprachfähigkeiten zu entwickeln als Kinder, bei denen die Diagnose erst nach dem 1. Lebensjahr gestellt wird (Houston et al., 2012; Korver et al., 2010; Pimperton et al., 2012; Schauwers et al., 2004; Yoshinaga-Itano, 1999). Das Hauptziel der Frühförderung bei Kindern mit Hörschädigung besteht darin, die Kommunikationsfähigkeit des Kindes wiederherzustellen oder zu fördern und das Niveau der Sprachkompetenz zu optimieren, mit positiven Auswirkungen auf das kognitive und sozio-emotionale Verhalten (De Raeve, 2010; Houston et al., 2012; Kishon-Rabin et al., 2005; Schauwers et al., 2004; Tomblin et al., 2015). Zusätzlich zu den bereits etablierten Diagnose- und Therapiemaßnahmen von Hörstörungen wird daran geforscht, zu entscheiden, ob die Untersuchung und Förderung der vorsprachlichen Vokalisationen bei hörgeschädigten Säuglingen als ergänzende Methode, insbesondere bei der individualisierten Betreuung, eingesetzt werden könnte. Die vorliegende Arbeit erfolgte im Rahmen dieser Untersuchungen.

Aufgrund der noch mangelnden Kenntnisse über die Auswirkungen einer Hörschädigung auf die Sprachentwicklung von Säuglingen in den vorkanonischen Phasen, sollte in der vorliegenden Arbeit erstmalig die Frage beantwortet werden, ob Unterschiede in den rhythmischen Eigenschaften von Komfortvokalisationen zwischen Säuglingen mit einer hochgradigen Hörschädigung und gesunden Säuglingen bestehen. Diese Herangehensweise lieferte zusätzlich auch erste Referenzwerte für normalhörende und hochgradig hörgeschädigte Säuglinge im untersuchten Altersspektrum und für die untersuchten Messgrößen. Im Folgenden werden die hier ermittelten Ergebnisse interpretiert und anhand des aktuellen Stands der Fachliteratur diskutiert.

Die untersuchten Phrasenlängen beider Gruppen waren sehr ähnlich und weder das Alter noch die Gruppe hatten einen Einfluss auf diese Messgröße. Diese Tatsache belegt das

sinnvoll gewählte Pausenkriterium von 7s (s. Kapitel 4.5). Die Größe „Phrasenlänge“ wird hier nicht weiter diskutiert, weil sie lediglich die „Messbasis“ der anderen Größen reflektiert.

4.1 Ergeben sich Unterschiede in den Vokalisationslängen der Komfortlaute zwischen hörgeschädigten und hörgesunden Säuglingen?

Die Vokalisationslängen der Komfortlaute wurden in der hier vorliegenden Arbeit zwischen hochgradig hörgeschädigten und hörgesunden Säuglingen im Alter von 2 bis 5 Monaten verglichen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass hörgesunde Säuglinge etwa im Alter zwischen 2 und 4 Monaten längere Komfortlaute äußern als gleichaltrige hörgeschädigte Säuglinge. Dieser Unterschied erwies sich in der vorliegenden Arbeit als statistisch signifikant.

In einem Alter von 4 bis 5 Monaten erzeugten hörgeschädigte Säuglinge dagegen tendenziell längere Komfortlaute als ihre gleichaltrige gesunde Kontrollgruppe. Dieser Unterschied erwies sich statistisch zwar als nicht signifikant, für die Berechnung in der Altersgruppe ab 122 Tagen stand jedoch auch nur ein sehr kleiner Datensatz zur Verfügung (2 Probanden der PG und 7 Probanden der KG). Aus diesem Grund sollten die hier gefundenen Unterschiede bei weiteren Berechnungen mit allen Daten aus der übergeordneten Kohortenstudie nochmals überprüft werden. Insbesondere könnte auf diese Weise der Alterszeitpunkt, ab dem die Vokalisationslängen der hörbeeinträchtigten Säuglinge die der Gesunden übertreffen, verifiziert werden.

In Tabelle 29 ist eine Übersicht dargestellt, um die hier ermittelten Vokalisationslängen in den Stand der aktuellen Fachliteratur einzuordnen. Es wurde die tabellarische Form gewählt, um zu verdeutlichen, wie unterschiedlich die Studien bezüglich der Stichprobengröße und analysierter Lauttypen in den existierenden, ohnehin sehr wenigen Untersuchungen sind.

Tabelle 29: Wissenschaftliche Arbeiten zum Vergleich von Vokalisationslängen zwischen Hörgesunden und Hörgeschädigten

Legende: KG = Kontrollgruppe; MW = arithmetischer Mittelwert; N_{KG} = Anzahl der Probanden der Kontrollgruppe; N_{PG} = Anzahl der Probanden der Patientengruppe; PG = Patientengruppe; Profound = Hörverlust von ≥ 91 dB; SD = Standardabweichung; Severe = Hörverlust zwischen 71 bis 90 dB.

| Studie | Anzahl und Alter der Probanden, Vokalisationstyp | Vokalisationslänge [ms] in KG (hörgesund) | Vokalisationslänge [ms] in PG (hörgeschädigt) | Gruppenvergleich |
|-------------------------------------|---|---|--|---|
| Vorliegende Arbeit | N _{KG} = 16; N _{PG} = 8; 2 – 5 Monate; <i>Komfortlaute</i> <i>(keine vegetativen Laute)</i> | MW = 1.103,5ms (SD = 745,6) Median = 949,1ms Spannweite = 40,4-5.212ms | MW = 950,5ms (SD = 757,2) Median = 727,5ms | Bis zu einem Alter von etwa 4 Monaten PG < KG, danach PG > KG |
| Clement (2004) | N _{KG} = 6 2,5-11,5 Monate; <i>Komfortlaute,</i> <i>Babbeln</i> | Gesamt: MW = 915ms (SD = 758ms) 3,5 Monate: 1.441ms | Gesamt: MW = 940ms (SD = 752ms) 3,5 Monate: 842ms | PG > KG (nicht signifikant), Alter 3,5 Monate: PG < KG (signifikant) |
| Dikkenberg-Pot et al. (1997) | 12-18 Monate | MW = 817ms | MW = 1.092ms; | PG > KG |
| Ryalls & Larouche, 1992 | N _{PG} =10; N _{KG} =10; 6 - 9 Jahre; <i>Silben</i> | MW = 300ms | MW = 357ms; | PG > KG (nicht signifikant) |
| Robb et al. (1992) | N _{PG} =26; N _{KG} =13; 18 - 27 Jahre; <i>Wörter</i> | MW = 732ms (SD = 91ms) | MW _{Severe} = 926ms (SD = 128ms) MW _{Profound} = 1.147ms (SD = 235ms) | PG > KG (Je schwerer der Hörverlust, desto längere Silben) |

Zunächst sei darauf hingewiesen, dass die einzelnen Studien nicht ohne Weiteres miteinander verglichen werden können, da viele unterschiedliche methodische Limitationen berücksichtigt werden müssen. Insbesondere das untersuchte Altersspektrum und der Vokalisationstyp haben einen Einfluss auf die Vokalisationslänge.

Nichtsdestotrotz kann mithilfe von Tabelle 29 ein Überblick über den bisherigen Stand der Fachliteratur geschaffen werden. In Zusammenschau der dargestellten vier Vergleichsstudien zeigt sich eine prinzipielle Übereinstimmung.

In einer Arbeit von Clement et al. wurden die Vokalisationslängen von gesunden und hörbeeinträchtigten Säuglingen im Alter von 2-12 Monaten miteinander verglichen (Clement, 2004). Sie kam zu dem Ergebnis, dass in der gesamten Gruppe die Vokalisationen der hörbeeinträchtigten Probanden etwas länger als die der Normalhörenden waren, ohne dass der Unterschied statistisch signifikant war.

Im Alter von 3,5 Monaten konnte sie signifikant längere Vokalisationen der Normalhörenden im Vergleich zu den hörbeeinträchtigten Säuglingen nachweisen. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem in der hier vorliegenden Arbeit ermittelten Unterschied im Alter von 2 bis 4 Monaten.

Auch die anderen drei in Tabelle 29 dargestellten Studien (Dikkenberg-Pot et al., 1997; Robb et al., 1992; Ryalls et al., 1992) stützen eine These, die ebenfalls in der hier vorliegenden Arbeit aufgestellt wird: Ab einem bestimmten Alter (hier: 4 Monate bzw. 122 Tage) scheinen die Vokalisationslängen der hörgeschädigten Probanden die der hörgesunden Altersgenossen zu überschreiten. Dies scheint sich dann auch trotz Versorgung mit Hörhilfen nicht mehr zu verändern (Dikkenberg-Pot et al., 1997; Robb et al., 1992; Ryalls et al., 1992).

Einige wissenschaftliche Arbeiten untersuchten lediglich die Vokalisationen von hörgesunden Säuglingen. Zum Teil waren die mittleren Vokalisationslängen für hörgesunde Säuglinge etwas kürzer als die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Längen (Bateson, 1975; Beebe et al., 1988; d'Odorico et al., 1985; Jasnow et al., 1986). Andere Wissenschaftler stellten sehr ähnliche Vokalisationslängen wie die Autorin der vorliegenden Arbeit fest (Bettany, 2004; Bloom, 1989; Fagan, 2009; M. Gratier et al., 2015; Hsu et al., 2000). Die Vergleichbarkeit dieser Vokalisationslängen mit den hier ermittelten Werten, spricht dafür, dass mit der hier angewandten Methode valide Testergebnisse erzielt werden können.

Wie erklären sich diese Unterschiede?

Eine mögliche Ursache für die hier beobachteten Unterschiede der Komfortlautlängen zwischen hörgesunden und hörbeeinträchtigten Säuglingen ist die Interaktion mit der Bezugsperson („turn-taking“). Ab einem Alter von etwa 2 Monaten ist bei Mutter-Kind-Paaren ein gelegentliches Abwechseln von Zuhören und Vokalisieren in einem

„Pseudodialog“ zu beobachten (Papoušek, 1994). Das könnte die längeren Laute der hörgesunden Säuglinge erklären.

Es wird jedoch davon ausgegangen, dass in diesem frühen Alter die Mutter hauptsächlich für die zeitliche Abstimmung verantwortlich ist und durch Anpassung ihrer eignen Vokalisationen an die des Säuglings den dialogartigen Eindruck erzeugt (Schaffer, 1977). Die Art und Länge der Säuglingsvokalisationen sind von zahlreichen weiteren Einflüssen abhängig, wie beispielsweise der kindliche Befindlichkeitszustand und insbesondere der „Grad der positiven oder negativen Erregung“ (Papoušek, 1994).

Andererseits sprechen zahlreiche Beobachtungen dafür, dass der Säugling in den folgenden Monaten seine kommunikativen Fähigkeiten erweitert bis hin zur Entwicklung eines kontrollierten Abwechslens von Zuhören und Vokalisation und der damit verbundenen zeitlichen Variation ihrer Vokalisation. So „trainieren“ beispielsweise Säuglinge im Alter von 3 Monaten nach der eigenen Vokalisation zu pausieren als würden sie auf eine Antwort der Bezugsperson warten (Bloom et al., 1987). Zudem erhöht die verbale Stimulation bei 3 Monate alten Säuglingen den Anteil von Cooing-Lauten im Gegensatz zu neutralen, vokalischen Lauten (Bloom et al., 1987). Mehrere Studien belegen weiterhin, dass der Anteil der sich überschneidender Vokalisationen ab einem Alter von etwa 4 Monaten zugunsten eines eher alternierenden Musters abnimmt, was ebenfalls dafür spricht, dass gesunde Säuglinge in diesem Alter die Fähigkeit zur zeitlichen Feinabstimmung optimieren (Elias et al., 1986; Ginsburg et al., 1988; Hilbrink et al., 2015).

In der hier untersuchten Kontrollgruppe war zu beobachten, dass die einfachen vokalischen Laute im Alter von 3 bis 4 Monaten an Länge abnehmen. Mit den Ergebnissen der aktuellen Arbeit kann keine Aussage über die Qualität der Laute getroffen werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass die Verkürzung der Vokalisationslänge mit einer Zunahme an Komplexität einhergeht. Diese Übergangsphase im 4. Lebensmonat fällt mit den Meilensteinen zusammen, die in den Stufenmodellen dargestellt werden, wie beispielsweise die Expansionsstufe im Modell von Oller (1980) oder die Phase des „vokalen Spielens“ (vocal play) im Modell von Stark (1980), s. Kapitel 1.

Bei den hochgradig hörgestörten Säuglingen fehlen diese Abstimmungsprozesse. Es fehlt eine Rückmeldung über den Sprechrhythmus der Bezugsperson, wobei keine oder eine sehr eingeschränkte Anpassung der eigenen Lautäußerungen an die der Bezugsperson möglich ist. Die hörgeschädigten Säuglinge befinden sich, bedingt durch ihre verzögerte Entwicklung, vermutlich noch im ersten oder zweiten Sprachentwicklungsstadium („Phonation und primitive Artikulation“). Sie spielen zwar mit den Längen der schon bekannten Quasivowels und Cooing-Lauten, kombinieren diese zu Mehrfachbögen und variieren deren Amplituden. „Echte“ Silben werden jedoch nicht erzeugt. Sie erzeugen folglich einfache, zum Teil lang andauernde Melodiekonturen, die größtenteils nicht segmentiert sind bzw. keinerlei Silbenstruktur beinhalten. Die „Entdeckung“ der Silbe führt bei normalhörenden Säuglingen dagegen zu kürzeren Lauten.

Dass hörbeeinträchtigte Säuglinge bereits in Bezug auf temporale Eigenschaften von Komfortlauten Unterschiede aufweisen, wird auch bei Betrachtung des Boxplot-Diagramms in Abbildung 18 deutlich: Hörgesunde Säuglinge erzeugen im Alter zwischen 2 und 4 Monaten in 50% der Fälle Werte zwischen 0,5s und 1,5s, wohingegen die Komfortlautlängen in der hörbeeinträchtigten Gruppe deutlich kürzer waren (in 50% der Fälle zwischen 0,4s und 1s). Erst in einem Alter von 4 bis 5 Monaten lagen die Komfortlaute der hörbeeinträchtigten Säuglinge in 50% der Fälle zwischen 0,7s und 1,55s, und somit in einem vergleichbaren Bereich wie die der jüngeren hörgesunden Kontrollgruppe. Der vorsprachliche Entwicklungsstand in Bezug auf die Komfortlautlängen ist folglich in der älteren, hörbeeinträchtigten Gruppe (zwischen 4 und 5 Monaten) in etwa vergleichbar mit dem Entwicklungsstand der jüngeren, gesunden Kontrollgruppe (zwischen 2 und 4 Monaten).

Das lässt vermuten, dass die Steuerung von Lautlängen abhängig von der auditiven Rückkopplung ist. Das fehlende auditive Feedback bei hörbeeinträchtigten Säuglingen scheint folglich bereits im Alter zwischen 2 und 5 Monaten für eine Entwicklungsverzögerung verantwortlich zu sein. Damit ist die Frage 1 der Arbeit für die hier untersuchte Stichprobe mit „ja“ zu beantworten.

4.2 Hat eine hochgradige Hörbeeinträchtigung einen Einfluss auf die Zwischenpausenlänge zwischen zwei Komfortlauten?

Es existieren nach Recherchen der Autorin keine vergleichbaren Studien, welche die Pausenlängen zwischen aufeinanderfolgenden Vokalisationen bei hörbeeinträchtigten Säuglingen untersuchten. In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten wurden jedoch die Pausenlängen zwischen zwei Vokalisationen bei hörgesunden Säuglingen ermittelt. Bei Betrachtung dieser Studien sollte vor einem Vergleich mit der hier vorliegenden Arbeit der jeweils definierte maximale Grenzwert für die Dauer einer Zwischenpausenlänge berücksichtigt werden. In der hier vorliegenden Arbeit wurde ein Wert von 7 Sekunden gewählt (s. hierzu Kapitel 2.6.2.2 und 4.5), während andere Autoren zum Teil geringere Grenzwerte festlegten (z.B. 3 Sekunden bei einer Studie von Gratier et al. (2015)). Auf diese Weise erklären sich die starken Schwankungen der maximalen gemessenen Pausenlängen (beispielsweise 2,6s in der Studie von Gratier et al. (2015) und 5,8s in einer Studie von Hilbrink et al. (2015) sowie 6,95s in der hier vorliegenden Arbeit).

Einige Autoren beschreiben etwas kürzere mittlere Zwischenpausenlängen als die Autorin der vorliegenden Arbeit (Beebe et al., 1988; d’Odorico et al., 1985; M. Gratier et al., 2015; Jasnow et al., 1986). In anderen Studien wurden sehr ähnliche Zwischenpausenlängen wie in der hier vorliegenden Arbeit ermittelt (Bateson, 1975; Hilbrink et al., 2015). Insgesamt sind die Ergebnisse der bei den hörgesunden Säuglingen ermittelten Lautpausen vergleichbar mit denen der in der Fachliteratur zu findenden Studien.

