



Technische Universität München

Klinik und Poliklinik für  
Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde

Direktorin: Prof. Dr. Barbara Wollenberg

**Latenz- und Amplitudenverhalten der mit frequenzspezifischen Chirpreizen  
ausgelösten Hirnstammpotentiale – normative Daten**

**Maximiliane Raphaela Antonia Brandl**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät der Medizin  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der Medizin (Dr. med.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Ernst J. Rummeny

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Dr. med. habil. Thomas Janssen
2. Prof. Dr. Barbara Wollenberg

Die Dissertation wurde am 02.03.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Medizin am 30.12.2020 angenommen.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                                       | <b>4</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                       | <b>8</b>  |
| <b>Zusammenfassung .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1. Einleitung .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>2. Theoretische Grundlagen .....</b>                                  | <b>13</b> |
| <b>2.1 Schallverarbeitung .....</b>                                      | <b>13</b> |
| 2.1.1 Schallleitung .....  | 13        |
| 2.1.2 Schalltransduktion .....   | 13        |
| 2.1.3 Signaltransformation und Informationsübertragung Richtung ZNS..... | 15        |
| 2.1.4 Informationsverarbeitung im ZNS .....                              | 16        |
| <b>2.2 Akustisch evozierte Potentiale .....</b>                          | <b>17</b> |
| 2.2.1 Frühe akustisch evozierte Potentiale (FAEP) .....                  | 19        |
| 2.2.2 Objektive Hördiagnostik durch Hirnstammaudiometrie (BERA).....     | 19        |
| 2.2.3 Klinische Anwendung der BERA.....                                  | 21        |
| <b>3. Ziel der Studie.....</b>   | <b>23</b> |
| <b>4. Methodisches Vorgehen .....</b>                                    | <b>24</b> |
| <b>4.1 Probanden .....</b>   | <b>24</b> |
| <b>4.2 Messtechnik und Messmethoden.....</b>                             | <b>24</b> |
| 4.2.1 Messkammer .....   | 24        |
| 4.2.2 Handgerät .....  | 25        |
| 4.2.3 Wandler.....   | 27        |
| 4.2.4 Reizparameter .....  | 29        |
| 4.2.5 Ableitparameter .....  | 34        |
| <b>4.3 Studiendesign .....</b>   | <b>34</b> |
| <b>4.4 Datenanalyse.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>5. Ergebnisse .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>5.1 Fallbeispiel normalhörender Proband .....</b>                     | <b>38</b> |
| <b>5.2 Ergebnisse Kollektiv .....</b>                                    | <b>41</b> |
| 5.2.1 Latenz der Welle V .....   | 46        |
| 5.2.1.1 Vergleich der Schallwandler .....                                | 48        |
| 5.2.1.2 Vergleich der Stimuli.....                                       | 52        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 5.2.2      | Amplitudenverhalten der Welle V .....                                  | 56         |
| 5.2.2.1    | Vergleich Schallwandler .....  | 56         |
| 5.2.2.2    | Vergleich Stimuli .....  | 61         |
| <b>5.3</b> | <b>Fallbeispiel Patient mit cochleärer Hochtonschwerhörigkeit.....</b> | <b>62</b>  |
| <b>6.</b>  | <b>Diskussion der Ergebnisse.....</b>                                  | <b>64</b>  |
| 6.1        | Diskussion des Fallbeispiels normalhörender Proband .....              | 64         |
| 6.2        | Diskussion der Ergebnisse des Kollektivs .....                         | 64         |
| 6.3        | Diskussion des Fallbeispiels Patient mit Hochtonschwerhörigkeit.....   | 71         |
| 6.4        | Klinische Relevanz.....  | 71         |
| <b>7.</b>  | <b>Fazit.....</b>  | <b>74</b>  |
| <b>8.</b>  | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                      | <b>75</b>  |
| <b>9.</b>  | <b>Anhang .....</b>  | <b>78</b>  |
|            | <b>Danksagung .....</b>  | <b>117</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung der tonotopen Abbildung der Schallfrequenz auf der Basilarmembran nach Lenarz & Boenninghaus .....         | 14 |
| Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ableitung der akustisch evozierten Potentiale nach Klinke .....  | 17 |
| Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Hörbahn mit akustisch evozierten Potentialen nach Mrowinski & Scholz.....                              | 18 |
| Abbildung 4: Akustisch evozierte Hirnstammpotentiale (links) und Pegel-Latenz-Diagramm (rechts) nach Mrowinski & Scholz.....                     | 22 |
| Abbildung 5: Handgerät "Sentiero" .....  | 25 |
| Abbildung 6: Screenshot einer FAEP-Messung.....  | 26 |
| Abbildung 7: Frequenzgang Kopfhörer HDA 280.....   | 27 |
| Abbildung 8: Frequenzgang Ohrsonde.....  | 28 |
| Abbildung 9: Frequenzgang Einsteckhörer .....  | 29 |
| Abbildung 10: Breitband-Chirp.....   | 30 |
| Abbildung 11: Low-Chirp.....   | 31 |
| Abbildung 12: Mid-Chirp.....   | 32 |
| Abbildung 13: Hi-Chirp .....   | 33 |
| Abbildung 14: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Sonde .....    | 38 |
| Abbildung 15: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Insert.....    | 39 |
| Abbildung 16: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Kopfhörer..... | 40 |
| Abbildung 17: Individuelle Pegel-Latenz-Verläufe der Welle V aller Probanden im Falle der Klick-Reize. Reizgabe über Sonde EPDP .....            | 46 |
| Abbildung 18: Individuelle Pegel-Latenz-Verläufe der Welle V aller Probanden im Falle der Klick-Reize. Reizgabe über Kopfhörer HDA 280 .....     | 47 |
| Abbildung 19: Individuelle Pegel-Latenz-Verläufe der Welle V aller Probanden im Falle der Klick-Reize. Reizgabe über Einsteckhörer Insert.....   | 47 |
| Abbildung 20: Abhängigkeit der Latenz der Welle V vom Pegel des Stimulus im Falle des Klick-Reizes und Vergleich der verschiedenen Wandler ..... | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 21: Abhängigkeit der Latenz der Welle V vom Pegel des Stimulus im Falle des Breitband-Chirp-Reizes und Vergleich der verschiedenen Wandler .           | 49 |
| Abbildung 22: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Low-Chirp und Vergleich der verschiedenen Wandler.....  | 50 |
| Abbildung 23: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Mid-Chirp und Vergleich der verschiedenen Wandler.....  | 51 |
| Abbildung 24: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Hi-Chirp und Vergleich der verschiedenen Wandler.....   | 52 |
| Abbildung 25: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA280 für die verschiedenen Stimuli.....  | 53 |
| Abbildung 26: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit der Sonde (EPDP) für die verschiedenen Stimuli .....   | 54 |
| Abbildung 27: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit dem Einsteckhörer (Insert) für die verschiedenen Stimuli.....                                  | 55 |
| Abbildung 28: Amplitudenverhalte der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Klick-Reiz .....                  | 56 |
| Abbildung 29: Amplitudenverhalten der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die ver-schiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Chirp .....                     | 57 |
| Abbildung 30: Amplitudenverhalten der Welle V bei Reizgabe über Kopfhörer HDA 280, Einsteckhörern (Insert) und der Sonde (EPDP) im Falle des Hi-Chirps .....     | 58 |
| Abbildung 31: Amplitudenverhalten der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Low-Chirp.....                   | 59 |
| Abbildung 32: Amplituden-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA 280, Einsteckhörern (Insert) und der Sonde (EPDP) im Falle des Mid-Chirps..... | 60 |
| Abbildung 33: Vergleich der Amplitude der Welle V für die verschiedenen Stimuli bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA 280 .....                                     | 61 |
| Abbildung 34: Audiogramm des Patienten mit Hochtonschwerhörigkeit.....   | 62 |
| Abbildung 35: FAEP Patient mit Hochtonschwerhörigkeit .....  | 63 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Dauer der Stimuli und jeweilige Startpunkte der Latenzzeitmessung<br>.....   | 37 |
| Tabelle 2: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli<br>und Schallpegel, Schallwandler EPDP .....               | 39 |
| Tabelle 3: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli<br>und Schallpegel, Schallwandler Einsteckhörer .....      | 40 |
| Tabelle 4: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli<br>und Schallpegel, Schallwandler Kopfhörer .....          | 41 |
| Tabelle 5: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Klick.....   | 41 |
| Tabelle 6: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Chirp.....   | 42 |
| Tabelle 7: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Low-Chirp.....   | 43 |
| Tabelle 8: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Mid-Chirp .....  | 44 |
| Tabelle 9: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Hi-Chirp .....   | 45 |
| Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Latenzzeiten des Breitband-Chirps<br>und des CE-Chirps nach Eberling und Dau (2010)..... | 66 |
| Tabelle 11: Varianzanalyse (1) der Amplitude der Welle V beim Klick in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                         | 78 |
| Tabelle 12: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (1).....   | 79 |
| Tabelle 13: Varianzanalyse (2) der Amplitude der Welle V beim Chirp-Reiz in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                    | 79 |
| Tabelle 14: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (2).....   | 80 |
| Tabelle 15: Varianzanalyse (3) der Amplitude der Welle V beim Low-Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                     | 81 |
| Tabelle 16: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (3).....   | 82 |
| Tabelle 17: Varianzanalyse (4) der Amplitude der Welle V beim Mid-Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                     | 82 |
| Tabelle 18: Varianzanalyse (5) der Amplitude der Welle V beim Hi-Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                      | 83 |
| Tabelle 19: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (5).....   | 84 |
| Tabelle 20: Varianzanalyse (6) der Latenz der Welle V beim Klick in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                            | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 21: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (6).....   | 85  |
| Tabelle 22: Varianzanalyse (7) der Latenz der Welle V beim Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallwandler.....                            | 86  |
| Tabelle 23: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (7).....   | 87  |
| Tabelle 24: Varianzanalyse (8) der Latenz der Welle V beim Low-Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallgeber .....                         | 88  |
| Tabelle 25: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (8).....   | 89  |
| Tabelle 26: Varianzanalyse (9) der Latenz der Welle V beim Mid-Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallgeber .....                         | 90  |
| Tabelle 27: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (9).....   | 91  |
| Tabelle 28: Varianzanalyse (10) der Latenz der Welle V beim Hi-Chirp in<br>Abhängigkeit der Schallgeber .....                         | 91  |
| Tabelle 29: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (10).....  | 92  |
| Tabelle 30: Varianzanalyse (11) der Latenz der Welle V in Abhängigkeit der<br>Stimuli bei Wiedergabe durch den Kopfhörer HDA 280..... | 93  |
| Tabelle 31: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (11).....  | 94  |
| Tabelle 32: Varianzanalyse (12) der Amplitude der Welle V in Abhängigkeit der<br>Stimuli bei Wiedergabe durch den Kopfhörer HDA.....  | 97  |
| Tabelle 33: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (12).....  | 98  |
| Tabelle 34: Varianzanalyse (13) der Latenz der Welle V Abhängigkeit der<br>Stimuli bei Ausgabe durch Insert .....                     | 101 |
| Tabelle 35: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (13) .....   | 102 |
| Tabelle 36: Varianzanalyse (14) der Amplitude der Welle V in Abhängigkeit der<br>Stimuli bei Wiedergabe durch Insert.....             | 105 |
| Tabelle 37: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (14) .....   | 106 |
| Tabelle 38: Varianzanalyse (15) der Latenz der Welle V in Abhängigkeit der<br>Stimuli bei Wiedergabe durch EPDP .....                 | 109 |
| Tabelle 39: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (15) .....   | 110 |
| Tabelle 40: Varianzanalyse (16) der Amplitude der Welle V in Abhängigkeit der<br>Stimuli bei Wiedergabe durch EPDP .....              | 113 |
| Tabelle 41: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (16) .....   | 114 |

## Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung  | Bedeutung   |
|------------|---|
| Abb.       | Abbildung   |
| ABR        | Auditory brainstem response<br>(akustisch evozierte Hirnstammpotentialie) |
| AMPA       | $\alpha$ -Amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazol-Propionsäure                |
| BERA       | Brainstem evoked Response Audiometry<br>(Hirnstammaudiometrie)            |
| dB         | Dezibel   |
| EEG        | Elektroenzephalogramm/Elektroenzephalographie                             |
| ERA        | elektrische Reaktionsaudiometrie  |
| FAEP       | frühe akustisch evozierte Potentialie                                     |
| G-BA       | Gemeinsamen Bundesausschusses   |
| HL         | Hearing Loss (Hörverlust)   |
| Hz         | Hertz   |
| KHz        | Kilohertz   |
| k $\Omega$ | Kilohm  |
| MAEP       | mittlere akustisch evozierte Potentialie                                  |
| ms         | Millisekunde  |
| nHL        | normal hearing level  |
| nV         | Nanovolt  |

|       |   |
|-------|---|
| SAEP  | späte akustisch evozierte Potentiale      |
| SFAEP | sehr frühe akustisch evozierte Potentiale |
| SPL   | sound pressure level (Schalldruckpegel)   |
| vgl.  | vergleiche                                |
| vs.   | versus (gegenübergestellt)                |
| ZNS   | Zentrales Nervensystem                    |

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Einsatz von frequenzspezifischen akustisch evozierten Potentialen zur objektiven Untersuchung des Hörvermögens. Dazu sind zunächst die in der Studie verwendeten frequenzspezifischen Stimuli an 26 normalhörenden Probanden kalibriert worden. Daraufhin sind an 30 Normalhörenden die normativen Werte für Latenzzeit und Amplitude der Welle V erfasst worden. Ziel war es zu bestimmen, inwiefern die verschiedenen getesteten Schallwandler und Stimuli die Reizantwort beeinflussen. Hierfür lassen sich folgende Ergebnisse festhalten: Durch die Reizpräsentation mit dem Kopfhörer und den Einsteckhörern werden übergreifend die besten Reizantworten generiert. Der Hochfrequenz-Chirp löst Potentiale mit den kürzesten Latenzzeiten und der Tieffrequenz-Chirp Potentiale mit den längsten Latenzzeiten aus. Die größten Amplitudenwerte werden durch den Stimulus Breitband-Chirp hervorgerufen, der Mittelfrequenz-Chirp ruft hingegen die geringsten Amplituden hervor. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Präsentation der Reize über Kopfhörer und Einsteckhörern die besten Potentialantworten hervorgerufen hat. Da sich die Latenzzeiten, sowie die Amplitudenwerte in Abhängigkeit des Reizgebers zum Teil signifikant unterscheiden, besteht die Notwendigkeit, für jeden Schallwandler eine separate Bestimmung der normativen Werte der Reize durchzuführen, da eine Übernahme der ermittelten Werte auf einen anderen Wandler nicht zwingend valide Ergebnisse nach sich ziehen würde.

Am Beispiel eines Probanden mit Hochtonschwerhörigkeit wurde gezeigt, dass es bei Applikation der verwendeten frequenzspezifischen Chirp-Reize möglich ist, den Hörverlust quantitativ und objektiv zu erfassen.

## 1. Einleitung

Die Ableitung akustisch evozierter Potentiale zur Überprüfung des Hörvermögens ist ein zentrales Instrument der audiologischen Diagnostik. So ist die automatisierte Hirnstammaudiometrie bei dem seit 01.01.2009 eingeführten Neugeborenen-Hörscreening als Ergänzung zur Messung otoakustischer Emissionen möglich und sogar zwingend erforderlich bei bestehendem Risiko für angeborene Hörstörungen (G-BA, 2008). In der aktuellen Leitlinie „Auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen“ der Deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie von 2015 wird der Einsatz verschiedener, sich ergänzender Hörtests empfohlen, unter anderem auch der der frühen akustisch evozierten Potentialen (Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie, 2015).

Nach Warren (1989) stellt die Hirnstammaudiometrie die exakteste Methode zur Abschätzung des Hörvermögens bei Säuglingen oder schwer zu testenden Kindern dar. Im Neugeborenen-Hörscreening wird bei der automatisierten Hirnstammaudiometrie als Mindeststandard ein Klickreiz als Stimulus verwendet (Rumstadt et al., 2012). Balfour et al. (1998) haben jedoch gezeigt, dass die Hirnstammaudiometrie allein mit Klickreizen ein Audiogramm nicht treffend abbildet.