Bei den hörgesunden Säuglingen in der hier vorliegenden Arbeit war eine deutliche Abnahme der Pausenlängen im Altersverlauf zu beobachten (s. Abbildung 22). Die Aussagekraft dieses Ergebnisses ist jedoch eingeschränkt, da nicht jeder Proband in seinem Entwicklungsverlauf beobachtet wurde, sondern nur verschiedene Individuen in unterschiedlichem Alter. Nichtsdestotrotz ist dieses Ergebnis vergleichbar mit dem einer Arbeit von Hilbrink et al., bei der die Lautpausen von hörgesunden Säuglingen zwischen 3 und 18 Monaten gemessen wurden (Hilbrink et al., 2015). Zum einen wurde die Dauer der Zwischenlautpausen zwischen Vokalisationen eines Säuglings („within-turn pause“), zum anderen die Dauer der Pause zwischen Vokalisation der Mutter und darauffolgender

Vokalisation des Säuglings („gap durations“) gemessen. Ab einem Alter von etwa 4 Monaten war bei beiden Messvariablen eine deutliche Abnahme der Pausenlängen zu beobachten. Das jeweilige Minimum wurde für beide Messvariablen im Alter von etwa 5 Monaten gemessen. Die kürzeren Lautpausen im Alter von 3, 4 und 5 Monaten gehen folglich mit einem schnelleren Sprechrhythmus einher als die längeren Lautpausen im Alter von 9 Monaten. Die Autoren werten diese Ergebnisse als Beleg für die Interaktionsmotor-Hypothese und gehen davon aus, dass die Säuglinge aktiv am Prozess des „Turn-Takings“ beteiligt sind (Hilbrink et al., 2015). Die Interaktionsmotor-Hypothese (Levinson, 2006) besagt, dass die menschlichen interaktiven Fähigkeiten durch bestimmte anpassungsfähige Universalien gekennzeichnet sind, die insbesondere eine soziale Kooperation und Interpretation des Verhaltens anderer voraussetzen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der hier vorliegenden Arbeit war auffällig, dass die hörgesunden Säuglinge im Altersverlauf (zwischen 3 und 5 Monaten) ein deutlich schnelleres Sprechtempo entwickeln, indem ihre Lautpausen an Länge abnehmen. Im Gegensatz dazu tendieren die hörgeschädigten Säuglinge im Altersverlauf eher langsamer zu werden. Insgesamt jedoch ist das Sprechtempo der hörgeschädigten Säuglinge eher konstant im Altersverlauf, was für eine verlangsamte Entwicklung im Vergleich mit der Kontrollgruppe spricht.

Die hörgesunden Säuglinge erlernen schon sehr früh in ihrer Sprachentwicklung ihre Lautpausen auf die Äußerungen der Bezugsperson abzustimmen. Die gegenseitige Anpassung der Lautpausen auf die Äußerungen des „Gesprächspartners“ wurde bereits 1986 durch Jasnow et al. beobachtet und als „interpersonelle Akkomodation“ bezeichnet (Jasnow et al., 1986). Da die Lautpausen der hörbeeinträchtigten Säuglinge nicht wie in der Kontrollgruppe im Altersverlauf abnehmen, ist davon auszugehen, dass sich ihre Fähigkeit zur „interpersonellen Akkomodation“ durch die fehlende auditive Rückkopplung verzögert entwickelt. Bei vollständiger Taubheit ist eine zeitliche Abstimmung auf den Gesprächspartner nur durch das visuelle und propriozeptive System möglich. Dass das (nonverbale) Verhalten eines Säuglings durch visuelle und propriozeptive Stimulation beeinflusst werden kann, belegt beispielsweise eine Studie von Legerstee et al. (1990). Inwieweit bereits Säuglinge im Alter von 2 bis 5 Monaten ihre Lautpausen durch visuelle und propriozeptive Einflüsse an den „Gesprächspartner“

anpassen, bleibt allerdings unklar und müsste in nachfolgenden Studien untersucht werden.

Die Ergebnisse der hier vorliegenden Arbeit liefern weitere Belege dafür, dass der Prozess des „Turn-Takings“ bei einer Interaktion mit der Bezugsperson durch den Säugling mitbestimmt und beeinflusst wird. Als wichtige Voraussetzung zum Erlernen dieses Prozesses wird ein gesundes Hörvermögen postuliert.

Die in Kapitel 4.1 und 4.2 geschilderten Sachverhalte begründen auch die Ergebnisse bezüglich der Länge der Inter-Onset-Intervalle (s. Kapitel 3.4.1), die aus diesem Grund nicht separat diskutiert wurden.

4.3 Ergeben sich Unterschiede bezüglich der Varianz der Inter-Onset-Intervalle zwischen den Probanden einer Gruppe (Varianz_IOI)?

Bei Betrachtung der mittleren Inter-Onset-Intervalle pro Proband und Gruppe, fiel eine statistisch signifikante größere interindividuelle Streuung bei den normalhörenden Probanden im Vergleich zu den hörbeeinträchtigten Probanden auf (KG: $0,39s^2$ bis $5,49s^2$; PG: $1,97s^2$ bis $3,69s^2$; s. Abbildung 29). Dies ist vermutlich auf die vielen unterschiedlichen auditiven Einflüsse, denen die normalhörenden Probanden unterliegen, zurückzuführen. Ein normalhörender Säugling erhält ein auditives Feedback zum einen über seine eigenen Vokalisationen (internales Feedback), zum anderen über die Vokalisationen und Laute aus der Umgebung (externales Feedback). Die Imitation und Interaktion mit einer Bezugsperson spielen wie in Kapitel 2.6.2.2 erläutert bei der Sprachentwicklung eine große Rolle. Da jeder einzelne normalhörende Säuglinge somit sehr unterschiedliche Rückmeldungen durch unterschiedliche Umgebungen und Bezugspersonen erhält, erklärt sich eine starke interindividuelle Varianz. Im Gegensatz dazu scheint bei den hörbeeinträchtigten Säuglingen das fehlende auditive Feedback sowohl über die eigenen Vokalisationen als auch über die Vokalisationen aus der Umgebung eine größere interindividuelle Homogenität zu verursachen. Die Schlussfolgerung liegt nahe, dass die hörbeeinträchtigten Säuglinge weniger auf die Umgebung reagieren und die geringe Varianz der Inter-Onset-Intervalle mehr durch ihre innere propriozeptive Rückkopplung geprägt wird.

4.4 Hat eine hochgradige Hörbeeinträchtigung einen Einfluss auf den nPVI?

Wie in Kapitel 3.4.3 erläutert, ist der nPVI der KG (61) in der hier vorliegenden Arbeit statistisch signifikant kleiner als der nPVI der PG (86). Dies bedeutet, dass die jeweils aufeinanderfolgenden Inter-Onset-Intervalle einer Phrase pro hörgesundem Säugling ähnlicher sind als pro hörbeeinträchtigtem Säugling („paarweiser Variabilitätsindex“). Diese Beobachtung impliziert, dass die rhythmische Struktur der hörgesunden Säuglinge einer größeren Regelmäßigkeit unterliegt. Die Kontrollgruppe scheint somit besser in der Lage zu sein, ihre aufeinanderfolgenden Paare von Lauten und Lautpausen aufeinander abzustimmen und zu kontrollieren. Interessanterweise liegt der hier ermittelte nPVI der KG ($nPVI_{KG} = 61$) sehr nah an dem Wert, der von Grabe et al. ($nPVI_{German} = 59,7$) für die deutsche Sprache angegeben wurde (Grabe et al., 2005). Inwieweit diese Ähnlichkeit bereits als Vorstufe zu werten ist oder sie auf Zufall beruht, ist noch unklar, zeigt aber, dass sich die hörgesunden Säuglinge bereits im Alter von 2 bis 5 Monaten in Richtung einer geregelten Lautproduktion bewegen.

4.5 War das Intervall von sieben Sekunden gerechtfertigt?

Bei Betrachtung der Ergebnisse stellt sich die Frage, ob die Wahl des maximalen Grenzwerts für die Einteilung in rhythmische Einheiten (Phrasen) von sieben Sekunden gerechtfertigt war. In der Literatur sind nur wenige Studien vergleichbar mit der hier vorliegenden Arbeit. Andere Autoren wählten zum Teil kürzere (z.B. drei Sekunden bei Gratier et al. (2015); zwei Sekunden bei Kugiumutzakis et al. (1993)) oder längere Grenzwerte (z.B. zehn Sekunden bei Kokkinaki et al. (2000) und bei Heimann et al. (1999)). Ebenso wie Kokkinaki et al. (2000) hätte die Autorin der vorliegenden Arbeit ein zwei Sekunden andauerndes Intervall, insbesondere im untersuchten Altersspektrum, als zu limitiert für die Untersuchung rhythmischer Einheiten empfunden.

Auch in anderen Bereichen lässt sich ein Wechselspiel bei Mutter-Kind-Paaren mit ähnlichen zeitlichen Intervallen erkennen. So wurde beispielsweise bei Mutter-Kind-Interaktionen (u.a. Vokalisation, Lächeln, Gesichtsausdruck) bzw. beim Stillen von Säuglingen festgestellt, dass sich die Mutter-Kind-Paare in repetitiven Zyklen gegenseitig abstimmen und beeinflussen und sich auf diese Weise zum Teil von anderen Mutter-Kind-Paaren unterscheiden lassen (Kaye & Fogel, 1980; Kaye & Wells, 1980). Diese

Beobachtungen werden von den Autoren als Grundlage für die Entwicklung der flexiblen und komplexen Kommunikation innerhalb der menschlichen Spezies gewertet. Darüber hinaus beschrieb Fraisse eine zeitliche Periode von 3 - 6 Sekunden als grundlegendes Zeitintervall für menschliche motorische und perzeptive Funktionen (Fraisse, 1982).

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse ist das hier gewählte zeitliche Kriterium aus Sicht der Autorin ein vernünftiges Maß, um die Rhythmik von Säuglingsvokalisationen zu untersuchen. Nichtsdestotrotz kann es durchaus sinnvoll sein, in nachfolgenden Untersuchungen andere rhythmische Gruppierungen zu testen, indem dieses Kriterium verändert wird. Die Daten, die für die hier vorliegende Arbeit verwendet wurden, werden weiterhin im ZVES aufbewahrt, sodass eine erneute Auswertung mit einem veränderten zeitlichen Kriterium durch eine automatische Programmierung möglich und einfach durchzuführen wäre und im Interesse der Autorin liegt.

4.6 Mögliche Limitationen

Eine mögliche Limitation der Studie ist die Tatsache, dass produzierte Vokalisationen von Säuglingen stimmungs- und situationsabhängig sind (Lindová et al., 2015) und eine bestimmte Stimmung (z.B. Müdigkeit, Hunger, Stress) die Lautaufnahme beeinflussen könnte, insbesondere, wenn ein Säugling nur an einem Tag aufgenommen wurde.

Die Einschlusskriterien des Gesamtprojekts (s. Kapitel 2.1) erforderten, dass die Lautaufnahme eines Säuglings an dem Tag erfolgte, an dem er zum Kontrollscreening (NHS-Stufe 2) terminiert war. Für einen Säugling und dessen Eltern stellt ein solcher Termin häufig eine Stresssituation dar, da zu diesem Zeitpunkt noch unklar ist, ob bei dem Säugling eine Hörstörung vorliegt und die Eltern deshalb meist sehr besorgt sind.

Der Säugling ist aufgrund der ungewohnten Umgebung in der Klinik aufgeregt und schläft nicht immer zum gewünschten Zeitpunkt ein. Aus diesen Gründen war es während der Aufnahmesituation, die etwas später am selben Tag stattfand, teilweise anspruchsvoll, den Säugling zum Erzeugen von Komfortvokalisationen zu ermutigen. In einer entspannten und spielerischen Atmosphäre zu Hause hätten die Probanden sicherlich eine höhere Anzahl an gewünschten Vokalisationen geäußert. Da sich jedoch alle untersuchten Probanden in einer ähnlichen Situation befanden, ist die Vergleichbarkeit dennoch gegeben. Nicht zuletzt wurde die Tatsache, dass die meisten Probanden an nur einem Tag aufgenommen wurden, während von einzelnen Probanden Aufnahmen von bis zu vier

Tagen vorlagen, durch die statistische Auswertung mittels Mehrebenenmodell berücksichtigt und damit eine Verzerrung der Ergebnisse durch diesen möglichen Einflussfaktor minimiert (s. Kapitel 2.7.4).

Falls allerdings in einer zukünftigen Studie Komfortvokalisationen untersucht werden sollen, wäre es vermutlich sinnvoller, die Lautaufnahmen bei den Probanden zu Hause durchzuführen, um somit eine gewohnte Umgebung zu schaffen. Zudem sollten die Lautaufnahmen bei jedem Probanden in regelmäßigen Intervallen durchgeführt werden, um die Aussagekraft der Hypothesen bezüglich der Entwicklung im Altersverlauf zu erhöhen.

Wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, mussten die Rohdaten vor der Bearbeitung in PRAAT in kürzere Langserien geschnitten werden. Bei dieser Einteilung konnte es prinzipiell vorkommen, dass zusammenhängende Säuglingsvokalisationen zerteilt wurden und somit die Rhythmik in der späteren Auswertung gestört war. Die Verarbeitungskapazität der zur Verfügung stehenden Analysesysteme ließ jedoch nicht zu, dass längere Sequenzen bearbeitet werden konnten. Beim Schneiden der Langserien wurde immer darauf geachtet, dass zusammenhängende Säuglingsvokalisationen nicht zerschnitten wurden. Es ist gut vorstellbar, dass die längeren Pausen, die zwischen zwei Langserien liegen, ebenfalls eine eigene Rhythmik aufweisen. Diese Pausen wurden jedoch aus Kapazitätsgründen in der vorliegenden Arbeit nicht ausgewertet.

4.7 Vorschläge für weitere Analysen im Rahmen der Kohortenstudie

Im Rahmen der Auswertung der Daten der gesamten Kohortenstudie wäre es möglich, den Einfluss von Infant-directed-speech (IDS) auf die Sprachentwicklung von Säuglingen zu untersuchen. Das Phänomen der IDS wurde in den hier ausgewerteten Lautaufnahmen nicht selten beobachtet: Innerhalb der Phrasen wurden 48 Episoden von IDS dokumentiert, in den Phrasenpausen 53. Bei einem Probanden wurden im Mittel ca. 4 bis 5 Stimulationen durch die Bezugsperson mittels IDS beobachtet. Das Vorkommen von IDS wurde in dem von der Autorin bearbeiteten Datensatz dokumentiert, sodass zukünftige Analysen ermöglicht werden.

Es wäre beispielsweise interessant zu prüfen, ob das Vorkommen von IDS die Anzahl und Dauer von Lauten bzw. Lautpausen beeinflusst und inwiefern sich hierbei

Unterschiede bezüglich Kontroll- und Patientengruppe ergeben. Eine Studie von Kondaurova et al. liefert Hinweise darauf, dass eine Hörminderung die zeitliche Abstimmung, das Vorkommen von überlappenden Lauten zwischen Müttern und Säuglingen sowie die Dauer von Lautpausen beeinflusst (Kondaurova et al., 2020).

In der wissenschaftlichen Fachliteratur bleibt noch unklar, ob die häufig beobachteten Imitationen zum größten Teil von der Bezugsperson oder vom Säugling ausgehen. Es wäre somit durchaus sinnvoll die Messgröße „IDS“ in der gesamten Kohortenauswertung zu berücksichtigen.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist als Teilprojekt im Rahmen einer Kohortenstudie mit dem Titel „Analyse von Komfortlauten (babbling) bei Säuglingen zum Zeitpunkt des Neugeborenen-Hörscreening-2“ aus einer Kooperation des ZVES mit der Hals-Nasen-Ohren-Klinik des Universitätsklinikums Würzburg entstanden. Das Ziel dieser Arbeit war es wichtige hypothesengenerierende Ansätze für die Gesamtauswertung der Kohortenstudie zu liefern. Es sollte insbesondere die Fragestellung beantwortet werden, ob sich in den Komfortlautvokalisationen Unterschiede zwischen normalhörenden und hochgradig sensorineural hörgeschädigten Säuglingen bezüglich der Vokalisationslänge, Pausenlänge und rhythmischer Eigenschaften zeigen und damit die Sprachentwicklung bereits im untersuchten Altersspektrum von der auditiven Rückkopplung abhängig ist.