Daher wird vermehrt nach Möglichkeiten gesucht, die Aussagekraft der Hirnstammaudiometrie weiter zu verbessern. So ist beispielsweise von Dau et al. (2000) ein Chirpstimulus entwickelt worden, der die frequenzabhängigen Laufzeitunterschiede auf der Basilarmembran ausgleicht, indem frequenzabhängige Laufzeitunterschiede auf der Basilarmembran kompensiert werden. In weiteren Untersuchungen ist dieser Stimulus auf die Möglichkeit untersucht worden, frequenzspezifische Informationen zu erhalten, mit dem Ergebnis, dass dieser Chirp-Reiz unter anderem für den klinischen Einsatz im tieffrequenten Bereich geeignet sein könnte (Wegner & Dau, 2002). Bell et al. (2002) haben in einer Studie Chirpstimuli mit begrenzter Bandbreite verwendet, um frequenzspezifische Informationen über das Hörvermögen zu erlangen.

Auf der Basis dieser Erkenntnisse befasst sich die vorliegende Arbeit damit, mit Hilfe frequenzspezifischer Chirp-Reize eine objektive Information über das Hörvermögen zu erlangen.

Zunächst werden die theoretischen Grundlagen aufgezeigt (*siehe Kapitel 3. Theoretische Grundlagen*). Dabei wird zum einen auf das Prinzip der Schallverarbeitung eingegangen, zum anderen auf das der akustisch evozierten Potentiale. Darauf folgend wird das methodische Vorgehen beschrieben (*siehe Kapitel 4. Methodisches Vorgehen*). Hierbei werden das Probandenkollektiv, die Messtechnik und die Messmethoden, das Studiendesign und die Datenanalyse dargelegt.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt darin, normative Werte für Latenzzeit und Amplitude der Welle V der durch Tieffrequenz- (Low-), Mittelfrequenz- (Mid-) und Hochfrequenz- (Hi-) Chirps ausgelösten frühen akustisch evozierten Potentiale (FAEP) zu erfassen. In einem ersten Schritt ist zunächst eine Reizpegelkalibrierung der verschiedenen Stimuli anhand der subjektiven Hörschwelle bei  $n = 26$  normalhörenden Probanden durchgeführt worden. Daran anschließend sind die normativen Werte an  $n = 30$  Normalhörenden für die verschiedenen Reize bestimmt worden. Hierbei ist untersucht worden, inwieweit die verschiedenen Stimuli und die Schallwandler die jeweilige Reizantwort beeinflussen. Schließlich werden die gewonnenen Ergebnisse vorgestellt (*siehe Kapitel 5. Ergebnisse*) und bezüglich verschiedener Gesichtspunkte diskutiert (*siehe Kapitel 6. Diskussion*). Zuletzt wird das Fazit der Arbeit gezogen (*siehe Kapitel 7. Fazit*).

## **2. Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Schallverarbeitung**

Das menschliche Ohr ist mitunter das sensibelste Sinnesorgan und umfasst zwei wichtige Sinnesfunktionen: das Vestibularorgan zur Empfindung des Gleichgewichts und das Hörorgan zur Aufnahme und Verarbeitung akustischer Reize. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem seine Funktion als Hörorgan essentiell. Dieses wird durch Schallwellen, also Druckschwankungen der Luft, adäquat gereizt. Diese Schallsignale werden zunächst vom äußeren Ohr in Richtung des Mittelohrs weitergeleitet, von wo sich die Vibrationen in Form einer Wanderwelle im Innenohr ausbreiten. Im Innenohr findet schließlich die Umwandlung dieser zunächst mechanischen Information in ein körpereigenes elektrisches Signal statt, das über den Hörnerven, den Hirnstamm und die zentrale Hörbahn schließlich bis zur Großhirnrinde geleitet wird, um die Information dort auf verschiedenen Ebenen zu verarbeiten (Trepel, 2008; Zenner, 2010).

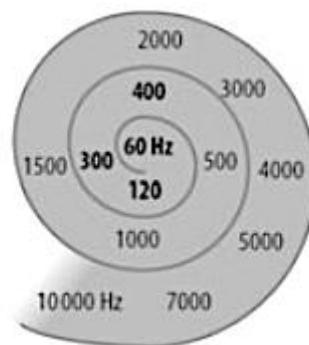
#### **2.1.1 Schalleitung**

Via äußeren Gehörgang dringt der Schall bis zum Trommelfell, wo die Energie als Schwingungen (Vibrationen) über die Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel schließlich zum ovalen Fenster des Innenohrs auf die Perilymphe, einer aus dem Liquor stammenden, sehr natriumhaltigen Flüssigkeit, der Scala vestibuli und Scala tympani weitergeleitet wird. Dabei findet über den Trommelfell-Gehörknöchelchen-Apparat eine Impedanzanpassung zwischen Luft und Flüssigkeit des Innenohres statt. Ziel hierbei ist es, die Schallenergie möglichst verlustfrei auf das Innenohr zu übertragen (Zenner, 2010).

#### **2.1.2 Schalltransduktion**

Die Perilymphe ist als Flüssigkeit nicht kompressibel, somit weicht diese aus und verdrängt dabei die unter der Scala vestibuli befindliche Reissner Membran, die Scala media, das Corti-Organ und die darunter befindliche Basilarmembran nach unten. Da Scala vestibuli und Scala tympani am Helicotrema miteinander verbunden sind, wird auch die Perilymphe der Scala tympani verdrängt, was zur Auswölbung des runden Fensters gegen das Mittelohr führt. Anschließend

kommt es zu entgegen gesetzter Bewegung, wobei sich die genannten Strukturen nach oben bewegen. Bei einem Schallereignis folgen viele dieser Schallschwingungen aufeinander, wodurch es zu einer ständigen Auf- und Abwärtsbewegung, einer wellenförmigen Auslenkung der Membranen und des Corti-Organs des Innenohrs kommt. Die dabei entstehende Wanderwelle hat ein frequenzspezifisches Maximum an einem exakten Ort der Basilarmembran, was als Tonotopie oder Ortsprinzip bezeichnet wird. Dabei führen hohe Tonfrequenzen zu einem Maximum der Wanderwellenamplitude im Bereich der Basis der Schnecke und tiefe an der Schneckenspitze (Zenner, 2010). Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht dieses Prinzip schematisch (siehe *Abbildung 1: Schematische Darstellung der Tonotopie der Basilarmembran nach Lenarz & Boenninghaus (2012)*).



**Abbildung 1: Schematische Darstellung der tonotopen Abbildung der Schallfrequenz auf der Basilarmembran nach Lenarz & Boenninghaus (2012, S. 25)**

Das Corti-Organ besteht aus drei Reihen äußerer Haarzellen und einer Reihe innerer Haarzellen. Diese Hörsinneszellen sind von Stütz- und Pfeilerzellen umgeben. Die Haarzellen werden als solche bezeichnet, da sie an ihrer Oberseite, der Kutikularmembran, sogenannte Stereozilien (Sinneshärchen) besitzen, an den *äußeren* Haarzellen etwa 100-120, an den *inneren* Haarzellen circa 60. Die Scala media, die sich über dem Corti-Organ befindet, ist mit Endolymphe gefüllt, die sehr kaliumreich ist und in ihrer Zusammensetzung eher intrazellulären Flüssigkeiten ähnelt. In der Scala media befindet sich über den Haarzellen die Tektorialmembran, eine gelatinöse Masse, die die Spitzen der

längsten Stereozilien gerade so berühren (Zenner, 2010). Es wird angenommen, dass die schallinduzierte Auslenkung der Basilarmembran und der Tektorialmembran dazu führt, dass sich die genannte Strukturen gegeneinander bewegen (Allen, 1980). Bei dieser Scherbewegung kann die Tektorialmembran die Stereozilien der *äußeren* Haarzellen berühren und dadurch umbiegen, was dem adäquaten Reiz dieser Sinneszellen entspricht. Von den Stereozilien der *inneren* Haarzellen, die keinen Kontakt zur Tektorialmembran haben, wird angenommen, dass sie über die Endolymphströmung, die zwischen Tektorialmembran und Haarzellen aufgrund der Scherbewegung entsteht, mitgenommen und dadurch deflektiert werden. Die Auslenkung der Stereozilien führt zu einer Spannung sogenannter *tip links*, kleine Fäden, die von den Spitzen der Stereozilien zur dahinterstehenden Zilie gespannt sind. Dies führt zur Öffnung von Transduktionskanälen an den Spitzen der Zilien und damit zum Ausstrom von Kalium der Endolymph in den Intrazellularraum und bewirkt schließlich die Depolarisation der Sinneszelle (Lenhardt & Janssen, 2009; Zenner, 2010).

Die *äußeren* Haarzellen des Corti-Organs sind aufgrund eines Zytoskeletts aus Aktin und Myosin dazu fähig, sich bei Depolarisation bis zu 20.000-Mal pro Sekunde zu verkürzen und zu verlängern, um dadurch die Wanderwelle an dem jeweils frequenzcharakteristischen Ort der Basilarmembran bis zu tausendfach zu verstärken (Zenner, 1988, 2010). Somit fungieren die *äußeren* Haarzellen als Schallverstärker, die die Empfindlichkeit und die Trennschärfe des Hörorgans verbessern und somit die grobe Frequenzabstimmung des Corti-Organs verfeinern (Dallos, 1992).

### **2.1.3 Signaltransformation und Informationsübertragung Richtung ZNS**

In den *inneren* Haarzellen wird in Folge des Rezeptorpotentials, das durch den Kaliumeinstrom ausgelöst wird, am basalen Ende Glutamat in den synaptischen Spalt freigesetzt. Dieses bindet an bestimmte Glutamatrezeptoren (AMPA-Rezeptoren) der Hörnervenzellmembran und löst ein postsynaptisches Potential aus, welches Nervenaktionspotentiale generiert, die über den Hörnerv und den Hirnstamm bis zum auditorischen Cortex weitergeleitet werden. Bei der

Weiterleitung der Aktionspotentiale sind mindestens fünf Neurone beteiligt, die hintereinandergeschaltet, durch Synapsen miteinander verbunden sind und das auditorische System mit der Bildung von Kollateralen und Interneuronen komplex vernetzen. Die Hörbahn beginnt mit den Neuriten des Spiralganglions (Nervus cochlearis), die im Nucleus cochlearis des Hirnstamms enden. Von diesem cochleären Kernkomplex, bestehend aus dorsalem, anteroventralem und posteroventralem Kern, ziehen Fasern gekreuzt und ungekreuzt zum Nucleus Olivaris superior und durch den Lemniskus lateralis zum ipsilateralen Schleifenkern und wegen der beidohrigen Verschaltung auch zum kontralateralen, weiter zum Colliculus inferior im Mittelhirn und zum Corpus geniculatum mediale im Thalamus. Es bestehen auch Querverbindungen vom Colliculus inferior zum Corpus geniculatum mediale. Zu den primären kortikalen Hörfeldern, den Heschl-Querwindungen im Temporallappen, ziehen die Fasern durch die Capsula interna. Dem Primärkortex folgen die sekundären Hörfelder an der Außenseite des Temporallappens (Mrowinski, 2009; Zenner, 2010).

#### **2.1.4 Informationsverarbeitung im ZNS**

Der Hörnerv umfasst zum größten Teil afferente Nervenfasern, die überwiegend nur eine Synapse mit einer *inneren* Haarzelle haben. Es werden also in erster Linie Informationen der *inneren* Haarzellen an das Gehirn weitergeleitet. Aufgrund des Ortsprinzips ist jeder Haarzelle eine bestimmte Frequenz zugeordnet, was zur Folge hat, dass die synaptisch verbundene Nervenfasern bei einem Schallreiz dieser Frequenz, der sogenannten Bestfrequenz, optimal erregt wird. Man spricht auch von der charakteristischen Frequenz der Einzelfaser. Durch die Dauer der Aktivierung der Fasern wird die Zeitdauer eines Schallreizes übermittelt, die Entladungsrate kodiert die Höhe des Schalldruckpegels (Lautstärke). Da eine einzelne Nervenfasern ab einem bestimmten Schalldruck einen Sättigungsbereich erlangt, werden zur Übermittlung von noch höheren Lautstärken zunehmend benachbarte Fasern aktiviert, was als Rekrutierung bezeichnet wird (Zenner, 2010).

Die efferenten Nervenfasern aus dem gekreuzten und ungekreuzten medialen olivokochleären System können die Verstärkerfunktion der *äußeren* Haarzellen

beeinflussen, vermutlich um zum einen die Signalerkennung im Störgeräusch zu verbessern und zum anderen das empfindliche Corti-Organ vor zu lautem Schall zu schützen (Lenhardt & Janssen, 2009).

## 2.2 Akustisch evozierte Potentiale

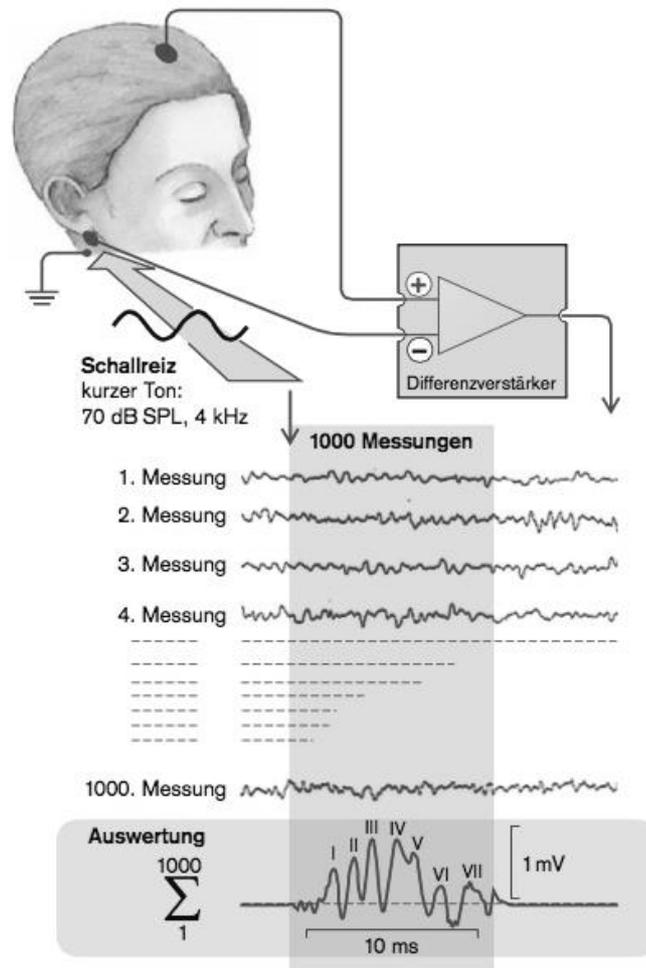


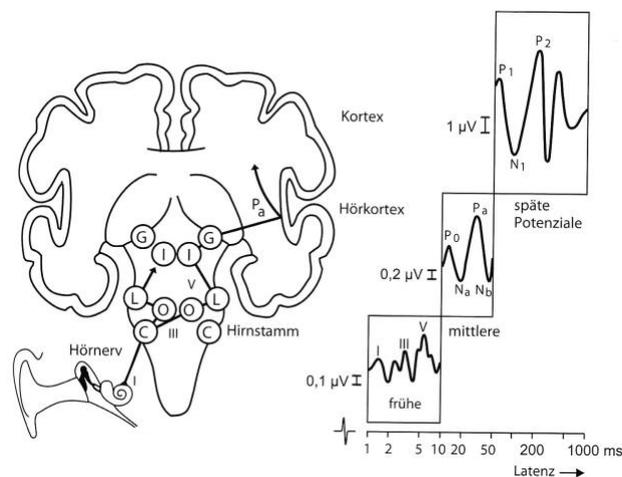
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ableitung der akustisch evozierten Potentiale nach Klinke (2010, S. 690)

Das menschliche Gehirn besitzt eine ständige elektrische Aktivität, welche durch Ableitung an der Kopfoberfläche als Elektroenzephalogramm (EEG) darstellbar ist. Wegen der Überlagerung dieser Grundaktivität des Gehirns sind akustisch evozierte Potentiale, also Spannungsspitzen, die durch einen akustischen Reiz und dessen neuronale Verarbeitungsprozesse verursacht werden, nicht ohne weiteres erfassbar. So ist es notwendig, die spontane elektrische Aktivität des Gehirns von den akustisch evozierten Potentialen zu trennen. Dabei wird die

elektrische Antwort auf ein wiederholt präsentiertes akustisches Signal summiert und schließlich gemittelt (siehe *Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ableitung der akustisch evozierten Potentiale nach Klinke (2010)*).

Die Verarbeitung der Informationen eines akustischen Reizes findet, wie oben beschrieben, in verschiedenen miteinander verschalteten Nervenzellgruppen des Gehirns durch synchrone Erregung zahlreicher Neuronen statt, was letztendlich zu ableitbaren Potentialen führt. Dabei kann man diese gemäß ihrem zeitlichen Auftreten in verschiedene Gruppen einteilen.

Man unterscheidet zwischen den sehr frühen akustisch evozierten Potentialen (SFAEP), die bereits im Innenohr generiert werden, den frühen akustisch evozierten Potentialen (FAEP) aus dem Hörnerv und den Hirnstamm, den mittleren akustisch evozierten Potentialen (MAEP) aus dem Lemniscus lateralis, Teilen des Thalamus und Kortex und muskulären Anteilen des Nackens und den späten akustisch evozierten Potentialen (SAEP) aus der primären und sekundären Hörrinde. Die *Abbildung 3* zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der Hörbahn mit den relevanten anatomischen Strukturen in welchen die FAEP, MAEP und SAEP generiert werden.



**Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Hörbahn mit akustisch evozierten Potentialen nach Mrowinski & Scholz (2011, S. 93)**

Die klinische Methode zur Ableitung der frühen akustisch evozierten Potentiale bezeichnet man als „brainstem electric response audiometry“ (BERA) oder Hirnstammaudiometrie (Klinke, 2010; Mrowinski, 2009).

Im Folgenden wird ausführlicher auf die frühen akustisch evozierten Potentiale und deren Methode zur Ableitung eingegangen.

### **2.2.1 Frühe akustisch evozierte Potentiale (FAEP)**

Die frühen akustisch evozierten Potentiale werden mittels Oberflächenelektroden registriert und mit römischen Buchstaben (I-VII) oder alternativ nach dem Erstbeschreiber (Jewett) als J1-J7 benannt. Die Wellen I-III entstammen dem jeweils ipsilateralen Hörnerv (I und II) und dem Nucleus cochlearis (III). Die folgenden Wellen sind aufgrund der Entstehung durch Überlagerungen mehrere ipsi- und kontralateralen Neuronengruppen der Hörbahn nicht ganz eindeutig bestimmten Generatoren zuzuweisen. Man geht davon aus, dass die Welle IV überwiegend von der ipsilateralen oberen Olive und dem sich anschließenden Lemniscus lateralis generiert wird und die Welle V vor allem aus den kontralateralen Bereichen. Die Aufspaltung des Komplexes der Wellen IV und V könnte aber auch durch mechanische Prozesse der Schallreizverarbeitung in der Cochlea stammen. Die Wellen VI und VII werden dem Corpus geniculatum mediale und der thalamokortikalen Hörstrahlung zugeordnet und treten ebenso wie die Wellen II und IV nur sehr unsicher auf. Daher verwendet man zur klinischen Diagnostik vor allem die Wellen I, III und V (Mrowinski, 2009).

### **2.2.2 Objektive Hördiagnostik durch Hirnstammaudiometrie (BERA)**

Die Hirnstammaudiometrie stellt ein geeignetes Verfahren zur objektiven Hördiagnostik dar. Dies ist dadurch gewährleistet, da die Welle V der Hirnstammpotentiale nahezu bis zur subjektiven Hörschwelle nachweisbar ist. Dies umfasst die Erfassung des Hörvermögens ohne die aktive Mitarbeit des Patienten. Daraus ergibt sich zum einen der Vorteil, dass die klassischen subjektiven Hörtestverfahren, bei denen der Patient nach seiner Hörempfindung befragt wird weiter ergänzt werden. Zum anderen besteht damit die Möglichkeit, das Hörvermögen auch an Patienten zu testen, die nicht mitarbeiten können oder

wollen, beispielsweise Kleinkinder, simulierende, aggravierende oder geistig behinderte Patienten (Mrowinski & Scholz, 2011).

So wird das Verfahren der akustisch evozierten Potentiale unter anderem auch zum Neugeborenen-Hörscreening eingesetzt, das seit 2009 deutschlandweit eingeführt worden ist (Rumstadt et al., 2012).

Akustisch evozierte Potentiale werden an der unverletzten Kopfhaut mit Oberflächenelektroden abgeleitet und über einen Computer ausgewertet. Dabei kommt es nach einer gewissen Latenz (Laufzeit) zu elektrischen Potentialen (Spannungsspitzen) mit einer bestimmten Amplitude. Die evozierten Potentiale folgen dem akustischen Reiz immer nach einem regelmäßigen Zeitabstand. Dies kann man sich zu Nutze machen, um die akustisch evozierten Potentiale von der elektrischen Grundaktivität des Gehirns (EEG) zu trennen, indem die akustischen Reize häufig wiederholt werden und anschließend der mittlere Spannungsverlauf nach Reizgabe bestimmt wird. Damit treten die akustisch evozierten Potentiale aus der elektrischen Grundaktivität des Gehirns hervor (Mrowinski & Scholz, 2011).

Vorwiegend wird als akustischer Reiz ein sogenannter „Klick“ verwendet, der elektrisch aus einer Sinushalbwellen oder einem Rechteckimpuls besteht. Es werden bipolare Rechteckimpulse oder komplette Sinuswellen genutzt, wodurch es zur Entstehung von Verdichtungen (Druck) und Verdünnungen (Sog) der Luft kommt. Wechselt man die Reizpolaritäten ab, wird von „alternierender Reizung“ gesprochen. Der Sogreiz führt dazu, dass die Basilarmembran in Richtung der Scala vestibuli ausgelenkt wird. Es werden auch sogenannte „Chirp“-Stimuli verwendet. Ziel dabei ist es, die verschiedenen Bereiche der Basilarmembran möglichst zeitgleich zu stimulieren, indem man die unterschiedlichen Laufzeiten für hohe und tiefe Frequenzen durch die Form des Zeitverlaufs des Chirp anpasst und dadurch in Summe ein höheres Potential auslöst. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Aufspaltung des Chirp in verschiedene Frequenzanteile, um so zu einer tonotopen Prüfung des Gehörs zu gelangen. Dabei ist es wichtig, diese frequenzspezifischen Chirp-Reize mit einem Hochpassrauschen zu überlagern, um die basale Miterregung zu vermeiden (Mrowinski, 2009).

### **2.2.3 Klinische Anwendung der BERA**

Für die BERA finden sich verschiedene klinische Anwendungsbereiche. Zum einen wird sie zum Screening von Hörschäden und zur Bestimmung der Hörschwelle bei möglichst schlafenden, sedierten oder narkotisierten Säuglingen und Kindern angewandt. Zum anderen findet sie ihre Anwendung in der Topodiagnostik von Hörschäden zur Differenzierung von kochleären, neuronalen und zentralen Störungen (Lenarz & Boenninghaus, 2012).

Zur Diagnostik von Hörstörungen mittels BERA wird wie folgt vorgegangen:

Zunächst werden Amplitude und Latenz der Potentiale I, III und V bestimmt. Des Weiteren wird der zeitliche Abstand zwischen den Potentialgipfeln der Wellen I und V (Inter-Peak-Latenz) bestimmt. Bei Frauen beträgt die Inter-Peak-Latenz durchschnittlich 3,9 ms, bei Männern 4,0 ms (Mrowinski & Scholz, 2011).

Bei einer ausgeprägten kochleären Störung oder einer Hörnervschädigung lassen sich keine frühen Potentiale ableiten.

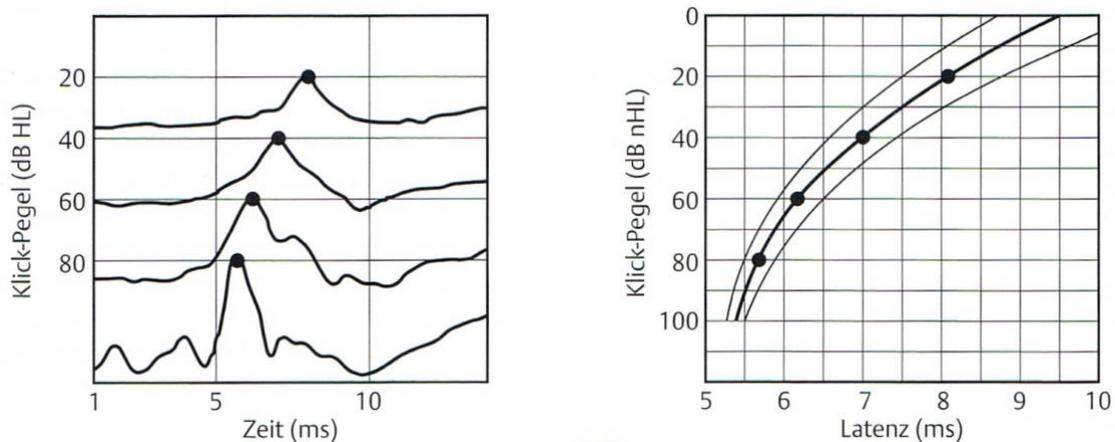
Bei einer beginnenden retrokochleären Erkrankung, beispielsweise dem Vestibularisschwannom, sind alle Potentialkomponenten darstellbar. Auffällig ist hingegen eine verlängerte Interpeaklatenz zwischen den Wellen I und V. Der Grund hierfür besteht darin, dass das Vestibularisschwannom Druck auf die Hörnervenfasern ausübt, wodurch deren Myelinscheiden geschädigt werden und sich in Folge dessen die neuronale Laufzeit verlängert. Bei ungleichmäßiger Schädigung der Myelinscheiden verschiedener Nervenfasern kommt es lediglich zum Auftreten der Welle I da durch die unterschiedlichen Nervenleitgeschwindigkeiten keine synchron ausgelösten FAEP entstehen.

Ein weiteres Indiz für das Vorliegen einer retrokochleären Störung ist eine im Vergleich zur Welle I geringere Amplitude der Welle V. Eine differenzierte Auswertung der Amplituden findet darüber hinaus in der Regel nicht statt.

Zur Beurteilung einer meist einseitigen neuronalen Schädigung (z.B. Vestibularisschwannom) muss die Interpeaklatenz der Potentiale beider Ohren

herangezogen werden. Grundsätzlich weist eine Verlängerung um mehr als 0,2 ms auf eine neuronale Schädigung hin.

Aus den ermittelten Latenzwerten lässt sich in Abhängigkeit der Pegel ein Pegel-Latenz-Diagramm erstellen, wie nachfolgend dargestellt ist (siehe *Abbildung 4: Akustisch evozierte Hirnstammpotentiale (links) und Pegel-Latenz-Diagramm (rechts) nach Mrowinski & Scholz (2011)*). Von dem Verlauf der Pegel-Latenz-Kennlinien kann auf eine bestimmte Hörstörung geschlossen werden.



**Abbildung 4: Akustisch evozierte Hirnstammpotentiale (links) und Pegel-Latenz-Diagramm (rechts) nach Mrowinski & Scholz (2011, S. 98)**

Ein Schalleitungshörverlust führt zur Reduzierung des akustischen Reizes, so dass dieser nicht so laut wahrgenommen wird. Es kommt zu einer Latenzverlängerung. Der Grund hierfür ist das Pegel-Latenz-Verhalten des Potentials: Je leiser der Reiz und damit je kleiner die Reizamplitude, desto größer ist die Latenz.

Sind die basalen Haarzellen bei einer Hochtoninnenschwerhörigkeit mit Hochtonabfall geschädigt, kommt es zu einem verspäteten Auftreten der Potentiale und zwar dadurch, dass die Laufzeit der Wanderwelle durch die geschädigten Bereiche bis zu den funktionsfähigen Hörsinneszellen verlängert ist (Mrowinski, 2009).

### **3. Ziel der Studie**

Die vorliegende Arbeit verfolgt mehrere Ziele: Zum einen die Reizpegel-Kalibrierung der Stimuli für drei verschiedene Schallwandler bei 26 normalhörenden Probanden anhand der subjektiven Hörschwelle (nHL-Kalibrierung). Zum anderen wird eine Antwort auf die Frage gesucht, inwiefern die Schallwandler einen Einfluss auf Latenz und Amplitude der Potentiale haben, da die verschiedenen Wandler unterschiedliche Übertragungseigenschaften aufweisen.

Im Schwerpunkt geht es letztlich darum, normative Werte für Latenz und Amplitude der Welle V der durch Tieffrequenz-(Low-), Mittelfrequenz-(Mid-) und Hochfrequenz-(Hi-)Chirps ausgelösten frühen akustisch evozierten Potentiale für die drei verschiedenen Schallgeber zu ermitteln und gegebenenfalls bestehende Unterschiede aufzuzeigen.

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Normdaten für Latenz und Amplitude (Schwelle) der Potentiale bei Applikation verschiedener Stimuli (Klick, Low-, Mid- und Hi-Chirp) und Verwendung verschiedener Wandler sollen als Grundlage zur objektiven frequenzspezifischen Diagnostik von Hörstörungen dienen.

## **4. Methodisches Vorgehen**

### **4.1 Probanden**

Zur Kalibrierung der einzelnen Reize diente ein Kollektiv von  $n = 26$  normalhörenden Probanden im Alter von 21 bis 25 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 22,4 Jahren. Dabei waren 7 Probanden männlichen und 19 Probanden weiblichen Geschlechts.

Zur Erfassung von Normdaten bezüglich Latenzzeit und Amplitude der frequenzspezifischen akustisch evozierten Potentiale sind Potentiale an  $n = 30$  normalhörenden Probanden im Durchschnittsalter von 24,5 Jahren gemessen und analysiert worden. Davon waren 15 männlichen und 15 weiblichen Geschlechts. Das Hörvermögen der Probanden ist vorab durch Bestimmung der Hörschwelle im Frequenzbereich zwischen 250 – 8000 Hz mit einem Tonschwellenaudiometer ermittelt worden. Dabei sind Probanden ausgeschlossen worden, die in diesem Audiogramm einen Hörverlust von  $>15$  dB HL aufgewiesen haben.

### **4.2 Messtechnik und Messmethoden**

#### **4.2.1 Messkammer**

Die Messungen haben in einer schallgedämpften und elektrisch abgeschirmten Messkammer (Industrial Acoustics Corporation) stattgefunden. Die Probanden haben darin eine liegende Position eingenommen und das Licht in der Kammer ist gedimmt worden. Außer dem Handgerät zur Testung sind keine weiteren elektronischen Geräte in Betrieb gewesen.

#### 4.2.2 Handgerät



Abbildung 5: Handgerät "Sentiero" (PATH\_medical\_GmbH, 2015)

Die Messungen der Hörschwelle, wie auch die der FAEP wurden mit einem Handgerät („Sentiero“) der Firma Path Medical GmbH vorgenommen (siehe *Abbildung 5: Handgerät „Sentiero“*). Mit dem Messgerät können verschiedene Hörtests durchgeführt werden. In der vorliegenden Studie wurde es für die Bestimmung der Hörschwelle und die Ableitung der FAEP verwendet. Das Gerät ist in der Lage, Reizpegel von -10 dB bis 110 dB für die Tonschwellenaudiometrie und von 5 dB bis 90 dB für die Ableitung der FAEP zu generieren. Während eines Messzyklus können Messwerte bei bis zu fünf Reizpegeln erfasst werden. Die ermittelten Messkurvenverläufe werden untereinander auf dem Display des Messgerätes angezeigt.