Die Autorin der vorliegenden Arbeit war seit Beginn der Kohortenstudie an der Rekrutierung der Daten, die im Rahmen des Neugeborenenhörscreenings in Form von Lautaufnahmen stattfand, beteiligt. Ein Großteil der in dieser Arbeit ausgewerteten Lautaufnahmen stammt aus dieser Kohortenstudie. Da dieser Datensatz jedoch zum Teil sehr heterogen war, wurden zusätzlich anonymisierte Daten aus Vorläuferprojekten des ZVES in die Analyse miteinbezogen. Insgesamt stammen die Daten, die in der vorliegenden Arbeit ausgewertet wurden, aus einer Gruppe von 24 Säuglingen, von denen 16 hörgesunde Säuglinge die Kontrollgruppe und 8 hochgradig hörgeschädigte Säuglinge (Schallempfindungsstörung nach WHO-Grad 3) die Patientengruppe bildeten. Die Säuglingsvokalisationen, die ausgewertet wurden, fanden alle in der Ausatmungsphase (Expiration) statt und wurden dem Typ der Komfortvokalisation zugeordnet.

Die Aufbereitung der Daten fand im Labor des ZVES mit dem Programm PRAAT statt, mithilfe dessen eine Lautaufnahme in verschiedene, zeitliche Abschnitte gegliedert und entsprechend gekennzeichnet wurde, u.a. Beginn und Ende einer Vokalisation und der dazwischenliegenden Pausen. Ein Teil dieser Bearbeitungsschritte wurde automatisiert mit einem speziellen Skript („Annotationshelper“) durchgeführt, um im Anschluss daran mit einer manuellen Kontrolle (visuell und auditiv) die einzelnen Abschnitte zu verifizieren. Alle Vokalisationen eines Säuglings, die im Sinne einer rhythmischen Einheit zusammengehörten, wurden als „Phrase“ bezeichnet. Es wurde festgelegt, dass

eine Pause zwischen zwei Vokalisationen innerhalb einer Phrase maximal sieben Sekunden andauern durfte. Alle länger andauernden Pausen wurden als „Phrasenpause“ bezeichnet. Auf diese Weise ergaben sich verschiedene zeitliche Messgrößen, die in einer Gesamtzeitentabelle zusammengefasst wurden. Zum Erhalt weiterer Messgrößen bezüglich der rhythmischen Analyse wurden sogenannte „Inter-Onset-Intervalle“ (per Definition der Zeitabschnitt vom Beginn einer Vokalisation bis zum Ende der darauffolgenden Pause) und der „normierte paarweise Variabilitätsindex“ (nPVI) berechnet.

Die Datenauswertung erfolgte mit dem Programm SPSS mithilfe von Mehrebenenmodellen, um der spezifischen Datenstruktur gerecht zu werden. Die Auswertung umfasste 1.489 E-Vokalisationen, wovon 842 von den Probanden der Kontrollgruppe und 647 von den Probanden der Patientengruppe erzeugt wurden.

Die komplexe Datenstruktur erforderte bezüglich der Signifikanztestung eine Aufteilung in Altersgruppen. Für die drei Messgrößen Vokalisationslänge, Zwischenpausenlänge und Inter-Onset-Intervall wurden ähnliche Beobachtungen beschrieben: Bis zu einem bestimmten Alter (ca. 100-122 Tage) waren die beobachteten Messgrößen bei den hörgesunden Säuglingen länger als bei den hochgradig hörbeeinträchtigten Altersgenossen, während sich dieses Verhältnis danach tendenziell umkehrte. Zur Einordnung in den bisherigen Wissensstand der Fachliteratur standen der Autorin nur wenige vergleichbare Daten zur Verfügung. Insbesondere wurden bei Klein- und Schulkindern sowie bei Erwachsenen längere Vokalisationen im Vergleich zu Hörgesunden nachgewiesen, was durchaus im Einklang mit den hier vorliegenden Ergebnissen steht. Zusätzlich stellten auch einzelne andere Autoren fest, dass hörgesunde Säuglinge ihre Vokalisationen und Lautpausen im Alter von vier bis fünf Monaten verkürzen. Des Weiteren ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen der Kontroll- und Patientengruppe bezüglich der Varianz der Inter-Onset-Intervalle und des nPVI.

Eine Erklärung für die hier aufgestellten Hypothesen könnte die Interaktionsmotorhypothese („turn-taking“) darstellen, nach der die (hörgesunden) Säuglinge in Interaktion mit einer Bezugsperson ihre Vokalisationen und Lautpausen anpassen und zeitlich abstimmen. Es wird postuliert, dass eine fehlende auditive Rückkopplung zu einer Entwicklungsverzögerung führt, die bereits im Alter von 2 bis 5 Monaten bei der Auswertung temporaler und rhythmischer Parameter messbar ist.

6 Literaturverzeichnis

- Barre, N., Morgan, A., Doyle, L. W., & Anderson, P. J. (2011). Language abilities in children who were very preterm and/or very low birth weight: a meta-analysis. *J Pediatr*, *158*(5), 766-774.e761.
- Bateson, M. C. (1975). Mother-infant exchanges: the epigenesis of conversational interaction. *Ann N Y Acad Sci*, *263*(1), 101-113.
- Beauchemin, M., Gonzalez-Frankenberger, B., Tremblay, J., Vannasing, P., Martinez-Montes, E., Belin, P., & Lassonde, M. (2011). Mother and stranger: an electrophysiological study of voice processing in newborns. *Cereb Cortex*, *21*(8), 1705-1711.
- Beebe, B., Alson, D., Jaffe, J., Feldstein, S., & Crown, C. (1988). Vocal congruence in mother-infant play. *J Psycholinguist Res*, *17*(3), 245-259.
- Berger, J., & Cunningham, C. C. (1983). Development of early vocal behaviors and interactions in Down's syndrome and nonhandicapped infant mother pairs. *Dev Psychol*, *19*, 322-331.
- Bettany, L. D. (2004). Range exploration of phonation and pitch in the first six months of life. *Master of Arts. University of Victoria*
- Bloom, K. (1989). Duration of early vocal sounds. *Infant Behavior and Development*, *12*(2), 245-250.
- Bloom, K., Russell, A., & Wassenberg, K. (1987). Turn taking affects the quality of infant vocalizations. *J Child Lang*, *14*(2), 211-227.
- Bourvis, N., Singer, M., Saint-Georges, C., Bodeau, N., Chetouani, M., Cohen, D., & Feldman, R. (2018). Pre-linguistic infants employ complex communicative loops to engage mothers in social exchanges and repair interaction ruptures. *Royal Society Open Science*, *5*.
- Bundesministerium für Gesundheit. (2008). Bekanntmachung eines Beschlusses des Gemeinsamen Bundesausschusses über eine Änderung der Kinder-Richtlinien: Einführung eines Neugeborenen-Hörscreenings. Zugriff am 16.09.2021. Verfügbar unter <https://www.g-ba.de/beschluesse/681/>
- Burke, W. F., Lenarz, T., & Maier, H. (2013). Hereditäre Schwerhörigkeit. *HNO*, *61*(4), 353-363.
- Cebulla, M., Hofmann, S., & Shehata-Dieler, W. (2014). Sensitivity of ABR based newborn screening with the MB11 BERAPhone((R)). *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, *78*(5), 756-761.
- Cebulla, M., & Shehata-Dieler, W. (2012). ABR-based newborn hearing screening with MB11 BERAPhone(R) using an optimized chirp for acoustical stimulation. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, *76*(4), 536-543.
- Clement, C. (2004). Development of vocalizations in deaf and normally hearing infants. *Dissertation. Universität Amsterdam*.

- Cuda, D., Guerzoni, L., Mariani, V., Murri, A., Biasucci, G., & Fabrizi, E. (2013). Production of Infant Scale Evaluation (PRISE) in Italian normal hearing children: A validation study. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 77(12), 1969-1974.
- d'Odorico, L., Franco, F., & Vidotto, G. (1985). Temporal Characteristics in Infant Cry and Non-Cry Vocalizations. *Language and Speech*, 28, 29 - 46.
- Davis, P. A. (1939). Effects of acoustic stimuli on the waking human brain. *Journal of Neurophysiology*, 2(6), 494-499.
- De Raeve, L. (2010). Education and rehabilitation of deaf children with cochlear implants: a multidisciplinary task. *Cochlear Implants Int*, 11 Suppl 1, 7-14.
- DeCasper, A. J., Lecanuet, J.-P., Busnel, M.-C., Granier-Deferre, C., & Maugeais, R. (1994). Fetal reactions to recurrent maternal speech. *Infant Behavior and Development*, 17(2), 159-164.
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Hertz-Pannier, L. (2003). Functional Neuroimaging of Speech Perception in Infants. *Science (New York, N.Y.)*, 298, 2013-2015.
- Dehaene-Lambertz, G., Hertz-Pannier, L., Dubois, J., Mériaux, S., Roche, A., Sigman, M., & Dehaene, S. (2006). Functional organization of perisylvian activation during presentation of sentences in preverbal infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(38), 14240-14245.
- Dehaene-Lambertz, G., Montavont, A., Jobert, A., Alliol, L., Dubois, J., Hertz-Pannier, L., & Dehaene, S. (2010). Language or music, mother or Mozart? Structural and environmental influences on infants' language networks. *Brain Lang*, 114(2), 53-65.
- Dikkenberg-Pot, I., & Koopmans-van Beinum, F. J. (1997). Number and duration of spoken utterances of deaf and normally hearing children between twelve and eighteen months. *Proceedings from the Institute of Phonetic Sciences, University of Amsterdam*, 21, 91-100.
- Eisenmann, M. S. (2021). Entwicklung, Testung und Anwendung von PRAAT Skripten zur semi-automatischen Vokalisationsanalyse im Rahmen der Vorsprachlichen Diagnostik am ZVES. *Dissertation. Universität Würzburg*.
- Elias, G., Hayes, A., & Broerse, J. (1986). Maternal control of co-vocalization and inter-speaker silences in mother-infant vocal engagements. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 27(3), 409-415.
- Englund, N., & Behne, D. M. (2020). Perception of audiovisual infant directed speech. *Scand J Psychol*, 61(2), 218-226.
- Fagan, M. K. (2009). Mean Length of Utterance before words and grammar: longitudinal trends and developmental implications of infant vocalizations. *J Child Lang*, 36(3), 495-527.
- Fagan, M. K. (2014). Frequency of vocalization before and after cochlear implantation: dynamic effect of auditory feedback on infant behavior. *J Exp Child Psychol*, 126, 328-338.
- Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S., & Marx, B. D. (2013). *Regression: Models, Methods and Applications*. Luxemburg: Springer Science & Business Media.

- Ferguson, C. A., Menn, L., & Stoel-Gammon, C. (1992). Phonological development: models, research, implications. *Language and Speech*, 37(3), 299-313.
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and Tempo. *Psychology of Music*, 149-180.
- Friederici, A. D., Friedrich, M., & Christophe, A. (2007). Brain Responses in 4-Month-Old Infants Are Already Language Specific. *Current Biology*, 17(14), 1208-1211.
- Ginsburg, G. P., & Kilbourne, B. K. (1988). Emergence of vocal alternation in mother-infant interchanges. *J Child Lang*, 15(2), 221-235.
- Götte, K., & Nicolai, T. (2010). *Pädiatrische HNO-Heilkunde* (2. Auflage). München: Elsevier GmbH.
- Grabe, E., & Low, E. L. (2005). Durational variability in speech and the rhythm class hypothesis. *Laboratory Phonology 7, Band 4-1 der Reihe Phonology and Phonetics*.
- Gratier, M., & Devouche, E. (2011). Imitation and repetition of prosodic contour in vocal interaction at 3 months. *Dev Psychol*, 47(1), 67-76.
- Gratier, M., Devouche, E., Guellai, B., Infanti, R., Yilmaz, E., & Parlato-Oliveira, E. (2015). Early development of turn-taking in vocal interaction between mothers and infants. *Front Psychol*, 6, 1167-1167.
- Gratier, M., Devouche, E., Guellai, B., Infanti, R., Yilmaz, E., & Parlato-Oliveira, E. (2015). Early development of turn-taking in vocal interaction between mothers and infants. *Front Psychol*, 6, 1167-1167.
- Hawa, V., & Spanoudis, G. (2014). Toddlers with delayed expressive language: An overview of the characteristics, risk factors and language outcomes. *Research in Developmental Disabilities*, 35(2), 400-407.
- Heimann, M., & Ullstadius, E. (1999). Neonatal imitation and imitation among children with autism and Down syndrome. In C. U. Press (Ed.), *Imitation in infancy* (pp. 235-253). Cambridge, UK: J Nadel & G Butterworth.
- Hilbrink, E. E., Gattis, M., & Levinson, S. C. (2015). Early developmental changes in the timing of turn-taking: a longitudinal study of mother-infant interaction. *Front Psychol*, 6, 1492.
- Hohle, B., Bijeljic-Babic, R., Herold, B., Weissenborn, J., & Nazzi, T. (2009). Language specific prosodic preferences during the first half year of life: evidence from German and French infants. *Infant Behav Dev*, 32(3), 262-274.
- Hoppe, U. (2008). Das Problem der Hörschwellenbestimmung in der objektiven Audiometrie. *HNO*, 56(10), 1011-1012.
- Houston, D. M., Stewart, J., Moberly, A., Hollich, G., & Miyamoto, R. T. (2012). Word learning in deaf children with cochlear implants: effects of early auditory experience. *Dev Sci*, 15(3), 448-461.
- Hox, J. J. (2010). *Multilevel analysis: : Techniques and Applications (Quantitative Methodology)*. New York: Routledge.

- Hsu, H.-C., Fogel, A., & Cooper, R. B. (2000). Infant vocal development during the first 6 months: speech quality and melodic complexity. *Infant and Child Development*, 9(1), 1-16.
- Huang, L. H., Kaga, K. T., Han, D. M., & Wang, T. (2005). Comparison of vocalization development between normal and congenitally hearing impaired infants during pre-language period. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 85(11), 765-768.
- Imada, T., Zhang, Y., Cheour, M., Taulu, S., Ahonen, A., & Kuhl, P. K. (2006). Infant speech perception activates Broca's area: a developmental magnetoencephalography study. *Neuroreport*, 17(10), 957-962.
- Jardri, R., Pins, D., Houfflin-Debarge, V., Chaffiotte, C., Rocourt, N., Pruvo, J. P., . . . Thomas, P. (2008). Fetal cortical activation to sound at 33 weeks of gestation: a functional MRI study. *Neuroimage*, 42(1), 10-18.
- Jasnow, M., & Feldstein, S. (1986). Adult-like temporal characteristics of mother-infant vocal interactions. *Child Dev*, 57(3), 754-761.
- Kalashnikova, M., Peter, V., Di Liberto, G. M., Lalor, E. C., & Burnham, D. (2018). Infant-directed speech facilitates seven-month-old infants' cortical tracking of speech. *Sci Rep*, 8(1), 13745.
- Kaye, K., & Fogel, A. (1980). The Temporal Structure of Face-to-Face Communication Between Mothers and Infants. *Dev Psychol*, 16, 454-464.
- Kaye, K., & Wells, A. J. (1980). Mothers' jiggling and the bursî pause pattern in neonatal feeding. *Infant Behav Dev*, 3, 29-46.
- Kent, R. D. (1992). *The Acoustic analysis of speech*. San Diego, California: Singular Publishing Group.
- Kishon-Rabin, L., Taitelbaum-Swead, R., Ezrati-Vinacour, R., & Hildesheimer, M. (2005). Prelexical vocalization in normal hearing and hearing-impaired infants before and after cochlear implantation and its relation to early auditory skills. *Ear Hear*, 26(4 Suppl), 17s-29s.
- Kokkinaki, T., & Kugiumutzakis, G. (2000). Basic aspects of vocal imitation in infant-parent interaction during the first 6 months. *Journal of Reproductive and Infant Psychology*, 18(3), 173-187.
- Kondaurova, M. V., Smith, N. A., Zheng, Q., Reed, J., & Fagan, M. K. (2020). Vocal Turn-Taking Between Mothers and Their Children With Cochlear Implants. *Ear Hear*, 41(2), 362-373.
- Koopmans-van Beinum, F. J., Clement, C. J., & I., D.-P. (2001). Babbling and the lack of auditory speech perception: a matter of coordination? *Developmental Science*, 4(1), 61-70.
- Korver, A. M. H., Konings, S., Dekker, F. W., Beers, M., Wever, C. C., Frijns, J. H. M., & Oudesluys-Murphy, A. M. (2010). Newborn Hearing Screening vs Later Hearing Screening and Developmental Outcomes in Children With Permanent Childhood Hearing Impairment. *JAMA*, 304(15), 1701-1708.