Zur Messung kann einer der Stimuli ausgewählt werden sowie die Stimulus Rate, die Anzahl der Mittelungen und die Dauer der angezeigten Kurve. Des Weiteren wird für jeden Probanden ein neues Profil angelegt, in dem die Messergebnisse gespeichert werden.

Durch Drücken des „Play-Buttons“ wird die Messung gestartet. Bevor die bei der BERA gemessenen Potentiale aufgezeichnet werden, findet eine Überprüfung

der Elektrodenimpedanz statt. Ist die Impedanz kleiner als 6 k $\Omega$ , erscheint die Anzeige dieses Wertes in grüner Farbe. Bei Werten über 12 k $\Omega$  kann die Messung nicht gestartet werden, da zur Erzielung guter Messergebnisse die Impedanz so niedrig wie möglich sein muss. Die Impedanz wird auch bei den folgenden Messungen regelmäßig geprüft, was gegebenenfalls bei zu hohen Werten zur Unterbrechung der Messung führt. Sollte dies der Fall sein, müssen die Elektroden überprüft und eventuell ausgetauscht, beziehungsweise neue auf der Haut fixiert werden. Somit ist gewährleistet, dass die Messung der Potentiale bei akzeptablen Elektrodenimpedanzen erfolgen kann.

Während der Messung der FAEP wird die bisher ermittelte Antwortkurve auf dem Display angezeigt. Dabei wird auf der x-Achse die Latenzzeit in Millisekunden (ms) und auf der y-Achse die Amplitude in Nanovolt (nV) angezeigt (siehe *Abbildung 6: Screenshot einer FAEP-Messung*). Durch vertikales Auf- bzw. Abstreichen mit dem Finger auf dem Display kann die Amplitudenanzeige vergrößert oder verkleinert werden.

Die Messung kann zwischendurch durch Drücken des „Pause-Buttons“ unterbrochen und anschließend durch den „Play-Button“ wieder fortgesetzt werden.

Nach Abschluss der Messungen eines Messzyklus wird das Ergebnis auf dem Display dargestellt (siehe *Abbildung 6: Screenshot einer FAEP-Messung*) und automatisch unter dem Profil des Probanden abgespeichert, sodass auch eine spätere Einsicht möglich ist (PATH\_medical\_GmbH, 2011).

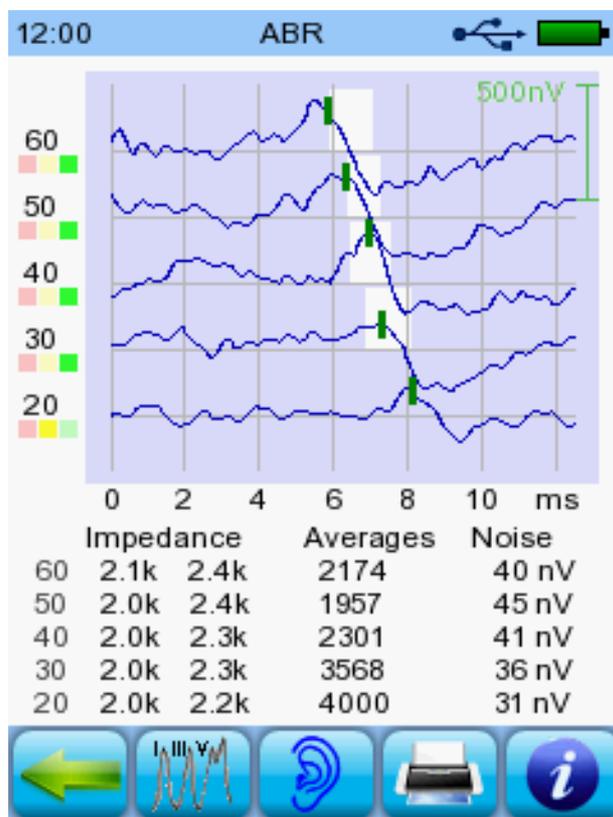


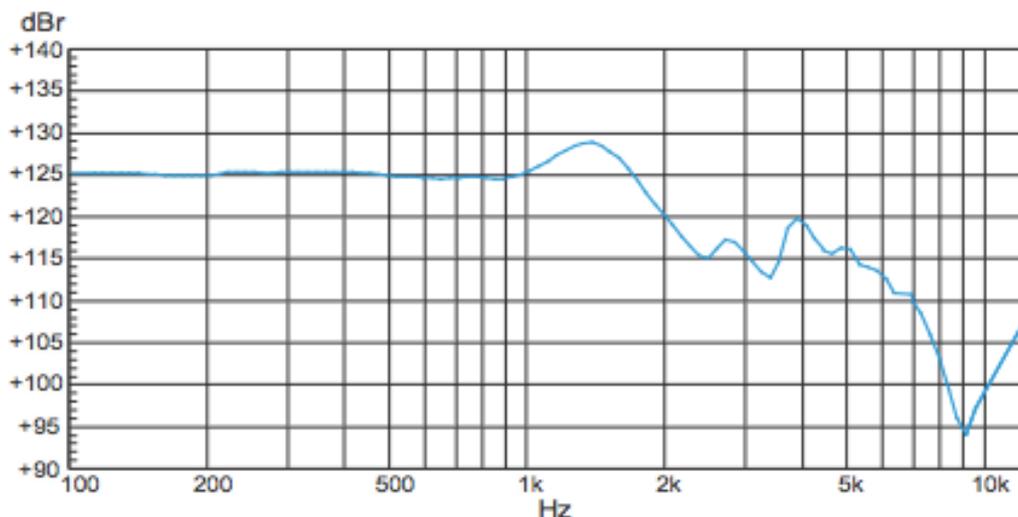
Abbildung 6: Screenshot einer FAEP-Messung

### 4.2.3 Wandler

Die Messung der Potentiale ist mit drei verschiedenen Wandlern durchgeführt worden. Verwendet wurden der Audiometrie-Kopfhörer HDA 280 der Firma Sennheiser (nachfolgend als „Kopfhörer“ bezeichnet), die Ohrsonde EP-DP der Firma PATH Medical GmbH (nachfolgend als „Ohrsonde“ oder „Sonde“ bezeichnet) und die Einsteckhörer („Insert Earphones“ ER-3A) von Etymotic Research Inc. (nachfolgend als „Einsteckhörer“ bezeichnet).

Die Schallgeber zeigen bei einer konstanten Spannung am Lautsprecher jeweils einen spezifischen Frequenzgang, also eine Abhängigkeit des erzeugten Schallpegels von der Frequenz. Diese werden im Folgenden qualitativ untersucht.

### Frequenzgang



Messung auf B&K 4152 nach IEC 60318-3  
Kopfhörer-Eingangsspannung 500 mV<sub>eff</sub>

Abbildung 7: Frequenzgang Kopfhörer HDA 280 (Sennheiser\_electronic\_GmbH\_&\_Co.\_KG, 2003)

Die Abbildung 7: Frequenzgang Kopfhörer HDA 280 zeigt den Frequenzgang des Kopfhörers. Dieser weist bei einer Eingangsspannung von 500 mV im Frequenzbereich von 100 bis 1000 Hz einen Schallpegel von 125 dB auf. In höheren Frequenzbereichen fällt er zunehmend ab, bis er bei 9000 Hz den kleinsten Schallpegel von 95 dB erreicht.

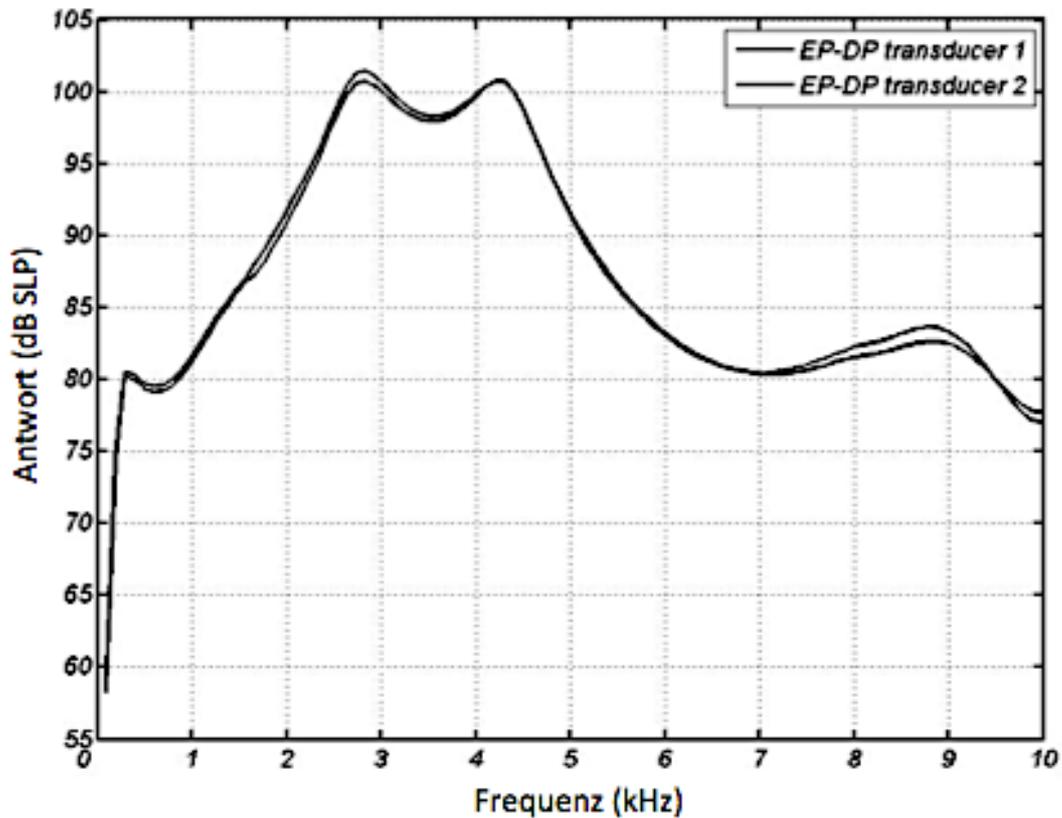


Abbildung 8: Frequenzgang Ohrsonde (PATH\_medical\_GmbH)

Der Frequenzgang der Sonde ist in *Abbildung 8: Frequenzgang Ohrsonde* dargestellt. Dabei ist bei Aufnahme in einem 2cc-Kuppler (Ohrsimulator der Firma B&K) bis 2,9 kHz ein steigender Kurvenverlauf des Schallpegels zu beobachten. Der Referenzschallpegel bei 1 kHz beträgt 82 dB SPL. Bis etwa 3 kHz steigt der Schallpegel etwa um 20 dB SPL an. Im Frequenzbereich ab 4,3 bis 7 kHz sinkt der Schallpegel wieder um 20 dB SPL.

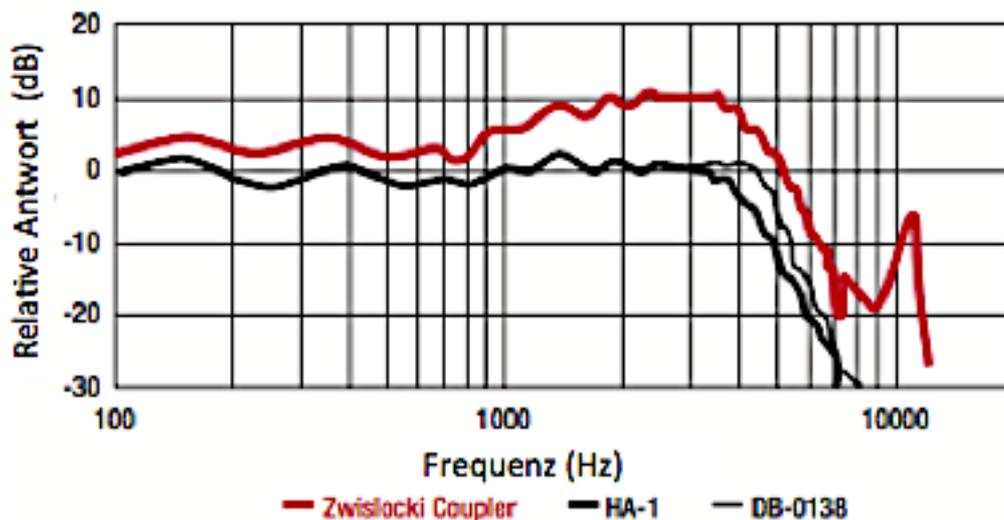


Abbildung 9: Frequenzgang Einsteckhörer (Etymotic\_Research\_inc.)

In der *Abbildung 9: Frequenzgang Einsteckhörer* sind die Frequenzgänge der Einsteckhörer für verschiedene Kuppler (Zwislocki Coupler, HA-1, DB-0138) abgebildet. Diese zeigen bei Frequenzen von 100 Hz bis 3000 Hz einen relativ konstanten Schallpegel. Erst oberhalb von etwa 3000 Hz sinkt dieser um 30 dB.

#### 4.2.4 Reizparameter

Die verwendeten Reizparameter sind im Rahmen dieser Studie für die drei verschiedenen Schallwandler kalibriert worden (*siehe Abschnitt 4.3 Studiendesign*).

Im Folgenden werden die verwendeten Reize und ihre Erregungsmuster in der Cochlea beschrieben.

Der Klickreiz (nachfolgend als „Klick“ bezeichnet) ist mit einer Dauer von nur 0,1 ms der kürzeste Reiz. Er umfasst ein breites Frequenzspektrum und erregt damit nahezu alle Sinneszellen entlang der Basilarmembran. Somit weist er keine Frequenzspezifität auf. Im Unterschied zum Chirp-Reiz hat er jedoch den Vorteil, dass neben der Welle V auch die Welle I generiert wird und somit die neurale Laufzeit zwischen der Cochlea und dem Hirnstamm bestimmt werden kann (Mrowinski & Scholz, 2011).

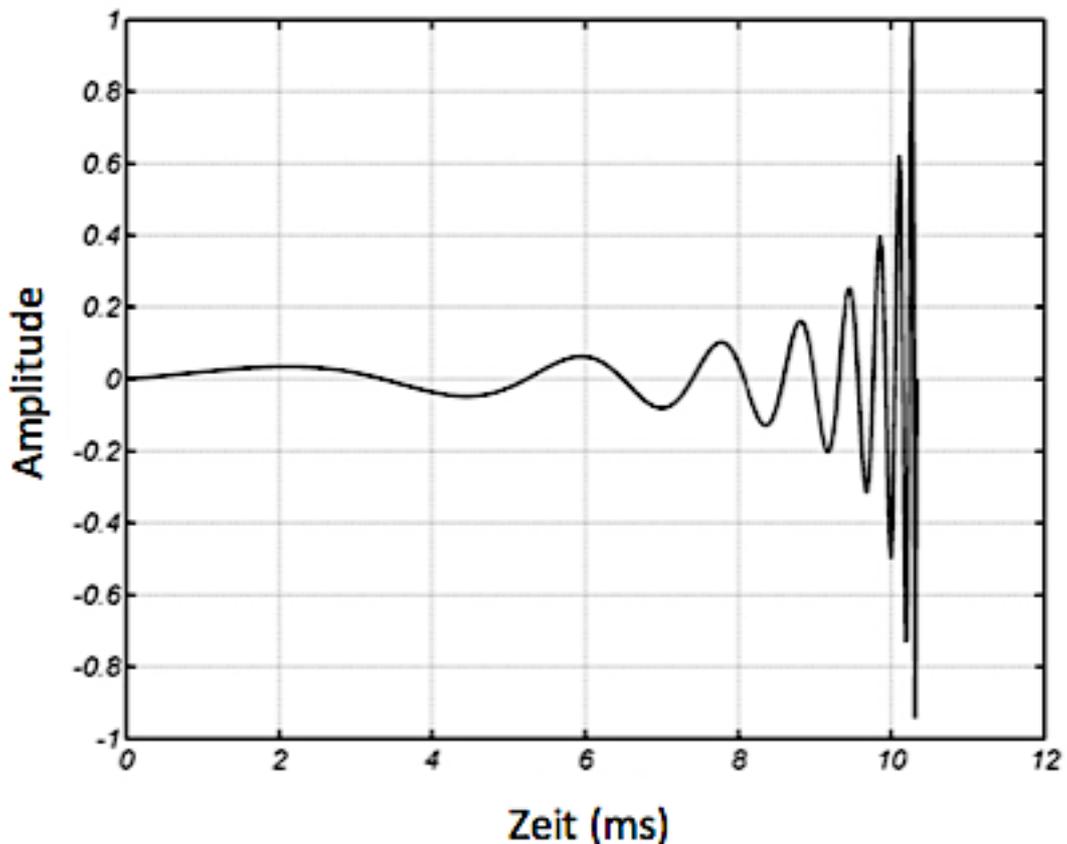


Abbildung 10: Breitband-Chirp

Der Breitband-Chirp (nachfolgend als „Chirp“ bezeichnet) umfasst aufsteigend die Frequenzen von 300 Hz bis 11500 Hz und hat eine Dauer von 8,43 ms (siehe *Abbildung 10: Breitband-Chirp*). Konstruiert ist er nach dem Vorbild des Cochlea-Modells *Don Chirp 4* nach Elberling, Callo und Don (2010), welches (wie auch das Cochlea-Modell *Don Chirp 2*) auf der Basis von an 81 normalhörenden erwachsenen Probanden abgeleiteten Potentialen ermittelt wurde (Elberling & Don, 2008). Der Vorteil gegenüber dem Klick besteht darin, dass der Chirp höhere Amplituden der Welle V generiert. Durch seine Konstruktion werden zuerst tiefe Frequenzen, im Anschluss mittlere und zuletzt hohe Frequenzen generiert. Tiefe Frequenzen erregen Sinneszellen in der Schneckenspitze, hohe Frequenzen Sinneszellen an der Basis der Cochlea. Dadurch wird erreicht, dass letztendlich ein möglichst großer Bereich synchron stimuliert wird und dadurch eine höhere Potentialamplitude erzielt werden kann.