- Kugiumutzakis, G. (1993). Intersubjective vocal imitation in early mother-infant interaction. *New perspectives in early communicative development*, 23-47.
- Kuhl, P. K., & Meltzoff, A. N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: vocal imitation and developmental change. *J Acoust Soc Am*, 100(4 Pt 1), 2425-2438.
- Laufer, M. Z., & Horii, Y. (1977). Fundamental frequency characteristics of infant non-distress vocalization during the first twenty-four weeks. *J Child Lang*, 4(2), 171-184.
- Lee, V. E. (2000). Using Hierarchical Linear Modeling to Study Social Contexts: The Case of School Effects. *Educational Psychologist*, 35(2), 125-141.
- Legerstee, M., Corter, C., & Kienapple, K. (1990). Hand, arm, and facial actions of young infants to a social and nonsocial stimulus. *Child Dev*, 61(3), 774-784.
- Lehnhardt, E., & Laszig, R. (2001). *Praxis der Audiometrie*. Stuttgart: Thieme.
- Levinson, S. C. (2006). On the human "interaction engine". *Roots of Human Sociality. Culture, Cognition and Interactions*, 39 - 69.
- Lieberman, P. (1985). The Physiology of Cry and Speech in Relation to Linguistic Behavior. In B. M. Lester & C. F. Zachariah Boukydis (Eds.), *Infant Crying: Theoretical and Research Perspectives* (pp. 29-57). Boston, MA: Springer US.
- Lindová, J., Špinka, M., & Nováková, L. (2015). Decoding of Baby Calls: Can Adult Humans Identify the Eliciting Situation from Emotional Vocalizations of Preverbal Infants? *PLoS One*, 10(4), e0124317.
- Lynch, M. P., Oller, D. K., Steffens, M. L., & Buder, E. H. (1995). Phrasing in prelinguistic vocalizations. *Developmental Psychobiology*, 28(1), 3-25.
- Mampe, B. (2013). Auswirkungen der pränatalen Sprachumgebung auf die Schreimelodie – Ein Vergleich zwischen Neugeborenen mono- und bilingualer Mütter. *Dissertation. Universität Würzburg*.
- 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.
- McCreery, R. W., Walker, E. A., Spratford, M., Oleson, J., Bentler, R., Holte, L., & Roush, P. (2015). Speech Recognition and Parent Ratings From Auditory Development Questionnaires in Children Who Are Hard of Hearing. *Ear Hear*, 36 Suppl 1(0 1), 60-75.
- Moeller, M. P., Hoover, B., Putman, C., Arbataitis, K., Bohnenkamp, G., Peterson, B., . . . Stelmachowicz, P. (2007). Vocalizations of infants with hearing loss compared with infants with normal hearing: Part I--phonetic development. *Ear Hear*, 28(5), 605-627.
- Möller, S., & Schönweiler, R. (1999). Analysis of infant cries for the early detection of hearing impairment. *Speech Communication*, 28(3), 175-193.
- Moura, C. P., Cunha, L. M., Vilarinho, H., Cunha, M. J., Freitas, D., Palha, M., . . . Pais-Clemente, M. (2008). Voice parameters in children with Down syndrome. *J Voice*, 22(1), 34-42.

- 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. *J Speech Lang Hear Res*, 50(6), 1425-1444.
- Nazzi, T., Nishibayashi, L. L., Berdasco-Muñoz, E., Baud, O., Biran, V., & Gonzalez-Gomez, N. (2015). Acquisition du langage chez l'enfant prématuré durant la première année de vie. *Archives de Pédiatrie*, 22(10), 1072-1077.
- O'Hare, A., & Bremner, L. (2016). Management of developmental speech and language disorders: Part 1. *Arch Dis Child*, 101(3), 272-277.
- Oller, D. K. (1980). The emergence of the sound of speech in infancy. *Child phonology (Perspectives in neurolinguistics, neuropsychology and psycholinguistics)*, S. 93-112.
- Oller, D. K. (2000). *The emergence of the speech capacity*. Mahwah, New Jersey: Erlbaum.
- Oller, D. K., & Eilers, R. E. (1988). *The Role of Audition in Infant Babbling* (Vol. 59).
- 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. *J Speech Hear Res*, 28(1), 47-63.
- Oller, D. K., & Lynch, M. P. (1992). Infant vocalizations and innovations in infraphonology: Toward a broader theory of development and disorders. *Phonological development: Models, research, implications*, 509-536.
- Otapowicz, D., Sobaniec, W., Kulak, W., & Okurowska-Zawada, B. (2005). Time of cooing appearance and further development of speech in children with cerebral palsy. *Rocz Akad Med Bialymst*, 50 Suppl 1, 78-81.
- Pablo, I., Murillo, E., & Romero, A. (2020). The effect of infant-directed speech on early multimodal communicative production in Spanish and Basque. *J Child Lang*, 47(2), 457-471.
- Papoušek, M. (1994). *Vom erster Schrei zum ersten Wort: Anfänge der Sprachentwicklung in der vorsprachlichen Kommunikation*. Bern; Göttingen; Toronto; Seattle: Verlag Hans Huber.
- Papoušek, M., & Papoušek, H. (1989). Forms and functions of vocal matching in interactions between mothers and their precanonical infants. *First Language*, 9(6), 137-157.
- Partanen, E., Kujala, T., Näätänen, R., Liitola, A., Sambeth, A., & Huotilainen, M. (2013). Learning-induced neural plasticity of speech processing before birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(37), 15145-15150.
- Pimperton, H., & Kennedy, C. R. (2012). The impact of early identification of permanent childhood hearing impairment on speech and language outcomes. *Archives of Disease in Childhood*, 97(7), 648-653.
- Quinto, L., Thompson, W. F., & Keating, F. L. (2013). Emotional communication in speech and music: the role of melodic and rhythmic contrasts. *Front Psychol*, 4, 184.
- Rabe-Hesketh, S., & Skrondal, A. (2012). *Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Volume I: Continuous Responses*: Stata Press.

- Ramsdell-Hudock, H. L., Stuart, A., & Parham, D. F. (2018). Utterance Duration as It Relates to Communicative Variables in Infant Vocal Development. *J Speech Lang Hear Res*, *61*(2), 246-256.
- Ravignani, A., & Norton, P. (2017). Measuring rhythmic complexity: A primer to quantify and compare temporal structure in speech, movement, and animal vocalizations. *Journal of Language Evolution*, *2*.
- Reissland, N., & Stephenson, T. (1999). Turn-taking in early vocal interaction: A comparison of premature and term infants' vocal interaction with their mothers. *Child: care, health and development*, *25*, 447-456.
- Reiter, R., Pickhard, A., & Brosch, S. (2012). Periphere Hörstörungen und Spracherwerb. [Hearing Impairment and Language Development]. *Laryngo-Rhino-Otol*, *91*(09), 550-559.
- Robb, M., & Pang-Ching, G. (1992). Relative timing characteristics of hearing-impaired speakers. *J Acoust Soc Am*, *91*, 2954-2960.
- Ryalls, J., & Larouche, A. (1992). Acoustic Integrity of Speech Production in Children With Moderate and Severe Hearing Impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *35*(1), 88-95.
- Saint-Georges, C., Chetouani, M., Cassel, R., Apicella, F., Mahdhaoui, A., Muratori, F., . . . Cohen, D. (2013). Motherese in interaction: at the cross-road of emotion and cognition? (A systematic review). *PLoS One*, *8*(10), e78103.
- Schaffer, H. R. (1977). Studies in mother-infant interaction. *Proceedings of the Loch Lomond symposium, Ross Priory, University of Strathclyde, September, 1975*.
- 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.
- Scheiner, E., Hammerschmidt, K., Jurgens, U., & Zwirner, P. (2004). The influence of hearing impairment on preverbal emotional vocalizations of infants. *Folia Phoniatr Logop*, *56*(1), 27-40.
- Sereschk, N. (2018). Temporale Eigenschaften ingressiver und egressiver Phonationsleistungen gesunder Neugeborener. *Dissertation. Universität Würzburg*.
- Shehata-Dieler, W. E., Dieler, R., Wenzel, G., Keim, R., Singer, D., & von Deuster, C. (2002). Das Würzburger Hörscreening-Programm bei Neugeborenen: Erfahrungen bei mehr als 4000 Säuglingen – Einfluss nichtpathologischer Faktoren auf die Messergebnisse. *Laryngorhinootol*, *81*: 204-210.
- Shehata-Dieler, W. E., 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.
- Silva, P. A., Williams, S., & McGee, R. (1987). A longitudinal study of children with developmental language delay at age three: later intelligence, reading and behaviour problems. *Dev Med Child Neurol*, *29*(5), 630-640.

- Snowling, M. J., Bishop, D. V., Stothard, S. E., Chipchase, B., & Kaplan, C. (2006). Psychosocial outcomes at 15 years of children with a preschool history of speech-language impairment. *J Child Psychol Psychiatry*, 47(8), 759-765.
- Stark, R. E. (1980). Stages of speech development in the first year of life. In G. H. Yeni-Komshian, J. F. Kavanagh, & C. A. Ferguson (Eds.), *Child Phonology* (pp. 73-92): Academic Press.
- Stern, L. M., Connell, T. M., Lee, M., & Greenwood, G. (1995). The Adelaide preschool language unit: results of follow-up. *J Paediatr Child Health*, 31(3), 207-212.
- Stoel-Gammon, C. (1988). Prelinguistic Vocalizations of Hearing-Impaired and Normally Hearing Subjects A Comparison of Consonantal Inventories. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 53(3), 302-315.
- Suppanen, E., Huotilainen, M., & Ylinen, S. (2019). Rhythmic structure facilitates learning from auditory input in newborn infants. *Infant Behavior and Development*, 57, 101346.
- Telkemeyer, S., Rossi, S., Koch, S. P., Nierhaus, T., Steinbrink, J., Poeppel, D., . . . Wartenburger, I. (2009). Sensitivity of newborn auditory cortex to the temporal structure of sounds. *J Neurosci*, 29(47), 14726-14733.
- Tomblin, J. B., Harrison, M., Ambrose, S. E., Walker, E. A., Oleson, J. J., & Moeller, M. P. (2015). Language Outcomes in Young Children with Mild to Severe Hearing Loss. *Ear Hear*, 36 Suppl 1(0 1), 76-91.
- Toussaint, G. T. (2012). The Pairwise Variability Index as a Tool in Musical Rhythm Analysis. *Musicae Scientiae*.
- Trepel, M., & Dalkoswky, K. (2015). *Neuroanatomie. Struktur und Funktion: 5. Auflage* Urban & Fischer 2011.
- van Noort-van der Spek, I. L., Franken, M.-C. J. P., & Weisglas-Kuperus, N. (2012). Language Functions in Preterm-Born Children: A Systematic Review and Meta-analysis. *Pediatrics*, 129(4), 745-754.
- Vohr, B. R. (2014). Speech and language outcomes of very preterm infants. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 19(2), 78-83.
- von Hapsburg, D., & Davis, B. L. (2006). Auditory sensitivity and the prelinguistic vocalizations of early-amplified infants. *J Speech Lang Hear Res*, 49(4), 809-822.
- Wanrooij, K., Boersma, P., & van Zuijen, T. L. (2014). Fast phonetic learning occurs already in 2-to-3-month old infants: an ERP study. *Front Psychol*, 5, 77.
- Weber, C., Hahne, A., Friedrich, M., & Friederici, A. D. (2004). Discrimination of word stress in early infant perception: electrophysiological evidence. *Brain Res Cogn Brain Res*, 18(2), 149-161.
- Wermke, K. (2002). *Untersuchung der Melodieentwicklung im Säuglingsschrei von monozygoten Zwillingen in den ersten 5 Lebensmonaten*. Humboldt-Universität zu Berlin, Medizinische Fakultät - Universitätsklinikum Charité,

- Wermke, K., Haschemi, A. A., Hesse, V., & Robb, M. P. (2018). Inspiratory Phonation in Baby Voice. *J Voice*, 32(2), 185-191.
- Wermke, K., Mende, W., Decety, J., & Cacioppo, J. T. (2011). From Emotion to Notion: The Importance of Melody, 624 – 648.
- 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.
- Wirtz, M., & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen* (1. Auflage). Göttingen: Hogrefe.
- Yoshinaga-Itano, C. (1999). Benefits of early intervention for children with hearing loss. *Otolaryngol Clin North Am*, 32(6), 1089-1102.
- Zeskind, P. S., Parker-Price, S., & Barr, R. G. (1993). Rhythmic organization of the sound of infant crying. *Developmental Psychobiology*, 26(6), 321-333.

Appendix

I. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------|---|
| A | Aufnahmetag |
| AIC | Akaike Informationskriterium |
| BERA | Brainstem evoked response audiometry (Hirnstammaudiometrie) |
| CHC | Comprehensive Hearing Center |
| e / E-Vokalisation | Komfortvokalisation während einer Expiration |
| FS | Frequenzspektrogramm |
| HNO | Hals-Nasen-Ohren |
| ICC | Intraclass correlation coefficient |
| IDS | Infant-Directed-Speech |
| IOI | Inter-Onset-Intervall |
| IP | Inspirationsphonation |
| KG | Kontrollgruppe |
| KLP | Kurzlautpause |
| LKGS | Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalte |
| LP | Lautpause |
| M | Männlich |
| Max | Maximum |
| Min | Minimum |
| MW | Arithmetischer Mittelwert |
| N | Anzahl |
| NHS | Neugeborenenhörscreening |
| nPVI | Normierter paarweiser Variabilitätsindex |
| P | Phrase |
| PG | Patientengruppe |
| PP | Phrasenpause |
| S | Strophe |
| SD | Standardabweichung |
| SD / Std.-Abw. | Standardabweichung |
| SES | Schallempfindungsstörung |

| | |
|------|---|
| SPSS | Superior Performing Software System |
| SSW | Schwangerschaftswoche |
| TG | Textgrid |
| W | Weiblich |
| ZP | Zwischenpause |
| ZS | Zeitsignal |
| ZVES | Zentrum für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen |

II. Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Elektrische Reaktionsaudiometrie, Abbildung nach Amboss GmbH (2017), Kapitel: Audiometrische Verfahren in der HNO. | 5 |
| Abbildung 2: | Studiendesign des Projekts „Analyse von Komfortlauten (babbling) bei Säuglingen zum Zeitpunkt des Neugeborenen-Hörscreening-2“ | 12 |
| Abbildung 3: | PRAAT-Ausgabebeispiel einer E-Vokalisation eines Probanden aus der Kontrollgruppe im Alter von 65 Tagen. | 21 |
| Abbildung 4: | Schema zur Gliederung einer Langserie in zeitliche Abschnitte..... | 23 |
| Abbildung 5: | Beispiel einer Langserie eines gesunden Probanden im Alter von 109 Tagen mit dem dazugehörigen, annotierten Textgrid in PRAAT..... | 27 |
| Abbildung 6: | Ausschnitt der Phrase 1 (P1) – roter Rahmen in Abbildung 5. | 27 |
| Abbildung 7: | Ausschnitt der Phrase 2 (P2) – grüner Rahmen in Abbildung 5..... | 28 |
| Abbildung 8: | Schematische Darstellung der Inter-Onset-Intervalle (IOI) in einer Langserie..... | 32 |
| Abbildung 9: | Berechnung des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI), Formel nach Ravnani und Norton (2017)..... | 32 |
| Abbildung 10: | Darstellung der hierarchischen 5-Ebenenstruktur (eigene Darstellung) | 35 |
| Abbildung 11: | Histogramm der Phrasenlängen der gesamten Probandengruppe | 37 |
| Abbildung 12: | Histogramm der Phrasenlängen der Kontrollgruppe | 38 |
| Abbildung 13: | Histogramm der Phrasenlängen der Patientengruppe..... | 38 |
| Abbildung 14: | Histogramm der Vokalisationslängen (tE) der gesamten Probandengruppe | 40 |
| Abbildung 15: | Histogramm der Vokalisationslängen (tE) der Kontrollgruppe..... | 41 |
| Abbildung 16: | Histogramm der Vokalisationslängen (tE) der Patientengruppe | 41 |
| Abbildung 17: | Streudiagramm zur Darstellung des Alterseffekts der Messgröße tE [ms]..... | 42 |
| Abbildung 18: | Boxplot-Diagramm zur Darstellung der altersabhängigen Gruppeneffekte der Messgröße tE [ms]..... | 43 |
| Abbildung 19: | Histogramm der Zwischenpausenlängen (tZP) der gesamten Probandengruppe | 47 |
| Abbildung 20: | Histogramm der Zwischenpausenlängen (tZP) der Kontrollgruppe..... | 48 |
| Abbildung 21: | Histogramm der Zwischenpausenlängen (tZP) der Patientengruppe | 48 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 22: Streudiagramm zur Darstellung des Alterseffekts der Messgröße tZP [ms]..... | 49 |
| Abbildung 23: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der altersabhängigen Gruppeneffekte der Messgröße tZP [ms] | 50 |
| Abbildung 24: Histogramm der Inter-Onset-Intervalle (tIOI) der gesamten Probandengruppe | 54 |
| Abbildung 25: Histogramm der Inter-Onset-Intervalle der Kontrollgruppe..... | 54 |
| Abbildung 26: Histogramm der Inter-Onset-Intervalle der Patientengruppe | 54 |
| Abbildung 27: Streudiagramm zur Darstellung des Alterseffekts der Messgröße tIOI [ms]..... | 55 |
| Abbildung 28: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der altersabhängigen Gruppeneffekte der Messgröße tIOI [ms]..... | 56 |
| Abbildung 29: Darstellung der Messgröße Varianz_IOI pro Proband und Gruppe | 60 |
| Abbildung 30: Streudiagramm zur Darstellung des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI) im Altersverlauf | 61 |
| Abbildung 31: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Gruppenunterschiede des mittleren nPVI pro Proband..... | 64 |
| Abbildung 32: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße tP auf Normalverteilung | 10 |
| Abbildung 33: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alterseffekts in der gesamten Probandengruppe | 11 |
| Abbildung 34: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alterseffekts in der gesamten Probandengruppe | 11 |
| Abbildung 35: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 12 |
| Abbildung 36: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 12 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 37: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße tE [ms] auf Normalverteilung..... | 13 |
| Abbildung 38: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 14 |
| Abbildung 39: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe..... | 14 |
| Abbildung 40: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe < 122 Tage | 15 |
| Abbildung 41: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe < 122 Tage | 15 |
| Abbildung 42: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 122 Tage | 16 |
| Abbildung 43: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 122 Tage | 16 |
| Abbildung 44: QQ-Diagramm zur Prüfung der transformierten Messgröße tZP [ms] auf Normalverteilung..... | 17 |
| Abbildung 45: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 18 |
| Abbildung 46: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe..... | 18 |
| Abbildung 47: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 98 Tage | 19 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 48: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 98 Tage | 19 |
| Abbildung 49: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 98 Tage | 20 |
| Abbildung 50: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 99 Tage | 20 |
| Abbildung 51: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße tIOI [ms] auf Normalverteilung | 21 |
| Abbildung 52: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 22 |
| Abbildung 53: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 22 |
| Abbildung 54: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 103 Tage | 23 |
| Abbildung 55: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 103 Tage | 23 |
| Abbildung 56: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 104 Tage | 24 |
| Abbildung 57: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 104 Tage | 24 |
| Abbildung 58: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße nPVI auf Normalverteilung | 25 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 59: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 26 |
| Abbildung 60: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe | 26 |
| Abbildung 61: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße MW_nPVI auf Normalverteilung | 27 |

III. Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1: | Parameter der Probanden der Kontrollgruppe..... | 16 |
| Tabelle 2: | Parameter der Probanden der Patientengruppe..... | 17 |
| Tabelle 3: | Erklärungen für die in Textgrid 1 verwendeten Abkürzungen..... | 24 |
| Tabelle 4: | Erklärungen für die in Textgrid 2 verwendeten Abkürzungen..... | 25 |
| Tabelle 5: | Datenbasis | 30 |
| Tabelle 6: | Messgrößen zur Analyse der temporalen und rhythmischen Lauteigenschaften..... | 31 |
| Tabelle 7: | Messungen zur Reliabilitätsprüfung für die Messgrößen tP, tIOI, tE und tZP..... | 33 |
| Tabelle 8: | Deskriptive Analyse der Phrasenlängen (tP) [s]..... | 37 |
| Tabelle 9: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße tP [s] für die gesamte Probandengruppe | 39 |
| Tabelle 10: | Deskriptive Analyse der Länge der E-Vokalisationen (tE) [ms]..... | 40 |
| Tabelle 11: | Deskriptive Analyse von tE [ms] mit Aufteilung in zwei Altersgruppen (\leq 121 und \geq 122 Tage)..... | 43 |
| Tabelle 12: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße tE [ms] für die gesamte Probandengruppe | 45 |
| Tabelle 13: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße tE [ms] für die Altersgruppe \leq 121 Tage | 45 |
| Tabelle 14: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße tE [ms] für die Altersgruppe \geq 122 Tage | 46 |
| Tabelle 15: | Deskriptive Analyse der Zwischenpauselängen (tZP) [ms] | 46 |
| Tabelle 16: | Deskriptive Analyse von tZP [ms] mit Aufteilung in zwei Altersgruppen (\leq 98 und \geq 99 Tage) | 49 |
| Tabelle 17: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die transformierte Messgröße tZP [ms] für die gesamte Probandengruppe..... | 51 |
| Tabelle 18: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tZP für die Altersgruppe \leq 98 Tage | 52 |
| Tabelle 19: | Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tZP für die Altersgruppe \geq 99 Tage | 52 |
| Tabelle 20: | Deskriptive Analyse von tIOI [ms] | 53 |

| | |
|--|----|
| Tabelle 21: Deskriptive Analyse von tIOI [ms] mit Aufteilung in zwei Altersgruppen (≤ 103 und ≥ 104 Tage) | 56 |
| Tabelle 22: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße tIOI [ms] für die gesamte Probandengruppe | 58 |
| Tabelle 23: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tIOI für die Altersgruppe ≤ 103 Tage..... | 58 |
| Tabelle 24: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die transformierte Messgröße tIOI für die Altersgruppe ≥ 104 Tage..... | 59 |
| Tabelle 25: Deskriptive Analyse des normierten paarweisen Variabilitätsindex (nPVI) [dimensionslos] | 61 |
| Tabelle 26: Finales Modell zur Untersuchung der Interaktion zwischen Gruppen- und Alterseffekts auf die logarithmierte Messgröße nPVI für die gesamte Probandengruppe..... | 62 |
| Tabelle 27: Finales Modell zur Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße nPVI für die gesamte Probandengruppe..... | 62 |
| Tabelle 28: Untersuchung des Gruppeneffekts auf die logarithmierte Messgröße MW_nPVI..... | 63 |
| Tabelle 29: Wissenschaftliche Arbeiten zum Vergleich von Vokalisationslängen zwischen Hörgesunden und Hörgeschädigten..... | 67 |
| Tabelle 30: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße tP [ms]..... | 10 |
| Tabelle 31: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße tE [ms]..... | 13 |
| Tabelle 32: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der transformierten Messgröße tZP [ms] | 17 |
| Tabelle 33: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße tIOI [ms] | 21 |
| Tabelle 34: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße nPVI | 25 |

IV. Anhang

Tabelle 30: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße tP [ms]

Legende: AIC = Akaike Informationskriterium; Modell 1: Berechnung des Alterseffekts in der gesamten Probandengruppe; Modell 2: Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe; tP = Phrasenlänge.

| | AIC-Werte im Modell 1 | AIC-Werte im Modell 2 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Modellebenen | | |
| Proband | 274,147 | 272,336 |
| Proband + Aufnahmezeit | 277,129 | 286,202 |
| Proband + Aufnahmezeit + Phrase | 281,633 | 278,809 |

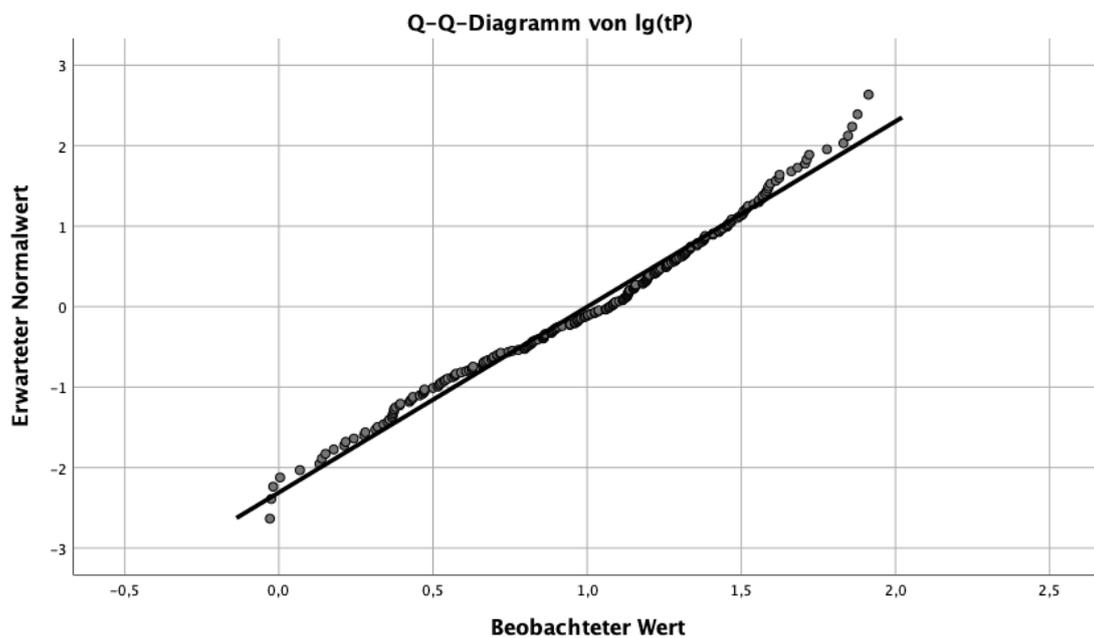


Abbildung 32: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße tP auf Normalverteilung

Legende: lg(tP) = logarithmierte Messgröße „Phrasenlänge“.

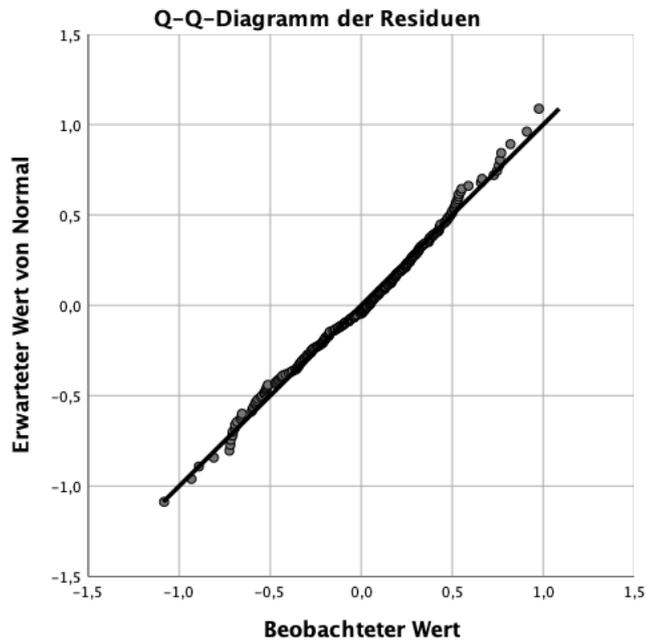


Abbildung 33: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alterseffekts in der gesamten Probandengruppe
Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Phrasenlänge“.

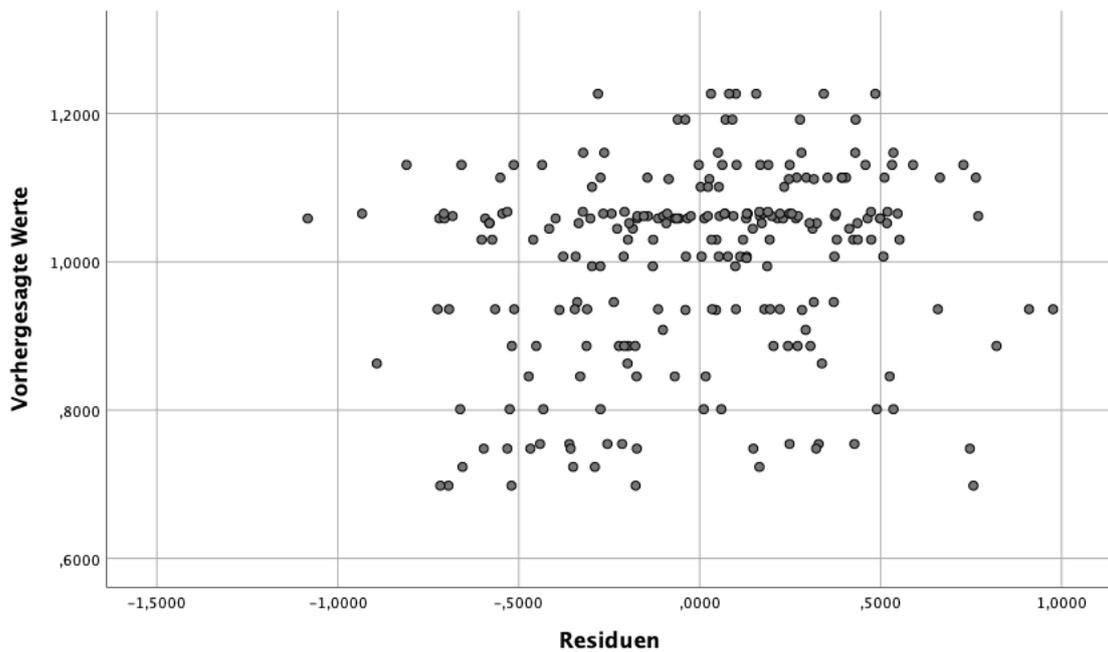


Abbildung 34: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alterseffekts in der gesamten Probandengruppe
Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Phrasenlänge“.

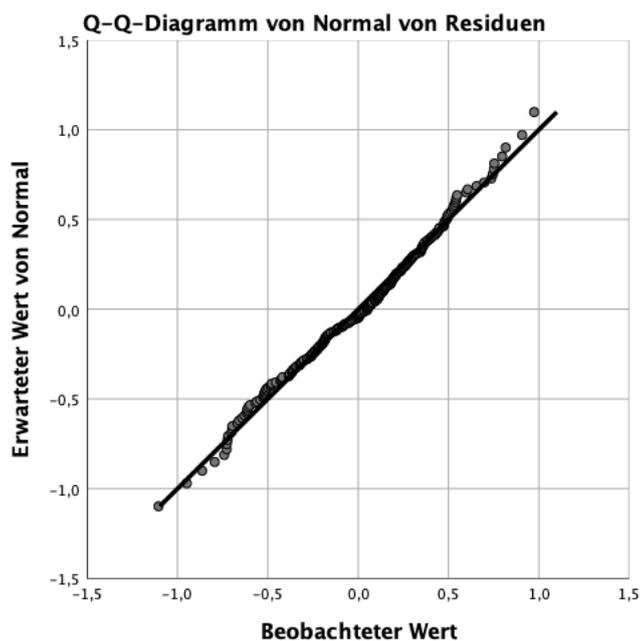


Abbildung 35: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Phrasenlänge“.

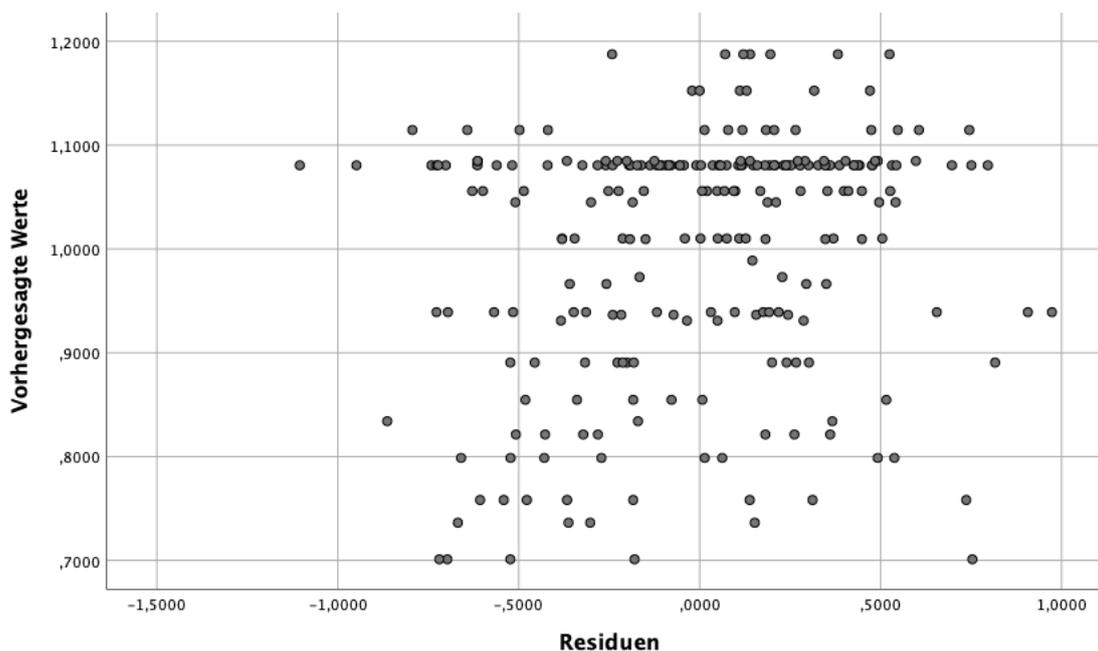


Abbildung 36: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Phrasenlänge“.