Ein weiterer Vorteil des Chirp-Reizes ist ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis, was letztendlich die Testzeit im Vergleich zu Messungen mit dem Klick-Stimulus reduziert (Elberling, Don, Cebulla, & Sturzebecher, 2007).

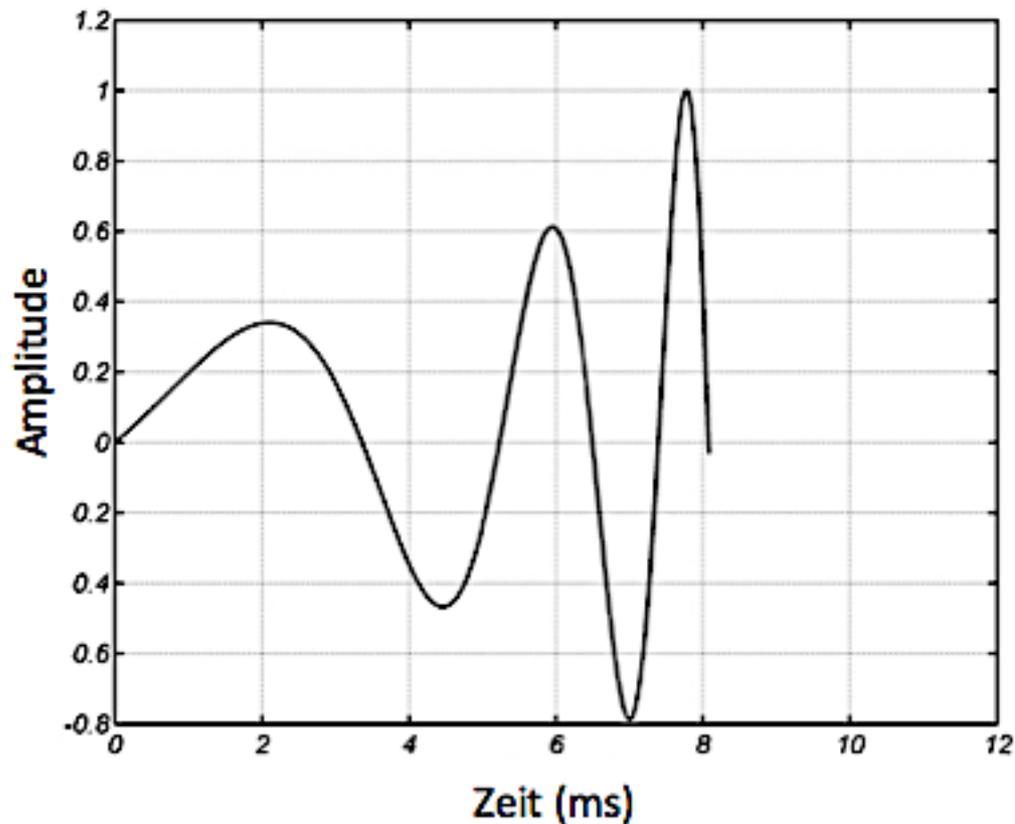


Abbildung 11: Low-Chirp

Der Tieffrequenz-Chirp (nachfolgend als „Low-Chirp“ bezeichnet) ist mit 12,79 ms der längste Chirp-Reiz und schließt die Frequenzen 100 Hz bis 1000 Hz ein (siehe *Abbildung 11: Low-Chirp*). Auch dieser Stimulus ist nach dem Cochlea-Modells *Don Chirp 4* nach Elberling, Callo und Don (2010) konstruiert.

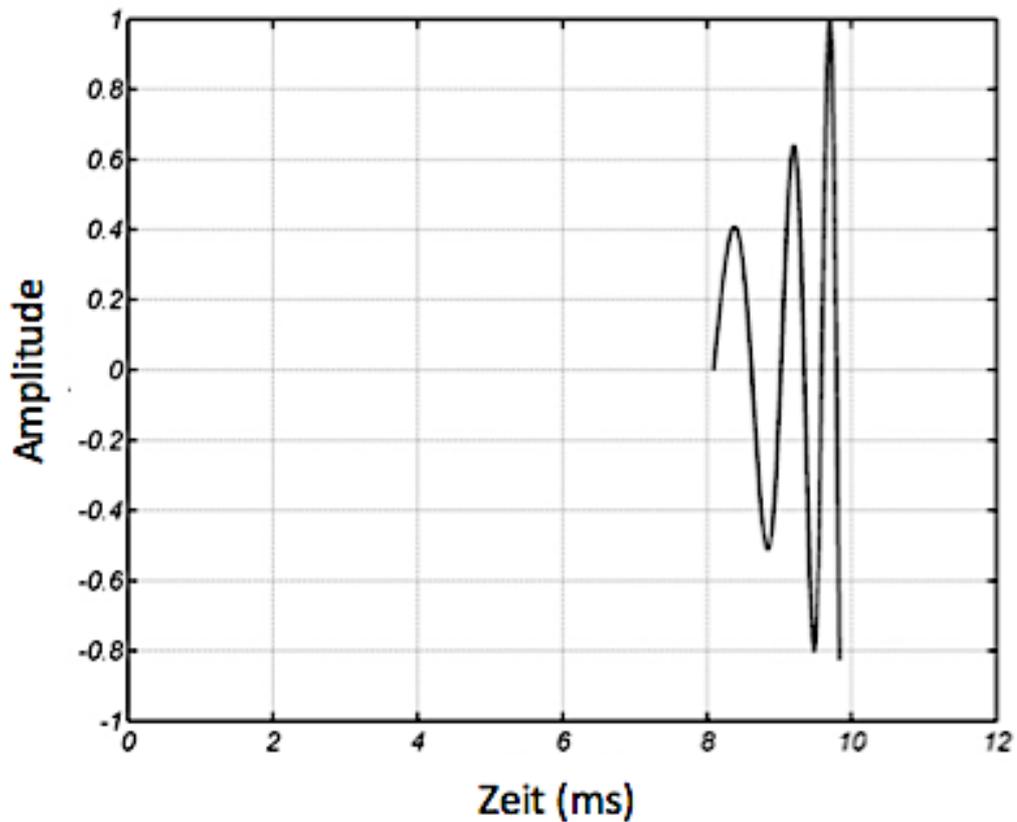


Abbildung 12: Mid-Chirp

Der Mittelfrequenz-Chirp (nachfolgend als „Mid-Chirp“ bezeichnet) mit der Länge von 4,46 ms setzt sich aus Frequenzen von 1000 Hz bis 3000 Hz zusammen (siehe *Abbildung 12: Mid-Chirp*). Die Konstruktion des Chirp ist nach dem Cochlea-Modell *Don Chirp 2* nach Elberling, Callo und Don (2010) erfolgt.

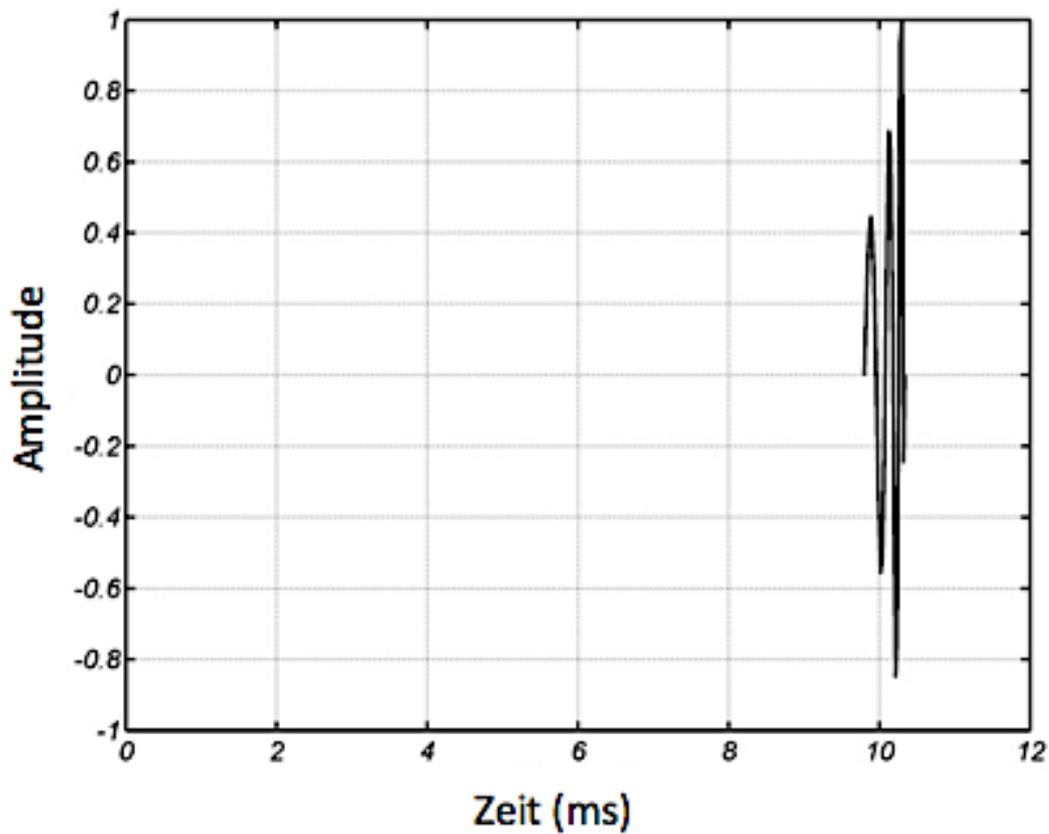


Abbildung 13: Hi-Chirp

Der Hochfrequenz-Chirp (nachfolgend als „Hi-Chirp“ bezeichnet) bildet sich aus den Frequenzen 3000 Hz bis 11500 Hz mit einer Dauer von 4,33 ms (siehe *Abbildung 13: Hi-Chirp*). Dieser Chirp wurde ebenfalls nach dem Cochlea-Modell *Don Chirp 2* nach Elberling, Callo und Don (2010) konstruiert.

Bei Applikation der Chirp-Reize Mid-Chirp und Low-Chirp wurde eine ipsilaterale Maskierung mit hochpass-gefiltertem Rauschen angewandt, um bestimmte Sinneszellen im Bereich der Cochlea zur Potentialbildung auszuschließen. Dabei ist ein gleichverteiltes Rauschen, bei dem Reiz Low-Chirp im Frequenzbereich von 1500 bis 10000 Hz und bei dem Mid-Chirp von 3500 bis 10000 Hz mit einem im Vergleich zum Stimulus um 15 dB verminderten Pegel gemeinsam mit dem Testreiz appliziert worden.

Außerdem hat eine kontralaterale Vertäubung des Gegenohres mit Breitbandrauschen stattgefunden, um ein einohriges Messen zu gewährleisten,

also das Gegenohr von der Potentialbildung auszuschließen. Denn dadurch, dass der Schädelknochen durch den Testreiz in Schwingung gebracht wird, gelangt der einorig applizierte Schall auch auf das kontralaterale Ohr, wenn auch mit geringerer Lautstärke. Durch Beschallung des Gegenohres mit Rauschen werden die Potentiale dort ungeordnet generiert, sodass in Summe (bei der Mittelung der Signalabschnitte) dieses Ohr nicht oder nur wenig zur abzuleitenden Potentialbildung beiträgt (Mrowinski, 2011).

#### **4.2.5 Ableitparameter**

Zur Ableitung der Potentiale werden Oberflächenklebeelektroden, die zusätzlich mit einem leitenden Elektrodengel versehen werden, verwendet. Als Elektrodenpositionen sind die hohe Stirn und das ipsilaterale Mastoid gewählt worden. Die hohe Stirn ersetzt die klassischer Weise gesetzte Vertexelektrode, da sich die Amplitude der Potentiale dadurch in der Praxis kaum verändert und diese Stelle bei dichterem Kopfhaareng praktikabler ist (Mrowinski & Scholz, 2011).

Die Stirnelektrode wird mit dem positiven Anschluss des Gerätes über ein Kabel verbunden, die Mastoid-Elektrode mit dem negativen, die Wangenelektrode dient als Referenz.

Zur Aufzeichnung der FAEP findet ein gewichtetes Mittel zur Artefaktunterdrückung statt. Das aufgezeichnete EEG wird automatisch von 100 Hz bis 2000 kHz bandpassgefiltert, sodass nur Signale in diesem Frequenzbereich aufgezeichnet und die anderen Frequenzen unterdrückt werden.

### **4.3 Studiendesign**

Zunächst wurde in einer ersten Messreihe die Kalibrierung der Reizpegel der verschiedenen Stimuli an einem Normkollektiv aus 26 Probanden im Alter von 21 bis 25 Jahren vorgenommen. Um die Normalhörigkeit zu testen, ist ein Tonschwellenaudiogramm erstellt worden. Voraussetzung zur Teilnahme war ein intaktes Hörvermögen mit einem maximalem Hörverlust von 15 dB HL über alle Audiometerfrequenzen zwischen 125 Hz und 8000 Hz. Zur Kalibrierung der

einzelnen Stimuli (Klick, Chirp, Low-Chirp, Mid-Chirp, Hi-Chirp) wurden diese den Probanden mit den verschiedenen Schallgebern (Sonde, Einsteckhörern, Kopfhörer) in absteigenden Lautstärken präsentiert, wobei bei jeder Pegelveränderung die Stimulus-Wahrnehmung durch den Probanden zu bestätigen oder zu verneinen war. Dabei betrug der initiale Stimulus 20 dB. Anschließend wurde der Stimulus jeweils um 5 dB reduziert, bis durch den Probanden keine Wahrnehmung mehr angezeigt, also die subjektive Hörschwelle erreicht worden war. Dieser Schwellenwert wurde notiert. Das Vorgehen wurde mit allen Schallgebern und allen Stimuli an beiden Ohren wiederholt. Die Stimulusdarbietung erfolgte ohne Maskierung im Jitter-Modus, also einer zufälligen Änderung der Reizrate von 28 bis 32 Hz, bei einer durchschnittlichen Reizrate von 30 Hz.