Tabelle 31: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße tE [ms]

Legende: AIC = Akaike Informationskriterium;

Modell 1: Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe;

Modell 2: Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe < 122 Tage;

Modell 3: Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe \geq 122 Tage; tE = Vokalisationslänge.

| | AIC-Werte im Modell 1 | AIC-Werte im Modell 2 | AIC-Werte im Modell 3 |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Modellebenen | | | |
| Proband | 465,823 | 383,818 | 72,130 |
| Proband + Aufnahme-tag | 461,011 | 383,692 | 74,130 |
| Proband + Aufnahme-tag + Phrase | 482,946 | 397,633 | 85,097 |

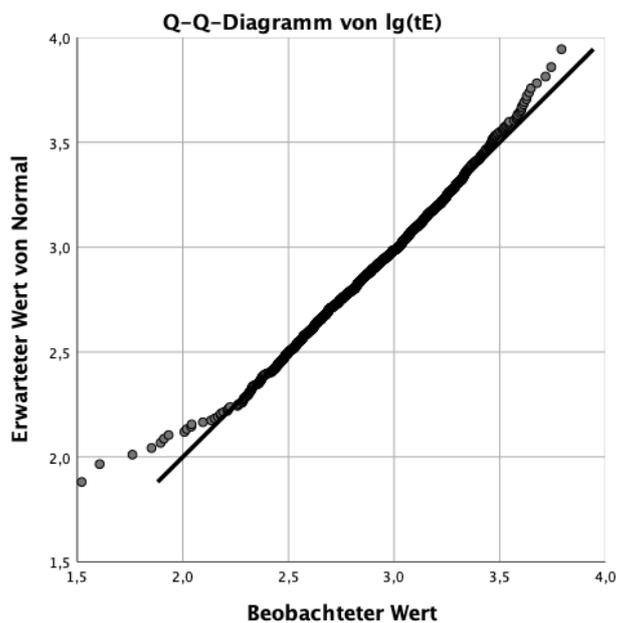


Abbildung 37: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße tE [ms] auf Normalverteilung

Legende: lg(tE) = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

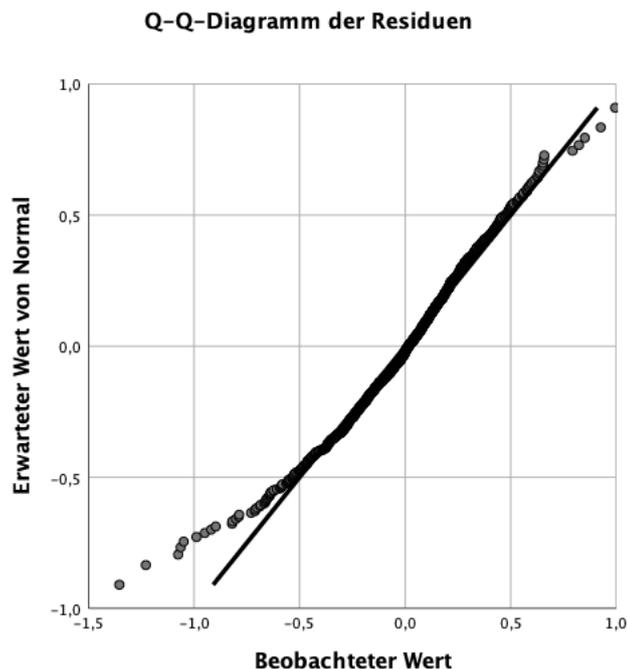


Abbildung 38: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

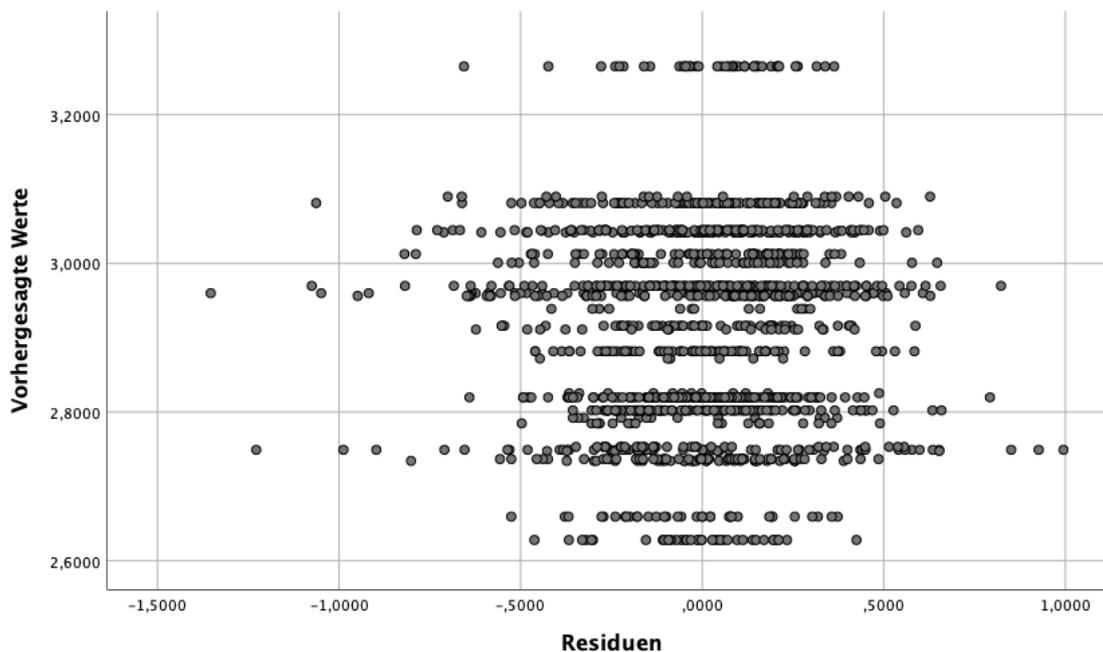


Abbildung 39: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

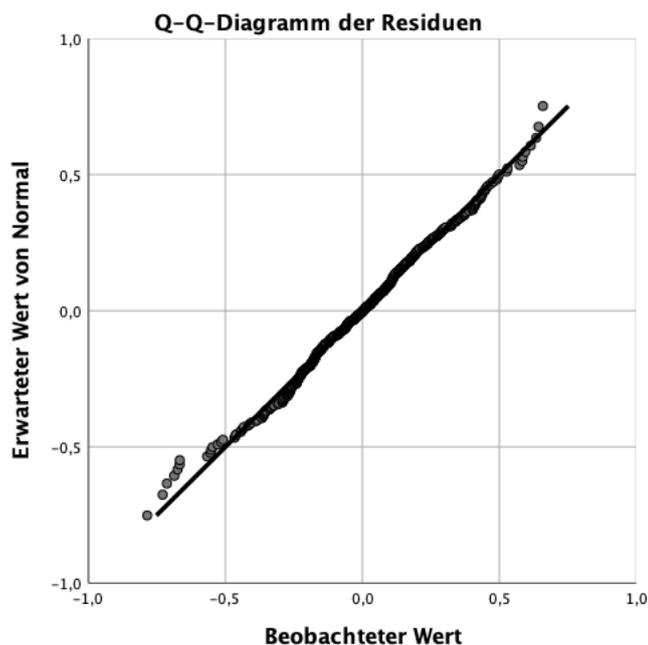


Abbildung 40: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe < 122 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

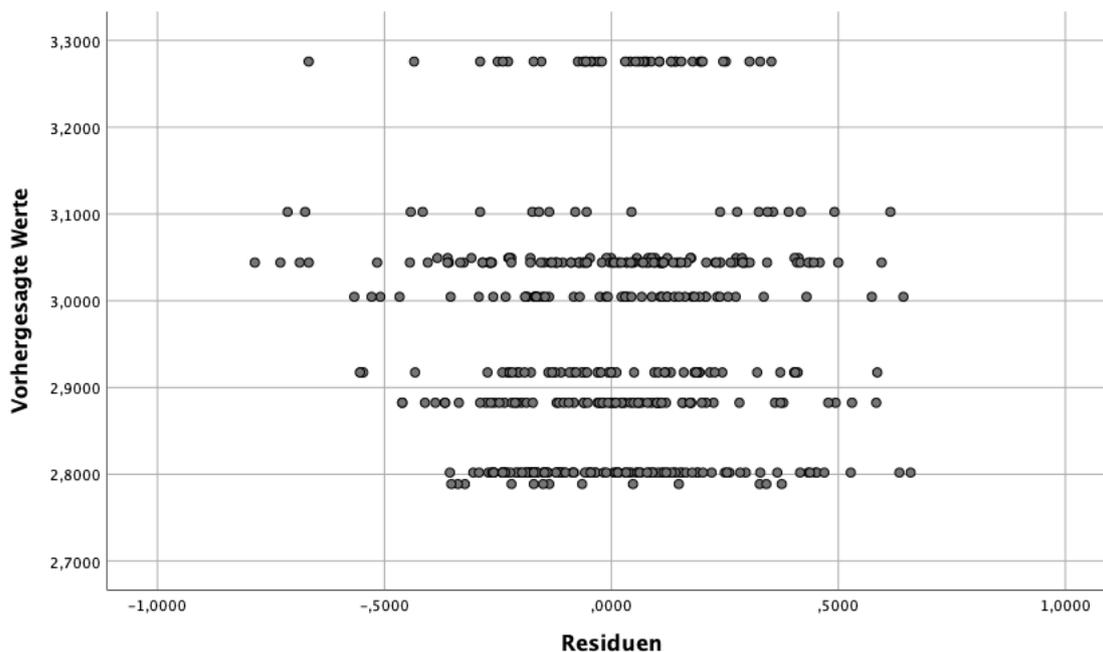


Abbildung 41: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe < 122 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

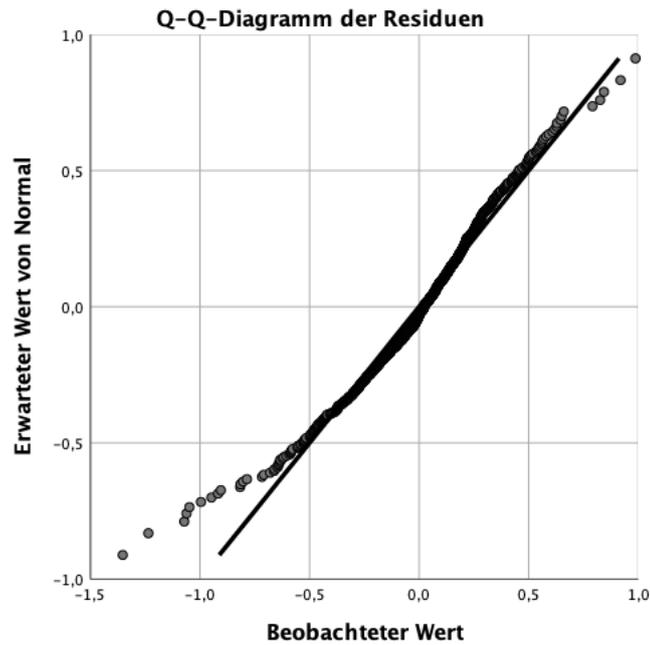


Abbildung 42: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 122 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

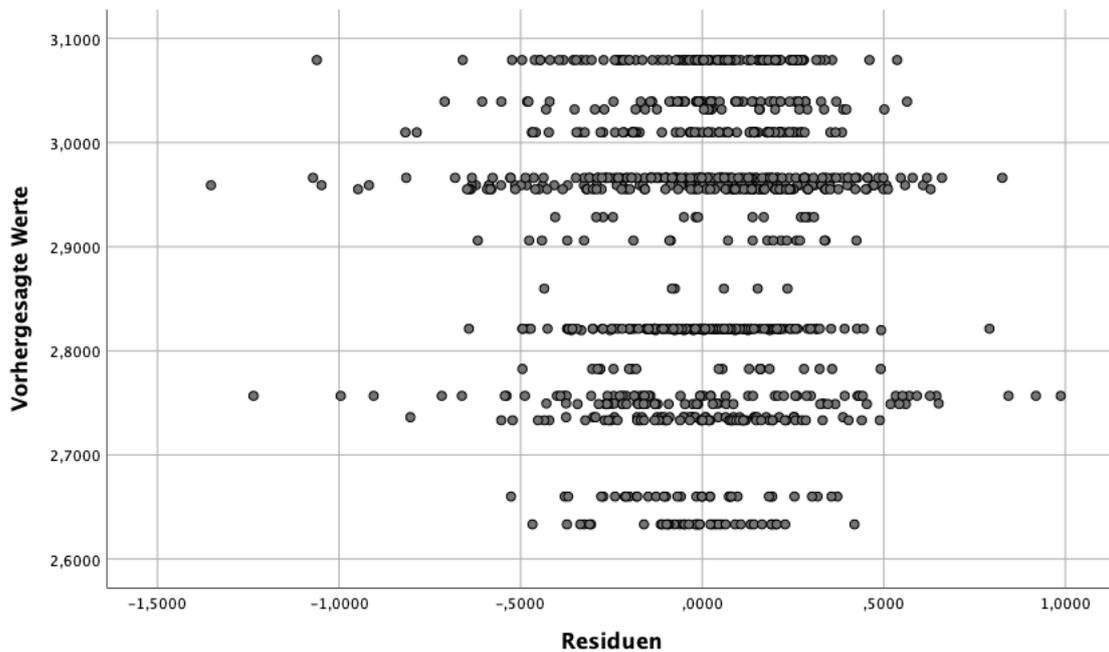


Abbildung 43: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 122 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Vokalisationslänge“.

Tabelle 32: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der transformierten Messgröße tZP [ms]

Legende: AIC = Akaike Informationskriterium;

Modell 1: Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe;

Modell 2: Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 98 Tage;

Modell 3: Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 99 Tage; tZP = Zwischenpausenlänge.

| | AIC-Werte im Modell 1 | AIC-Werte im Modell 2 | AIC-Werte im Modell 3 |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Modellebenen | | | |
| Proband | -4.372,320 | -1.881,718 | -2.484,274 |
| Proband + Aufnahme-tag | -4.381,215 | -1.887,298 | -2.489,300 |
| Proband + Aufnahme-tag + Phrase | -4.384,441 | -1.877,107 | -2.502,085 |

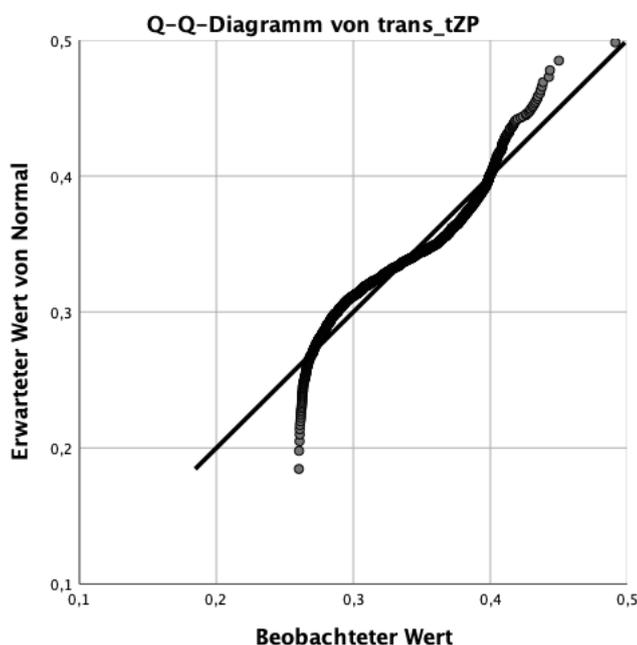


Abbildung 44: QQ-Diagramm zur Prüfung der transformierten Messgröße tZP [ms] auf Normalverteilung