Die zweite Messsitzungsreihe zur Erhebung der normativen Daten für die verschiedenen Stimuli hinsichtlich Latenzzeit und Amplitude der Welle V ist nach Auswertung der Kalibrierung erfolgt. Das zu testende Ohr wurde per Zufallsprinzip ausgewählt. Auch in dieser Messsitzung ist zunächst ein Tonschwellenaudiogramm durchgeführt worden, um das Hörvermögen zu überprüfen. Die Probanden wurden angewiesen, auf der Liege in der Hörkammer eine entspannte Position einzunehmen, um störende Muskelaktivität vor allem im Gesicht- und Nackenbereich zu vermeiden. Anschließend wurden die Hautstellen, auf denen die Klebeelektroden platziert werden sollten, mit Desinfektionsmittel gereinigt und die Elektroden angebracht. Letztlich wurde das Messgerät mit den Elektroden verbunden, der jeweilige Schallgeber aufgesetzt und mit den Messungen begonnen. Daraufhin erfolgte die Darbietung der einzelnen Stimuli mit absteigenden Schallpegeln in Zehnerschritten von 70 dB bis 10 dB. Die Reizrate betrug jeweils durchschnittlich 30 Hz. Es hat eine ipsilaterale Maskierung, eine kontralaterale Vertäubung und ein Jittering stattgefunden. Bei Reizpegeln größer als 20 dB wurden 2000 Mittelungen durchgeführt, bei Reizpegeln von 20 dB und 10 dB wurde die Mittelungszahl auf 3000 erhöht. Der Klick-Stimulus wurde mit alternierender Reizpolarität (Druck und Sog abwechselnd) dargeboten. Alle Chirp-Stimuli wurden mit initialer Druckphase präsentiert.

Zur Überprüfung der Funktionalität der frequenzspezifischen Stimuli wurden Messungen an einem Patienten mit einer cochleären Hochtonschwerhörigkeit vorgenommen. Im ersten Schritt wurde die Hörschwelle des Patienten bestimmt (Tonschwellenaudiogramm). In einem zweiten Schritt wurden dem Patienten schließlich die Stimuli Klick, Low-Chirp, Mid-Chirp und Hi-Chirp mit dem Kopfhörer HDA 280 präsentiert. Die Stimuli wurden bei Reizpegeln von 70 dB bis 30 dB in Schritten von 10 dB und einer Reizrate von 30 Hz dargeboten. Die Anzahl der Mittelungen betrug 2000. Alle Stimuli wurden mit alternierender Reizpolarität (Druck und Sog abwechselnd) präsentiert.

#### **4.4 Datenanalyse**

Zur Auswertung der in der ersten Messreihe gewonnenen Daten wurde für jeden Reiz und für jeden Schallgeber jeweils ein Mittelwert bestimmt.

Die Analyse der in der zweiten Messsitzungsreihe gewonnenen Daten bezüglich normativer Werte für Latenz und Amplitude der Welle V wurde mit MATLAB® durchgeführt.

Die Messdaten wurden von dem Handgerät in MATLAB® zur graphischen Darstellung importiert. Für jeden einzelnen Probanden wurde die Welle V der FAEP markiert und die zugehörige Latenz und Amplitude bestimmt. Die statistische Auswertung der ermittelten Latenzen und Amplituden wurde ebenfalls mit Hilfe von MATLAB®, als auch mit dem Statistikprogramm SPSS® vorgenommen.

Zunächst wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test die Normalverteilung der Stichprobe überprüft. Im Anschluss wurden eine einfaktorische Varianzanalyse und gegebenenfalls der Tukey HSD (Honestly Significant Difference) Post-hoc-Test durchgeführt.

Als Latenzzeit wurde der Abstand zwischen dem Stimulus und der Welle V definiert. Als Nullpunkt wurde die halbe Stimulusdauer gesetzt. Dauer und Nullpunkt (Startpunkt) sind in *Tabelle 1: Dauer der Stimuli und jeweilige Startpunkte der Latenzzeitmessung* für die verschiedenen Stimuli aufgeführt.

Tabelle 1: Dauer der Stimuli und jeweilige Startpunkte der Latenzzeitmessung

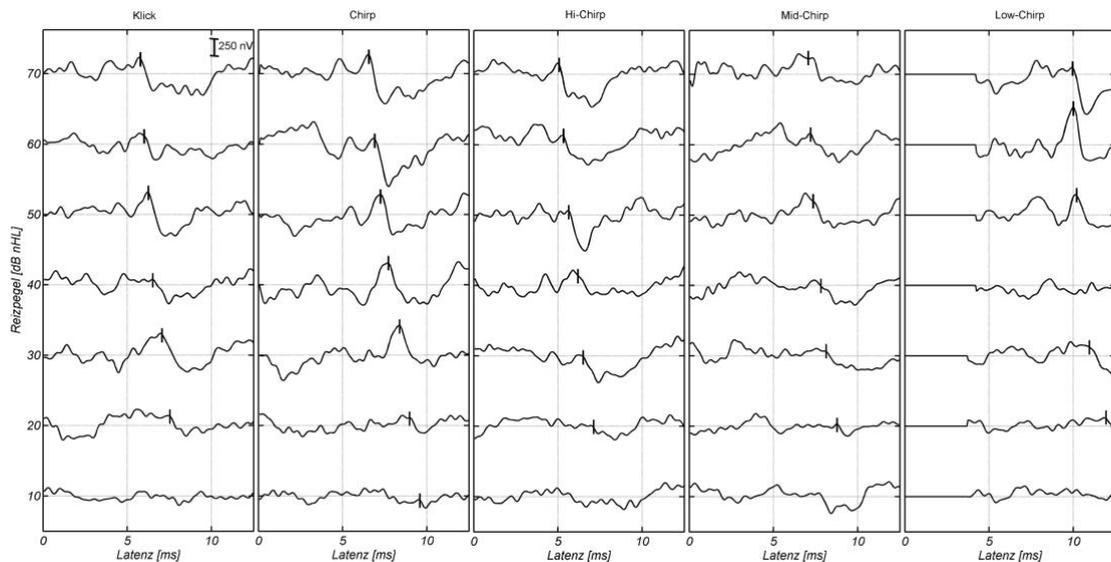
| <b>Stimulus</b>        | <b>Klick</b> | <b>Chirp</b> | <b>Hi-Chirp</b> | <b>Low-Chirp</b> | <b>Mid-Chirp</b> |
|------------------------|--------------|--------------|-----------------|------------------|------------------|
| <b>Dauer [ms]</b>      | 0,1          | 3,4375       | 4,3333          | 5,7292           | 4,4583           |
| <b>Startpunkt [ms]</b> | 0            | 1,7188       | 2,1667          | 2,8646           | 2,2292           |

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Fallbeispiel normalhörender Proband

Im Folgenden werden exemplarisch die FAEP eines normalhörenden Probanden für die verschiedenen Stimuli demonstriert.

Die *Abbildung 14: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Sonde* zeigt die mit der Sonde als Schallwandler evozierten FAEP, die *Abbildung 15: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Insert* die mit den Einsteckhörern und die *Abbildung 16: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Kopfhörer* die mit dem Kopfhörer als Wandler evozierten FAEP. Der Nullpunkt wurde stets in der Mitte der Dauer des jeweiligen Reizes gesetzt.



**Abbildung 14: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Sonde**

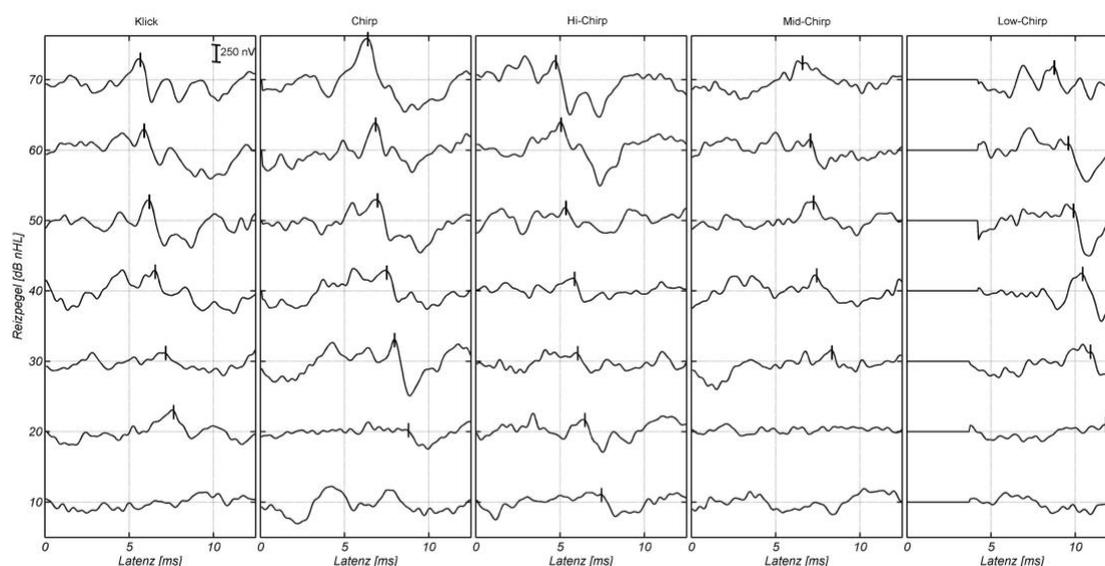
Die *Abbildung 14: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Sonde* bildet die Kurvenverläufe der akustisch evozierten Potentiale einer normalhörenden Probandin nach Stimulusdarbietung durch die Sonde ab. Man erkennt in den

einzelnen Spalten die Verläufe durch die verschiedenen Stimuli – Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp. Die Nulllinie in der letzten Spalte zeigt an, dass zu dieser Zeit der Stimulus Low-Chirp abgespielt, aber noch kein Potential aufgezeichnet wurde. Die senkrechten Markierungen („|“) kennzeichnen die Latenz der Welle V. In der *Tabelle 2: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli und Schallpegel, Schallwandler EPDP* sind die Latenzzeiten der Welle V wiedergegeben.

**Tabelle 2: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli und Schallpegel, Schallwandler EPDP**

|                  | <b>70 dB</b> | <b>60 dB</b> | <b>50 dB</b> | <b>40 dB</b> | <b>30 dB</b> | <b>20 dB</b> |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Klick</b>     | 5,750        | 5,938        | 6,188        | 6,625        | 7,000        | 7,500        |
| <b>Chirp</b>     | 6,500        | 6,813        | 7,313        | 7,688        | 8,375        | 9,000        |
| <b>Hi-Chirp</b>  | 5,063        | 5,313        | 5,625        | 6,188        | 6,438        | 7,125        |
| <b>Mid-Chirp</b> | 7,000        | 7,188        | 7,750        | 7,800        | 8,175        | 8,750        |
| <b>Low-Chirp</b> | 9,978        | 10,000       | 10,190       | -            | 11,000       | 11,880       |

In der *Abbildung 15: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Insert* werden die Kurvenverläufe der akustisch evozierten Potentiale dieser normalhörenden Probandin nach Stimulusdarbietung über Einsteckhörer abgebildet.



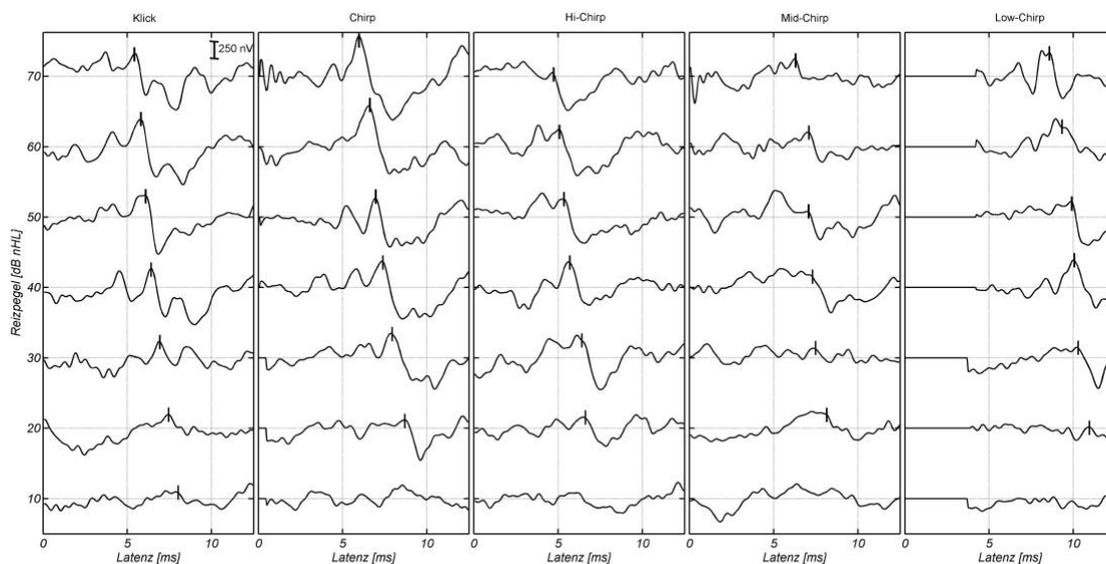
**Abbildung 15: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Insert**

Die zugehörigen Latenzzeiten der Welle V sind in *Tabelle 3: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli und Schallpegel, Schallwandler Einsteckhörer* aufgeführt.

**Tabelle 3: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli und Schallpegel, Schallwandler Einsteckhörer**

|                  | 70 dB | 60 dB | 50 dB | 40 dB  | 30 dB  | 20 dB  |
|------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| <b>Klick</b>     | 5,675 | 5,875 | 6,188 | 6,563  | 7,063  | 7,625  |
| <b>Chirp</b>     | 6,438 | 6,813 | 6,938 | 7,500  | 8,000  | 8,750  |
| <b>Hi-Chirp</b>  | 4,688 | 5,063 | 5,313 | 5,813  | 6,000  | 6,438  |
| <b>Mid-Chirp</b> | 6,750 | 7,125 | 7,313 | 7,438  | 8,375  | -      |
| <b>Low-Chirp</b> | 8,750 | 9,625 | 9,813 | 10,310 | 10,940 | 11,750 |

Die *Abbildung 16: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Kopfhörer* stellt die Kurvenverläufe der akustisch evozierten Potentiale der normalhörenden Probandin nach Stimulusdarbietung über Kopfhörer dar.



**Abbildung 16: FAEP einer normalhörenden Probandin, ausgelöst durch Klick, Chirp, Hi-Chirp, Mid-Chirp und Low-Chirp; Schallwandler Kopfhörer**

In der *Tabelle 4: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli und Schallpegel, Schallwandler Kopfhörer* sind die Latenzzeiten für die Welle V aufgeführt.

**Tabelle 4: Latenz (in ms) der Welle V bei Verwendung verschiedener Stimuli und Schallpegel, Schallwandler Kopfhörer**

|                  | <b>70 dB</b> | <b>60 dB</b> | <b>50 dB</b> | <b>40 dB</b> | <b>30 dB</b> | <b>20 dB</b> |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Klick</b>     | 5,438        | 5,831        | 6,125        | 6,563        | 6,938        | 7,500        |
| <b>Chirp</b>     | 6,000        | 6,563        | 7,000        | 7,375        | 7,938        | 8,750        |
| <b>Hi-Chirp</b>  | 4,625        | 5,188        | 5,375        | 5,750        | 6,438        | 6,625        |
| <b>Mid-Chirp</b> | 6,250        | 7,125        | 7,000        | 7,250        | 7,563        | 8,125        |
| <b>Low-Chirp</b> | 8,625        | 9,188        | 9,875        | 10,060       | 10,310       | 11,060       |

## 5.2 Ergebnisse Kollektiv

Für den Stimulus Klick haben sich für die einzelnen Wandler folgende Werte für Latenz und Amplitude ergeben (*siehe Tabelle 5: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Klick*). Dargestellt sind die Mittelwerte aus den Datensätzen der normalhörenden Probanden.

**Tabelle 5: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Klick**

|                        | <b>Reizstufe (dB nHL)</b>     | <b>70</b>                 | <b>60</b> | <b>50</b> | <b>40</b> | <b>30</b> | <b>20</b> | <b>10</b> |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>KLICK</b>           | <b>HDA 280 Latenz (ms)</b>    | 5,770                     | 6,010     | 6,360     | 6,770     | 7,280     | 7,950     | 8,830     |
|                        | Standardabweichung            | 0,191                     | 0,231     | 0,243     | 0,274     | 0,333     | 0,423     | 0,486     |
|                        | Anzahl Probanden (n)          | 30                        | 30        | 30        | 30        | 30        | 30        | 30        |
|                        | Welle V detektiert (%)        | 100,0                     | 100,0     | 100,0     | 100,0     | 96,7      | 96,7      | 53,3      |
|                        | <b>HDA 280 Amplitude (nV)</b> | 471,0                     | 403,0     | 371,0     | 361,0     | 316,0     | 216,0     | 134,0     |
|                        | Standardabweichung            | 175,0                     | 139,0     | 116,0     | 117,0     | 101,0     | 66,0      | 29,5      |
|                        | Welle V detektiert (%)        | 100,0                     | 100,0     | 100,0     | 100,0     | 96,7      | 96,7      | 53,3      |
|                        |                               | <b>INSERT Latenz (ms)</b> | 5,880     | 6,150     | 6,490     | 6,950     | 7,400     | 7,950     |
| Standardabweichung     |                               | 0,186                     | 0,240     | 0,286     | 0,339     | 0,387     | 0,364     | 0,333     |
| Anzahl Probanden (n)   |                               | 29                        | 29        | 29        | 29        | 29        | 29        | 29        |
| Welle V detektiert (%) |                               | 100                       | 100       | 96,6      | 93,1      | 96,6      | 75,9      | 31        |
|                        | <b>INSERT Amplitude (nV)</b>  | 410,0                     | 326,0     | 299,0     | 306,0     | 250,0     | 187,0     | 133,0     |
|                        | Standardabweichung            | 134,0                     | 91,6      | 115,0     | 106,0     | 103,0     | 74,1      | 56,6      |
|                        | Welle V detektiert (%)        | 100,0                     | 100,0     | 96,6      | 93,1      | 96,6      | 75,9      | 31,0      |
|                        |                               | <b>EPDP Latenz (ms)</b>   | 5,940     | 6,280     | 6,640     | 7,050     | 7,560     | 8,070     |
| Standardabweichung     |                               | 0,200                     | 0,287     | 0,315     | 0,387     | 0,428     | 0,392     | 0,616     |

|  |                            |       |       |       |       |       |       |       |
|--|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | Anzahl Probanden (n)       | 29    | 29    | 29    | 29    | 29    | 29    | 29    |
|  | Welle V detektiert (%)     | 100,0 | 96,6  | 100,0 | 93,1  | 100,0 | 75,9  | 37,9  |
|  | <b>EPDP Amplitude (nV)</b> | 355,0 | 303,0 | 326,0 | 286,0 | 221,0 | 190,0 | 147,0 |
|  | Standardabweichung         | 93,3  | 118,0 | 115,0 | 83,6  | 82,0  | 44,8  | 56,7  |
|  | Welle V detektiert (%)     | 100,0 | 96,6  | 100,0 | 93,1  | 100,0 | 75,9  | 37,9  |

Die gültigen Werte für Latenzzeit und Amplitude betragen für den Stimulus Klick bei allen Schallgebern in den Reizstufen von 70 dB bis 30 dB immer nahezu 100%. Durch die Darbietung der Reize mittels Kopfhörer sowie der Einsteckhörer kann in den niedrigen Reizstufen 20 dB und 10 dB die Welle V häufiger eindeutig bestimmt werden, als mittels der Sonde.

Bei Darbietung des Breitband-Chirps ergaben sich für die einzelnen Wandler nachfolgende Ergebnisse (siehe Tabelle 6: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Chirp):

**Tabelle 6: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Chirp**

|              | Reizstufe (dB nHL)            | 70    | 60    | 50    | 40    | 30    | 20    | 10    |
|--------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>CHIRP</b> | <b>HDA 280 Latenz (ms)</b>    | 6,170 | 6,530 | 7,100 | 7,720 | 8,000 | 8,710 | 9,530 |
|              | Standardabweichung            | 0,298 | 0,319 | 0,346 | 0,306 | 0,374 | 0,438 | 0,479 |
|              | Anzahl Probanden (n)          | 30    | 30    | 30    | 30    | 30    | 30    | 30    |
|              | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 96,7  | 96,7  | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 63,3  |
|              | <b>HDA 280 Amplitude (nV)</b> | 483,0 | 428,0 | 403,0 | 430,0 | 402,0 | 324,0 | 200,0 |
|              | Standardabweichung            | 154,0 | 142,0 | 129,0 | 114,0 | 120,0 | 113,0 | 80,9  |
|              | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 96,7  | 96,7  | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 63,3  |
|              | <b>INSERT Latenz (ms)</b>     | 6,310 | 6,780 | 7,340 | 7,860 | 8,250 | 8,940 | 9,630 |
|              | Standardabweichung            | 0,277 | 0,356 | 0,354 | 0,347 | 0,384 | 0,444 | 0,547 |
|              | Anzahl Probanden (n)          | 29    | 29    | 29    | 29    | 29    | 29    | 29    |
|              | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,6  | 72,4  |
|              | <b>INSERT Amplitude (nV)</b>  | 448,0 | 366,0 | 369,0 | 345,0 | 401,0 | 273,0 | 187,0 |
|              | Standardabweichung            | 133,0 | 95,5  | 101,0 | 86,8  | 135,0 | 102,0 | 67,9  |
|              | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,6  | 72,4  |
|              | <b>EPDP Latenz (ms)</b>       | 6,770 | 7,240 | 7,690 | 8,130 | 8,630 | 9,100 | 9,600 |
|              | Standardabweichung            | 0,252 | 0,317 | 0,361 | 0,354 | 0,397 | 0,403 | 0,425 |
|              | Anzahl Probanden (n)          | 27    | 27    | 27    | 27    | 27    | 27    | 27    |
|              | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,3  | 85,2  | 44,4  |
|              | <b>EPDP Amplitude (nV)</b>    | 397,0 | 381,0 | 398,0 | 374,0 | 316,0 | 223,0 | 183,0 |
|              | Standardabweichung            | 112,0 | 122,0 | 126,0 | 128,0 | 95,8  | 95,9  | 55,2  |
|              | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,3  | 85,2  | 44,4  |

Der Stimulus Chirp löst bei den Pegeln von 70 dB bis 20 dB mit allen Schallgebern Potentiale aus mit Werten liegen bei nahezu 100 %.

Bei dem Stimulus Low-Chirp haben sich nachfolgende Latenz- und Amplitudenwerte für die einzelnen Wandler gezeigt (siehe Tabelle 7: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Low-Chirp):

**Tabelle 7: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Low-Chirp**

|                  | <b>Reizstufe (dB nHL)</b>     | <b>70</b> | <b>60</b> | <b>50</b> | <b>40</b> | <b>30</b> | <b>20</b> | <b>10</b> |
|------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>LOW-CHIRP</b> | <b>HDA 280 Latenz (ms)</b>    | 8,980     | 9,390     | 10,200    | 10,800    | 11,100    | 11,900    | 12,800    |
|                  | Standardabweichung            | 0,370     | 0,530     | 0,525     | 0,438     | 0,491     | 0,579     | 0,751     |
|                  | Anzahl Probanden (n)          | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 96,4      | 92,9      | 89,3      | 85,7      | 92,9      | 78,6      | 21,4      |
|                  | <b>HDA 280 Amplitude (nV)</b> | 424,0     | 363,0     | 311,0     | 347,0     | 310,0     | 243,0     | 192,0     |
|                  | Standardabweichung            | 143,0     | 122,0     | 138,0     | 128,0     | 128,0     | 81,0      | 66,9      |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 96,4      | 92,9      | 89,3      | 85,7      | 92,9      | 78,6      | 21,4      |
|                  | <b>INSERT Latenz (ms)</b>     | 9,080     | 9,370     | 10,400    | 10,900    | 11,200    | 12,000    | 12,800    |
|                  | Standardabweichung            | 0,391     | 0,592     | 0,484     | 0,480     | 0,566     | 0,584     | 0,748     |
|                  | Anzahl Probanden (n)          | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 85,7      | 85,7      | 78,6      | 78,6      | 71,4      | 67,9      | 32,1      |
|                  | <b>INSERT Amplitude (nV)</b>  | 407,0     | 309,0     | 378,0     | 334,0     | 318,0     | 239,0     | 164,0     |
|                  | Standardabweichung            | 119,0     | 127,0     | 132,0     | 100,0     | 136,0     | 104,0     | 78,8      |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 85,7      | 85,7      | 78,6      | 78,6      | 71,4      | 67,9      | 32,1      |
|                  | <b>EPDP Latenz (ms)</b>       | 9,910     | 10,400    | 10,700    | 11,000    | 11,300    | 11,700    | 12,600    |
|                  | Standardabweichung            | 0,450     | 0,398     | 0,398     | 0,488     | 0,592     | 0,716     | 0,749     |
|                  | Anzahl Probanden (n)          | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 84,0      | 96,0      | 96,0      | 96,0      | 92,0      | 48,0      | 16,0      |
|                  | <b>EPDP Amplitude (nV)</b>    | 293,0     | 322,0     | 310,0     | 274,0     | 282,0     | 231,0     | 184,0     |
|                  | Standardabweichung            | 115,0     | 140,0     | 102,0     | 111,0     | 116,0     | 118,0     | 103,0     |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 84,0      | 96,0      | 96,0      | 96,0      | 92,0      | 48,0      | 16,0      |

Beim Low-Chirp fällt auf, dass im Vergleich zum Klick und Chirp weniger gültige Antworten generiert worden sind. Dies trifft vor allem bei Stimulation mit der Sonde zu. Darüber hinaus ist bemerkenswert, dass die Latenzzeiten bei den hohen Reizpegeln zwischen 70 dB und 50 dB eine auffallend hohe Standardabweichung zeigen.

Die Latenz- und Amplitudenwerte der Potentialwelle V beim Mid-Chirp sind in Tabelle 8 niedergelegt (siehe Tabelle 8: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Mid-Chirp).

**Tabelle 8: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Mid-Chirp**

|                  | <b>Reizstufe (dB nHL)</b>     | <b>70</b> | <b>60</b> | <b>50</b> | <b>40</b> | <b>30</b> | <b>20</b> | <b>10</b> |
|------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>MID-CHIRP</b> | <b>HDA 280 Latenz (ms)</b>    | 6,640     | 7,000     | 7,460     | 7,760     | 8,220     | 8,570     | 9,100     |
|                  | Standardabweichung            | 0,510     | 0,547     | 0,538     | 0,398     | 0,434     | 0,531     | 0,459     |
|                  | Anzahl Probanden (n)          | 26        | 26        | 26        | 26        | 26        | 26        | 26        |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 92,3      | 76,9      | 88,5      | 88,5      | 84,6      | 61,5      | 42,3      |
|                  | <b>HDA 280 Amplitude (nV)</b> | 259,0     | 230,0     | 252,0     | 235,0     | 212,0     | 163,0     | 144,0     |
|                  | Standardabweichung            | 107,0     | 87,6      | 71,3      | 72,8      | 88,3      | 48,9      | 69,8      |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 92,3      | 76,9      | 88,5      | 88,5      | 84,6      | 61,5      | 42,3      |
|                  | <b>INSERT Latenz (ms)</b>     | 6,580     | 7,110     | 7,570     | 7,910     | 8,260     | 8,950     | 9,010     |
|                  | Standardabweichung            | 0,525     | 0,591     | 0,407     | 0,351     | 0,407     | 0,539     | 0,431     |
|                  | Anzahl Probanden (n)          | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        | 28        |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 78,6      | 75,0      | 85,7      | 85,7      | 78,6      | 42,9      | 21,4      |
|                  | <b>INSERT Amplitude (nV)</b>  | 259,0     | 250,0     | 252,0     | 281,0     | 245,0     | 168,0     | 165,0     |
|                  | Standardabweichung            | 85,4      | 125,0     | 124,0     | 100,0     | 74,9      | 55,0      | 81,3      |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 78,6      | 75,0      | 85,7      | 85,7      | 78,6      | 42,9      | 21,4      |
|                  | <b>EPDP Latenz (ms)</b>       | 7,030     | 7,620     | 7,890     | 8,200     | 8,540     | 9,000     | 9,190     |
|                  | Standardabweichung            | 0,516     | 0,462     | 0,499     | 0,466     | 0,538     | 0,743     | 0,893     |
|                  | Anzahl Probanden (n)          | 26        | 26        | 26        | 26        | 26        | 26        | 26        |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 80,8      | 84,6      | 69,2      | 88,5      | 73,1      | 38,5      | 19,2      |
|                  | <b>EPDP Amplitude (nV)</b>    | 235,0     | 248,0     | 239,0     | 245,0     | 205,0     | 196,0     | 154,0     |
|                  | Standardabweichung            | 100,0     | 87,1      | 55,6      | 90,7      | 55,8      | 53,1      | 78,2      |
|                  | Welle V detektiert (%)        | 80,8      | 84,6      | 69,2      | 88,5      | 73,1      | 38,5      | 19,2      |

Ähnlich wie bei den Ergebnissen der Stimulation mit dem Low-Chirp ist auch bei der Stimulation mit dem Mid-Chirp bemerkenswert, dass bei weniger Probanden gültige Antworten generiert werden konnten im Vergleich zum Klick und Chirp. Wenn man die Standardabweichung betrachtet, fällt auch hier eine hohe Standardabweichung in den Reizpegeln von 70 dB bis 50 dB auf.

Letztlich haben sich beim Stimulus Hi-Chirp nachfolgende Ergebnisse gezeigt (siehe Tabelle 9: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Hi-Chirp):

**Tabelle 9: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Hi-Chirp**

|                 | Reizstufe (dB nHL)            | 70    | 60    | 50    | 40    | 30    | 20    | 10    |
|-----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>HI-CHIRP</b> | <b>HDA 280 Latenz (ms)</b>    | 4,820 | 5,160 | 5,570 | 6,060 | 6,590 | 7,100 | 7,830 |
|                 | Standardabweichung            | 0,203 | 0,244 | 0,299 | 0,350 | 0,376 | 0,385 | 0,429 |
|                 | Anzahl Probanden (n)          | 30    | 30    | 30    | 30    | 30    | 30    | 30    |
|                 | Welle V detektiert (%)        | 96,7  | 96,7  | 96,7  | 96,7  | 100,0 | 86,7  | 66,7  |
|                 | <b>HDA 280 Amplitude (nV)</b> | 378,0 | 379,0 | 340,0 | 330,0 | 313,0 | 237,0 | 144,0 |
|                 | Standardabweichung            | 96,4  | 101,0 | 104,0 | 117,0 | 136,0 | 95,2  | 60,2  |
|                 | Welle V detektiert (%)        | 96,7  | 96,7  | 96,7  | 96,7  | 100,0 | 86,7  | 66,7  |
|                 | <b>INSERT Latenz (ms)</b>     | 4,830 | 5,150 | 5,510 | 5,950 | 6,400 | 6,900 | 7,590 |
|                 | Standardabweichung            | 0,236 | 0,184 | 0,311 | 0,298 | 0,359 | 0,409 | 0,562 |
|                 | Anzahl Probanden (n)          | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    |
|                 | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 96,4  | 92,9  | 92,9  | 96,4  | 67,4  |
|                 | <b>INSERT Amplitude (nV)</b>  | 428,0 | 374,0 | 294,0 | 259,0 | 268,0 | 234,0 | 184,0 |
|                 | Standardabweichung            | 138,0 | 127,0 | 83,3  | 93,0  | 121,0 | 95,3  | 70,4  |
|                 | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 96,4  | 92,2  | 92,9  | 96,4  | 67,9  |
|                 | <b>EPDP Latenz (ms)</b>       | 5,200 | 5,600 | 6,000 | 6,430 | 7,010 | 7,530 | 8,210 |
|                 | Standardabweichung            | 0,261 | 0,332 | 0,312 | 0,340 | 0,408 | 0,499 | 0,487 |
|                 | Anzahl Probanden (n)          | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    |
|                 | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,4  | 96,4  | 78,6  | 39,3  |
|                 | <b>EPDP Amplitude (nV)</b>    | 342,0 | 388,0 | 360,0 | 325,0 | 279,0 | 198,0 | 132,0 |
|                 | Standardabweichung            | 122,0 | 174,0 | 113,0 | 116,0 | 87,5  | 85,3  | 42,6  |
|                 | Welle V detektiert (%)        | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,4  | 96,4  | 78,6  | 39,3  |

Die gültigen Werte sind beim Stimulus Hi-Chirp wieder bei nahezu 100 % in den Reizstufen von 70 dB bis 30 dB und damit mit denen des Klick- und des Chirp-Reizes vergleichbar.