Legende: trans_tZP = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

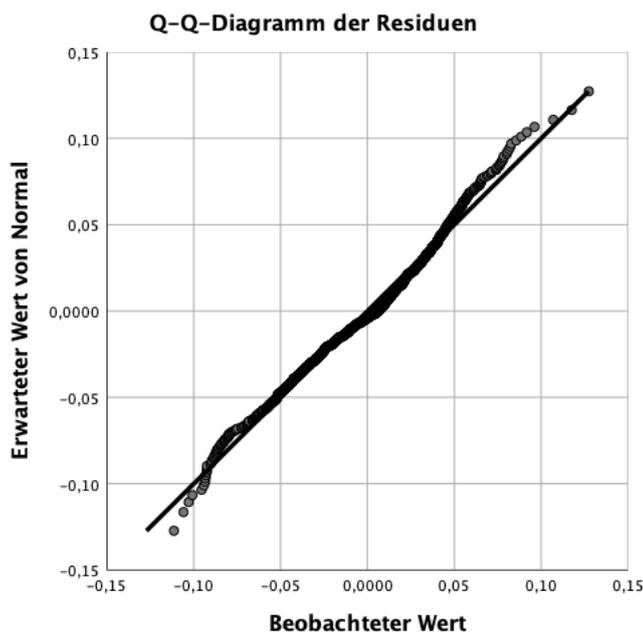


Abbildung 45: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

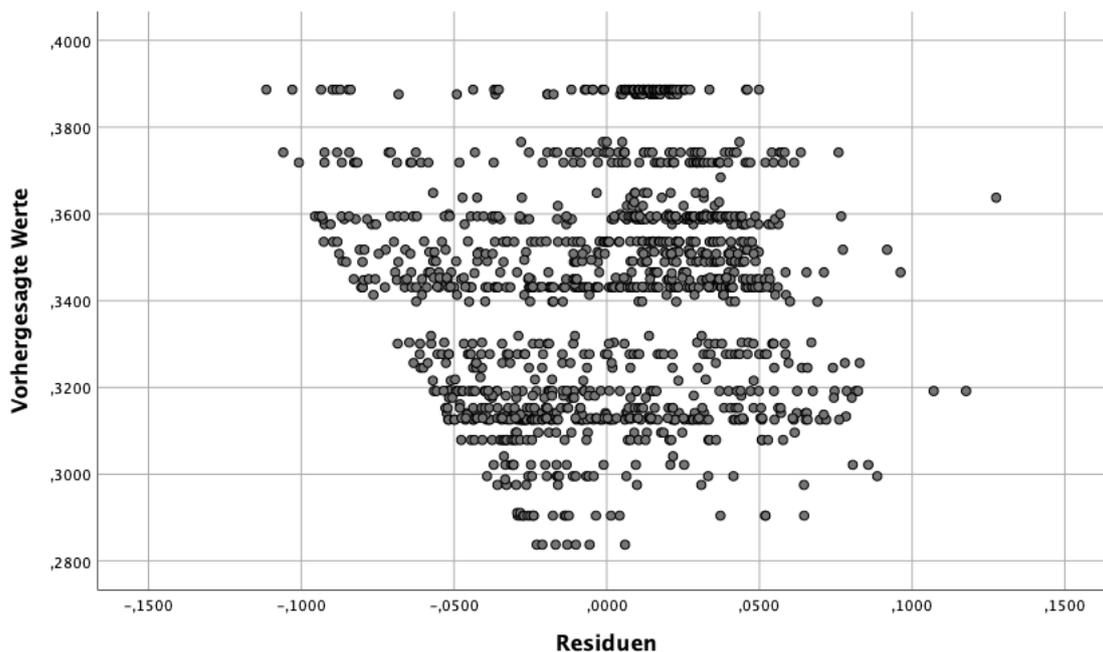


Abbildung 46: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

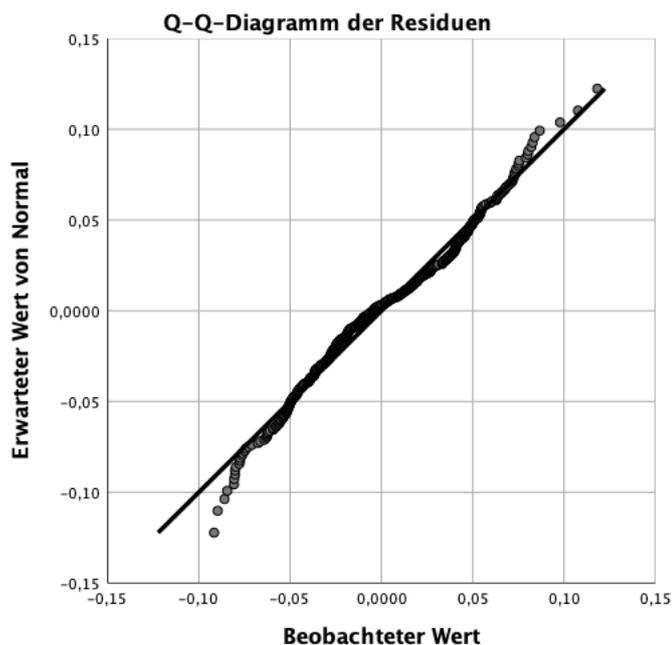


Abbildung 47: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 98 Tage
 Legende: Abhängige Variable = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

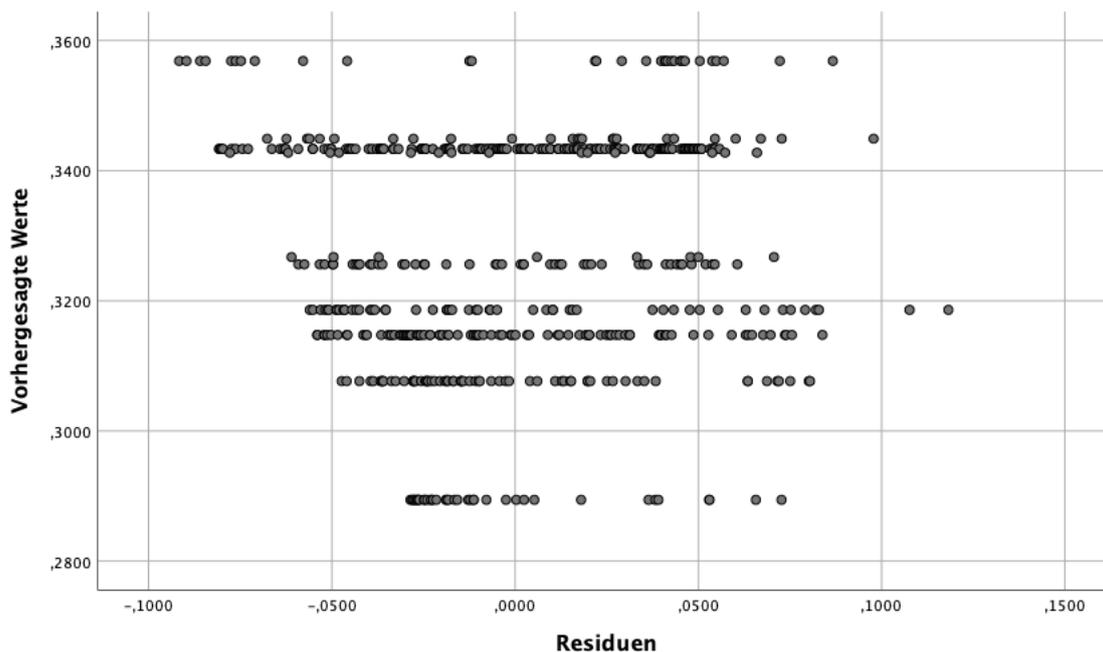


Abbildung 48: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 98 Tage
 Legende: Abhängige Variable = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

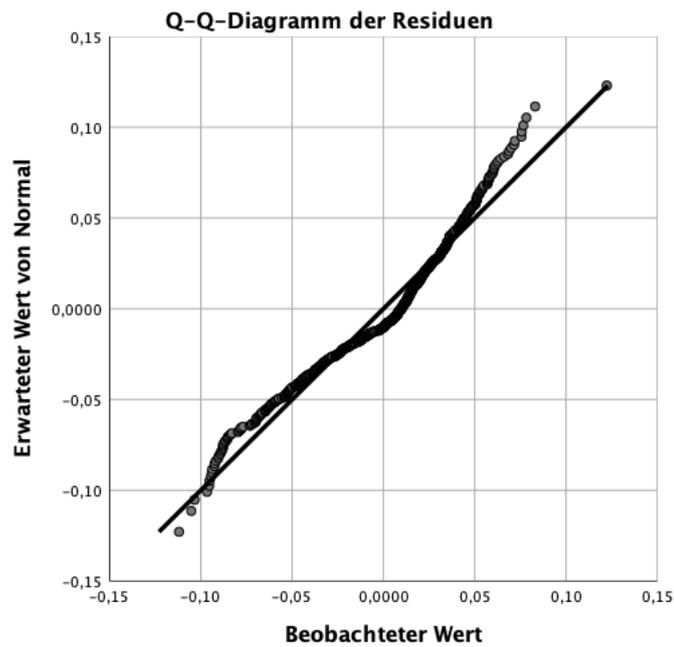


Abbildung 49: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 98 Tage
Legende: Abhängige Variable = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

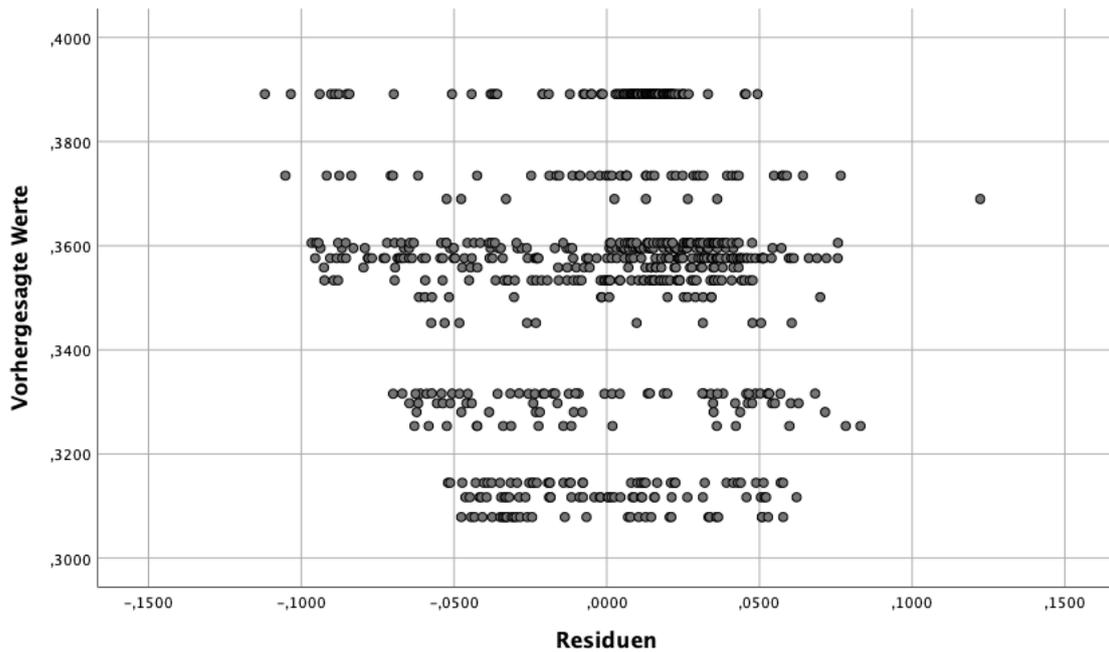


Abbildung 50: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 99 Tage
Legende: Abhängige Variable = transformierte Messgröße „Zwischenpausenlänge“.

Tabelle 33: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße tIOI [ms]

Legende: AIC = Akaike Informationskriterium;

Modell 1: Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe;

Modell 2: Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 98 Tage;

Modell 3: Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 99 Tage; tIOI = Länge der Inter-Onset-Intervalle.

| Modellebenen | AIC-Werte im Modell 1 | AIC-Werte im Modell 2 | AIC-Werte im Modell 3 |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Proband | 305, 876 | 225,868 | 59,221 |
| Proband + Aufnahme-tag | 293,599 | 222,071 | 61,221 |
| Proband + Aufnahme-tag + Phrase | 310,040 | 228,421 | 70,285 |

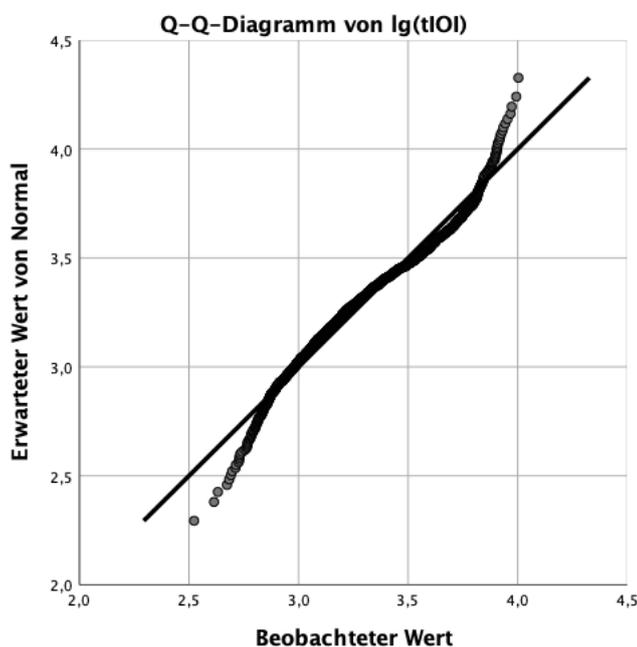


Abbildung 51: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße tIOI [ms] auf Normalverteilung

Legende: lg(tIOI)= logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

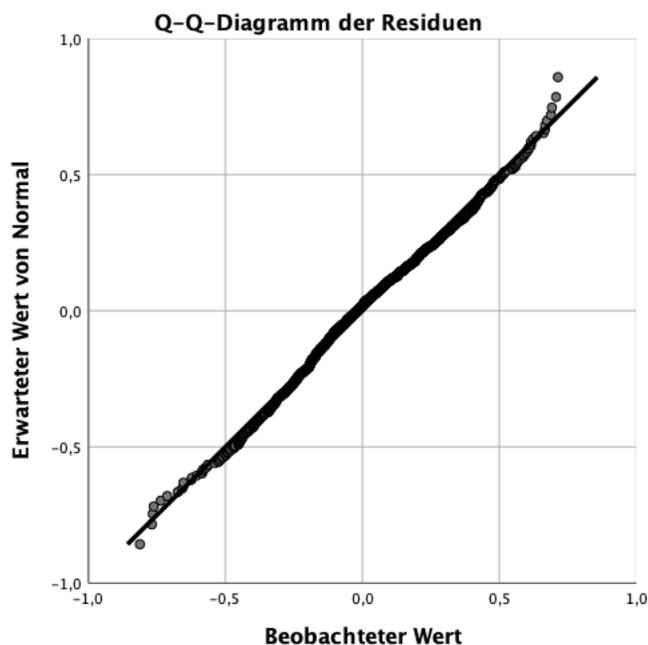


Abbildung 52: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

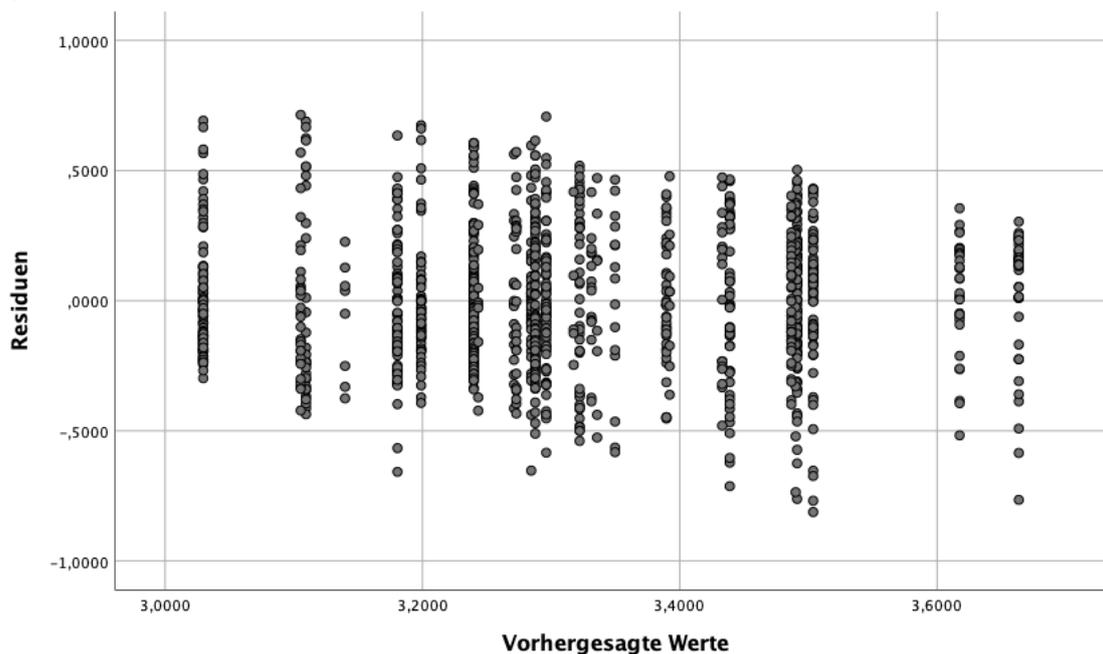


Abbildung 53: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Alters- und Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

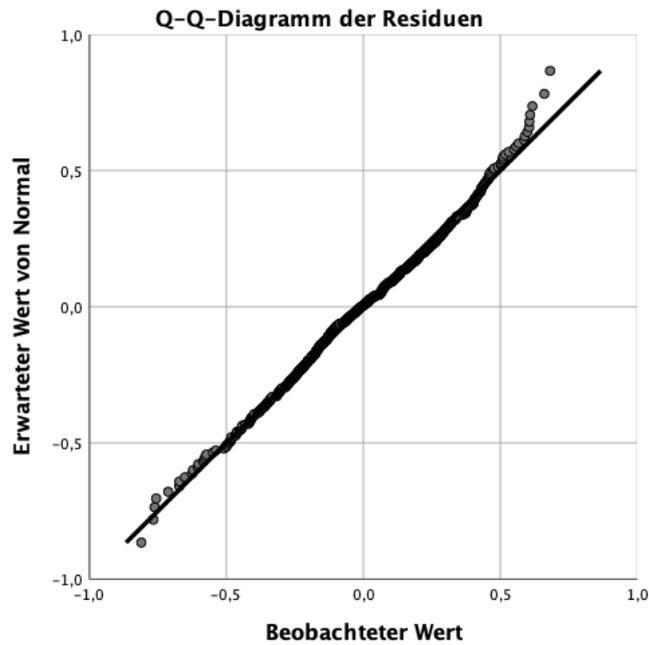


Abbildung 54: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 103 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

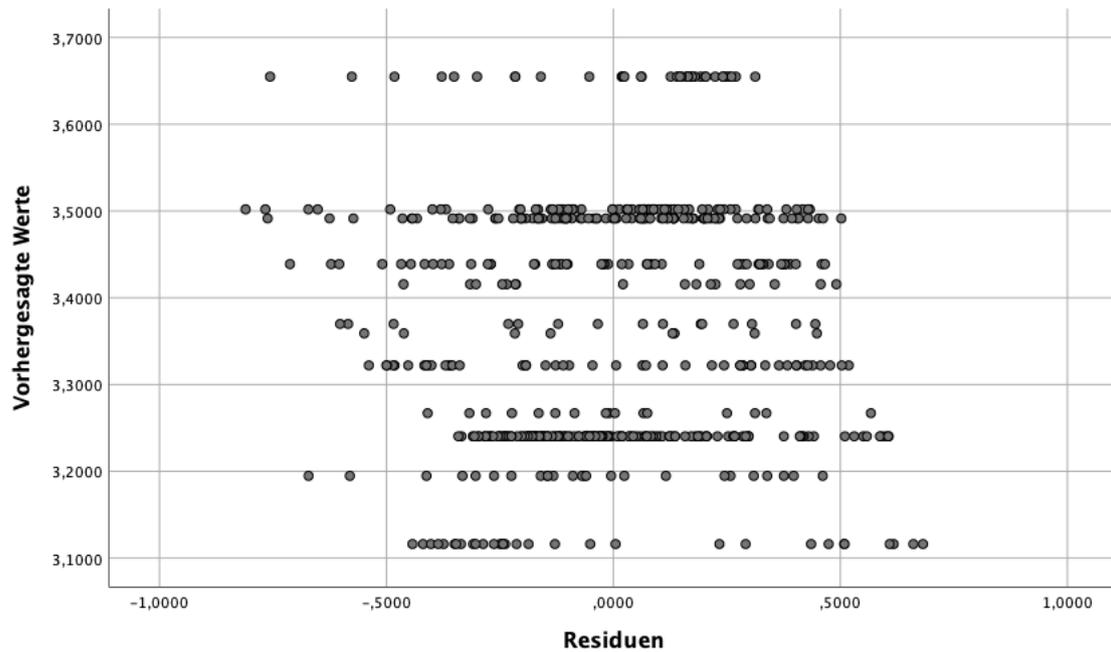


Abbildung 55: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≤ 103 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

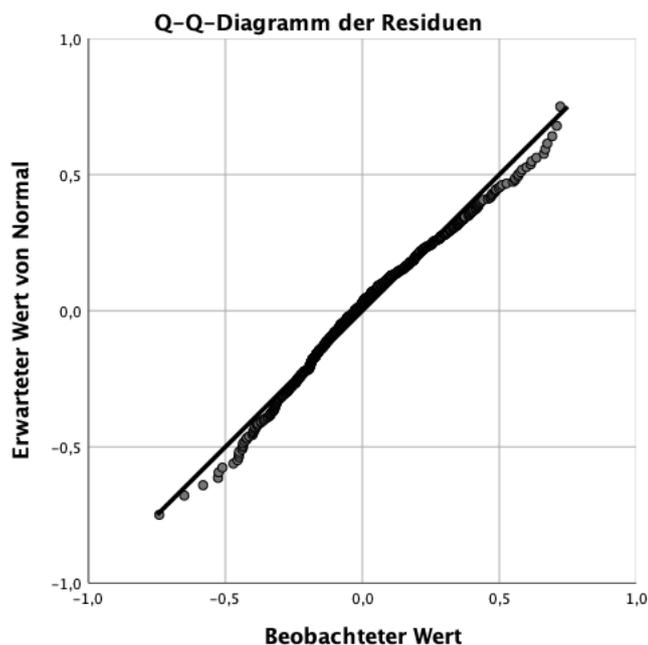


Abbildung 56: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 104 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

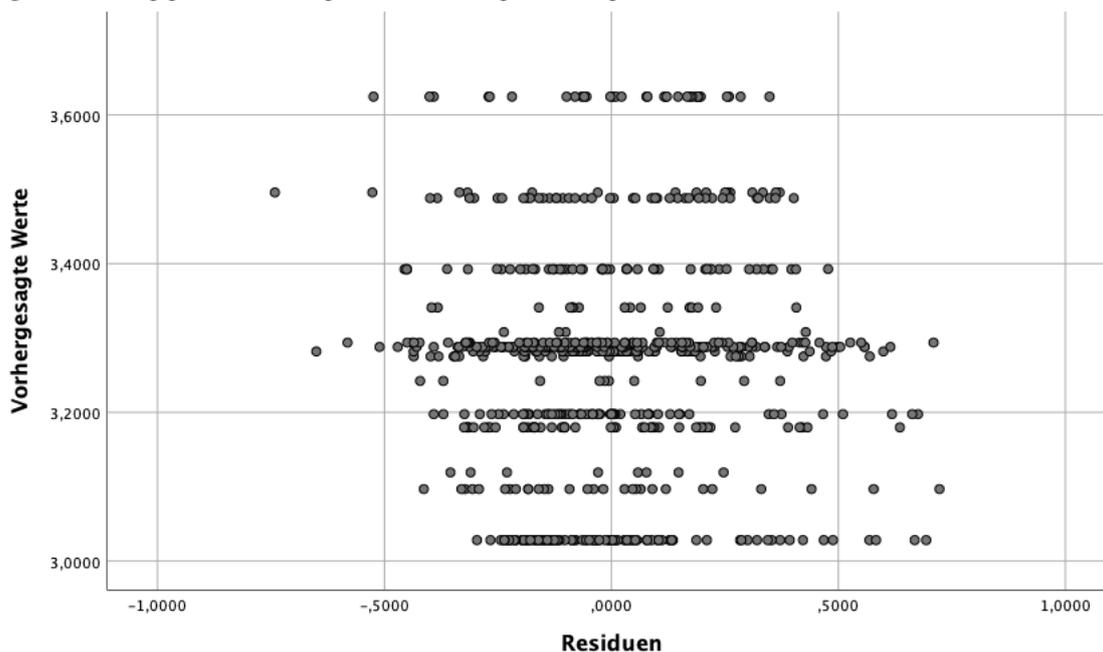


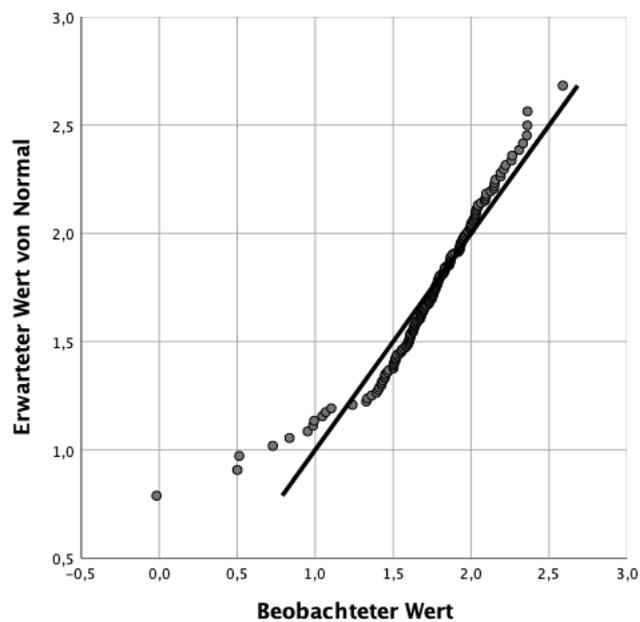
Abbildung 57: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der Altersgruppe ≥ 104 Tage

Legende: Abhängige Variable = logarithmierte Messgröße „Länge der Inter-Onset-Intervalle“.

Tabelle 34: Vergleich der AIC-Werte für die Modelle der logarithmierten Messgröße nPVI

Legende: AIC = Akaike Informationskriterium;
Modell 1: Berechnung des Alterseffekts in der gesamten Probandengruppe;
Modell 2: Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe;
nPVI = normierter paarweiser Variabilitätsindex.

| | AIC-Werte im Modell 1 | AIC-Werte im Modell 2 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Modellebenen | | |
| Proband | 130,662 | 127,540 |
| Proband + Aufnahme-tag | 132,662 | 129,638 |
| Proband + Aufnahme-tag + Phrase | 134,662 | 131,638 |

**Abbildung 58: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße nPVI auf Normalverteilung**

Legende: nPVI = normierter paarweiser Variabilitätsindex.

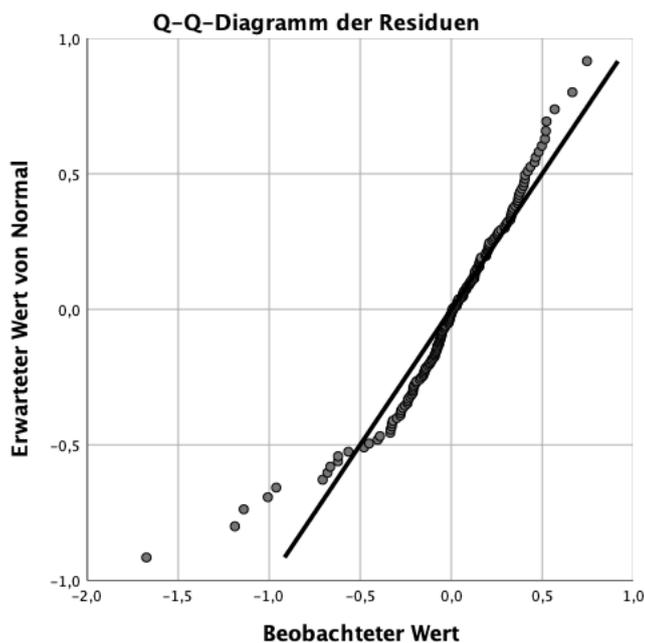


Abbildung 59: QQ-Diagramm zur Prüfung der Residuen auf Normalverteilung im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = Logarithmierte Messgröße „normierter paarweiser Variabilitätsindex“.

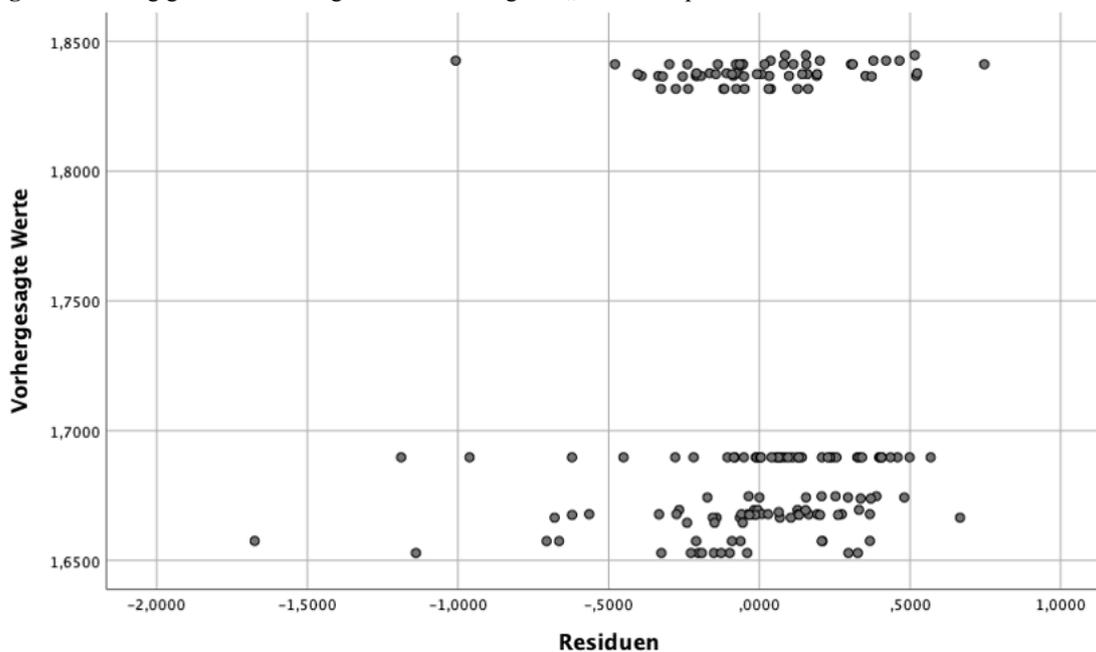


Abbildung 60: Streudiagramm zur Prüfung der Residuen und vorhergesagten Werte auf Linearität und Homoskedastizität im Modell zur Berechnung des Gruppeneffekts in der gesamten Probandengruppe

Legende: Abhängige Variable = Logarithmierte Messgröße „normierter paarweiser Variabilitätsindex“.

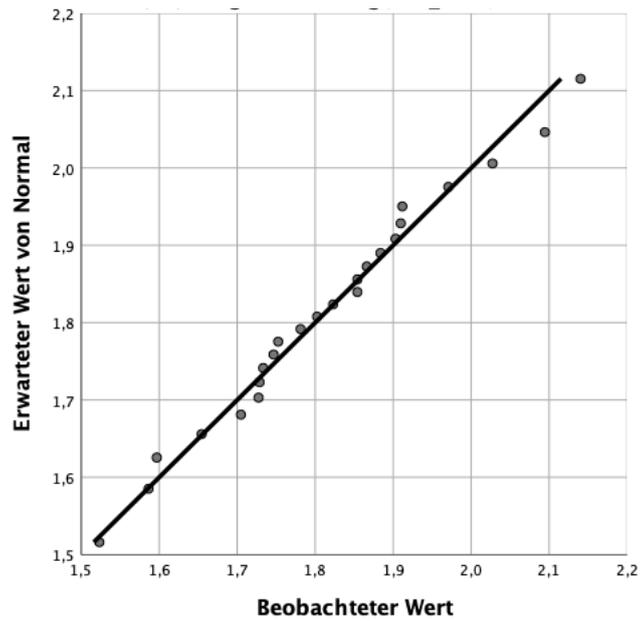


Abbildung 61: QQ-Diagramm zur Prüfung der logarithmierten Messgröße MW_nPVI auf Normalverteilung

Legende: MW_nPVI = mittlerer normierter paarweiser Variabilitätsindex pro Proband.

V. Danksagung

Mein herzlichster Dank gilt Frau Professorin Dr. Kathleen Wermke, Leiterin des Zentrums für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen (ZVES), die mich in jeder Phase der Arbeit begleitet und mich mit großem zeitlichem und persönlichem Engagement inspiriert und vorangebracht hat. Ihr gilt mein besonderer Dank für die unermüdliche und geduldige Unterstützung, auf die ich mich immer verlassen konnte und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bei Frau Professorin Dr. Shehata-Dieler, Leitende Ärztin der Audiologie, Pädaudiologie, Elektrophysiologie und Phoniatrie der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, plastische und ästhetische Operationen der Universität Würzburg, bedanke ich mich für die Gestaltung des Projekts und die Kooperation mit dem ZVES, durch die diese Dissertationsarbeit ermöglicht wurde.

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

Ein weiterer Dank gilt Daniela Keller, Beraterin für Statistik und Leiterin der Statistik-Akademie, die für alle meine Fragen konstruktive und hilfreiche Lösungen wusste.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeiterinnen des CHC (Frau Walk und Frau Hock) für die hilfsbereite Unterstützung und zuverlässige Koordination der Termine in der HNO-Klinik.

Allen früheren und aktuellen MitarbeiterInnen des ZVES danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Zeit, die wir im Laufe der Jahre dort gemeinsam hatten.

Von ganzem Herzen möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Schwester bedanken, die mich in Höhen und Tiefen unterstützten und die mir diesen Weg ermöglichten.