### 5.2.1 Latenz der Welle V

Die nachfolgenden Abbildungen (siehe Abbildungen 17 – 19) zeigen die individuellen Pegel-Latenzdiagramme der Welle V aller Probanden nach Stimulation mit dem Klick-Reiz für die jeweiligen Schallwandler. Jeder Graph stellt das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V eines Probanden dar. Dadurch wird die Streuung der einzelnen Ergebnisse veranschaulicht.

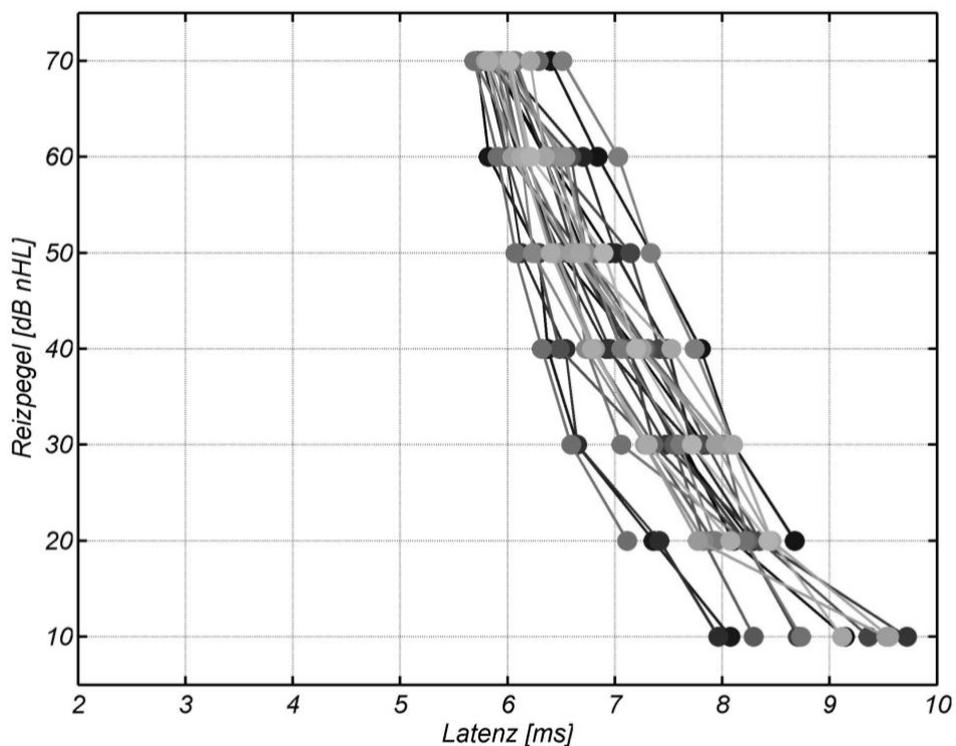


Abbildung 17: Individuelle Pegel-Latenz-Verläufe der Welle V aller Probanden im Falle der Klick-Reize. Reizgabe über Sonde EPDP

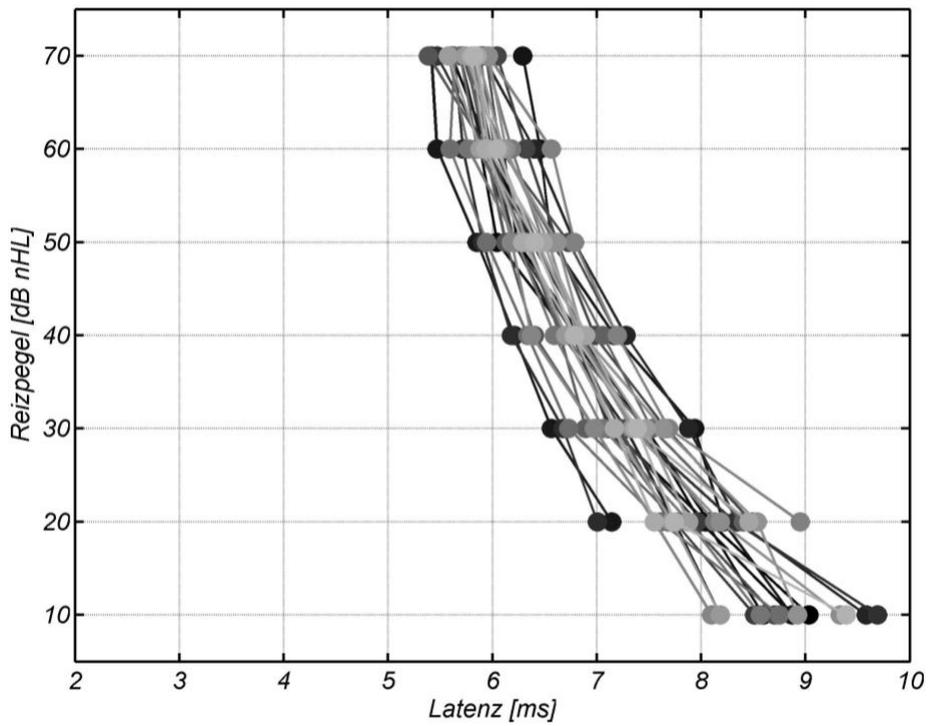


Abbildung 18: Individuelle Pegel-Latenz-Verläufe der Welle V aller Probanden im Falle der Klick-Reize. Reizgabe über Kopfhörer HDA 280

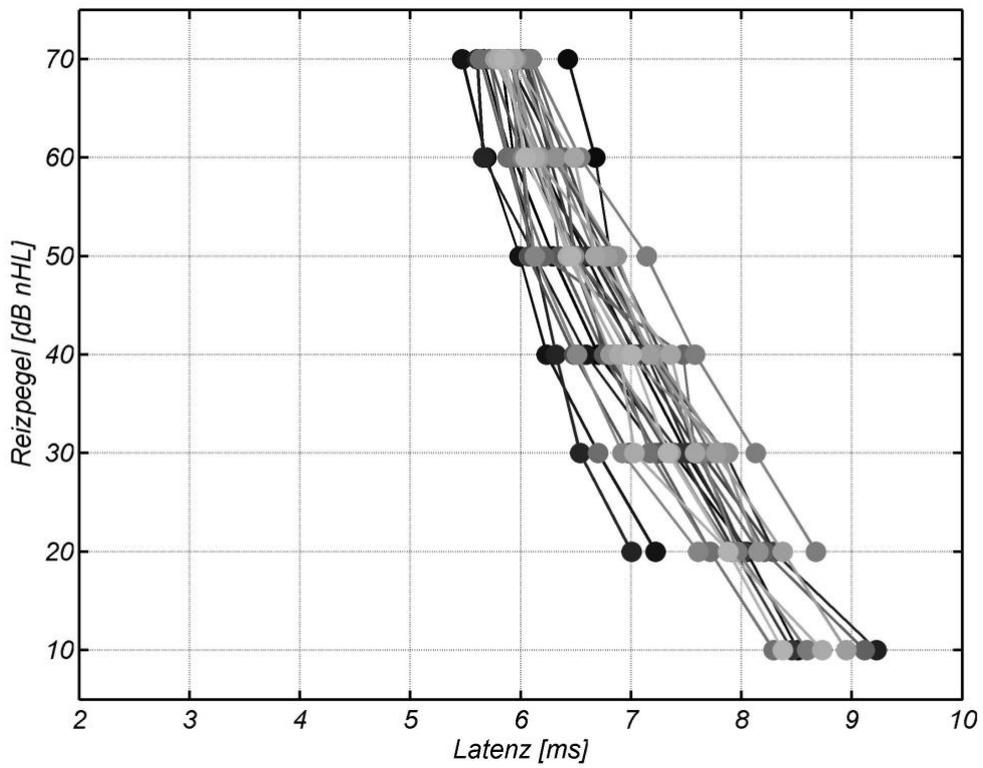


Abbildung 19: Individuelle Pegel-Latenz-Verläufe der Welle V aller Probanden im Falle der Klick-Reize. Reizgabe über Einsteckhörer Insert

### 5.2.1.1 Vergleich der Schallwandler

Die folgenden Abbildungen zeigen die Pegel-Latenz-Diagramme, die sich für die verschiedenen Schallgeber Kopfhörer, Einsteckhörer und Sonde bei Stimulusgabe mittels Klick-Reiz, Chirp-Reiz, Low-Chirp-Reiz, Mid-Chirp-Reiz und Hi-Chirp-Reiz ergeben. Die Werte der Standardabweichung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in das Diagramm übernommen worden, diese können den Tabellen 5 - 9 entnommen werden.

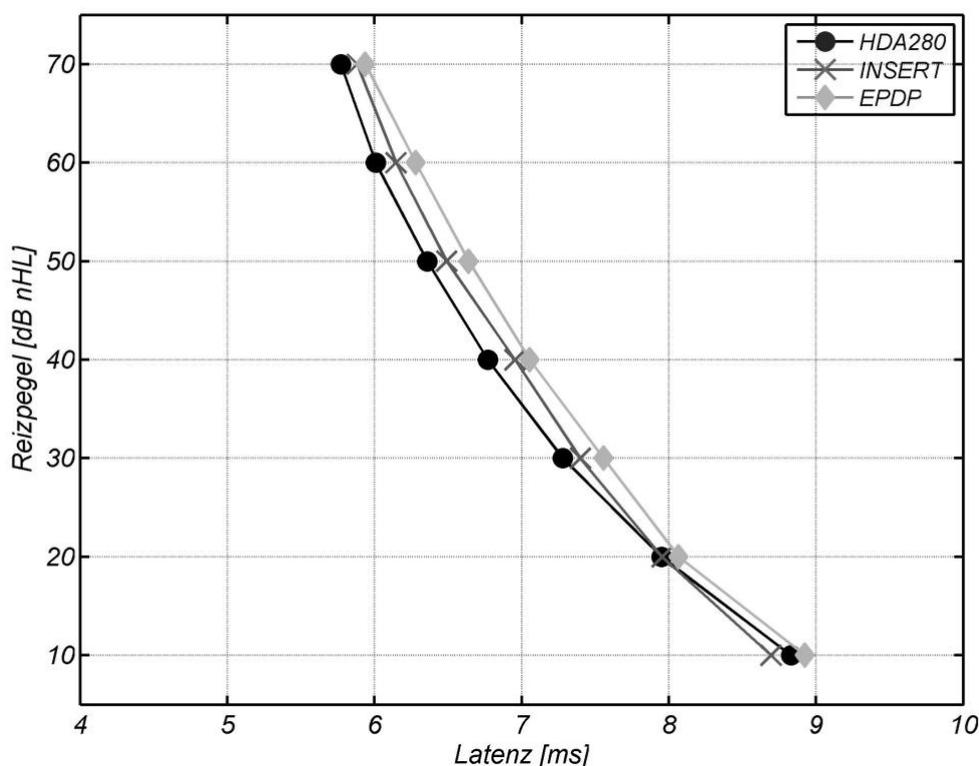


Abbildung 20: Abhängigkeit der Latenz der Welle V vom Pegel des Stimulus im Falle des Klick-Reizes und Vergleich der verschiedenen Wandler

Aus Abbildung 20 geht hervor, in welchem Maße die Latenz der Welle V vom Pegel des Stimulus im Falle des Klick-Reizes abhängt. Des Weiteren werden die verschiedenen Wandler miteinander verglichen. Die Standardabweichung der Latenz der Welle V ist in der *Tabelle 5* niedergelegt. Es zeigt sich, dass sich der mittlere Verlauf der Pegel-Latenz-Kennlinie aller Probanden bei den verschiedenen Wandlern kaum voneinander unterscheidet.

Bei hohen Reizpegeln ergeben sich kürzere Latenzen als bei niedrigen Reizpegeln. Das Latenzverhalten entspricht den Normwerten (Jacobson, 1985).

In der Varianzanalyse und dem ergänzenden Post-hoc-Test ergibt sich über alle Reizpegel ein signifikanter Unterschied zwischen der Reizgabe mittels Kopfhörer und der Sonde, bei 10 dB nHL zusätzlich zwischen dem Einsteckhörer und der Sonde (siehe Anhang: Tabelle 20 und Tabelle 21).

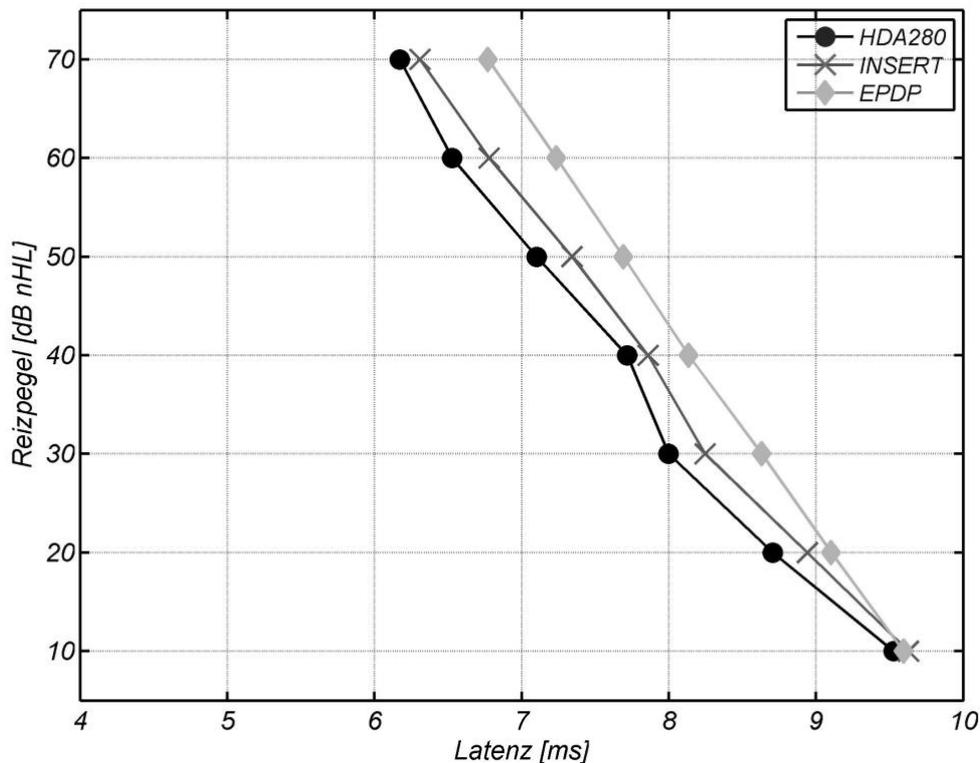


Abbildung 21: Abhängigkeit der Latenz der Welle V vom Pegel des Stimulus im Falle des Breitband-Chirp-Reizes und Vergleich der verschiedenen Wandler

Die Abbildung 21 stellt das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für die verschiedenen Schallwandler im Falle des Chirp-Reizes dar. Die Standardabweichung der Latenzen ist in der *Tabelle 6* wiedergegeben.

In der Varianzanalyse ergeben sich signifikante Unterschiede bei den Pegeln 70 dB nHL bis 20 dB nHL. Im Post-hoc-Test zeigt sich dieser Unterschied bei 60, 50

und 30 dB bei allen drei Schallgebern, bei 70, 40 und 20 dB zwischen dem Kopfhörer und der Sonde (siehe Anhang: Tabelle 22 sowie Tabelle 23).

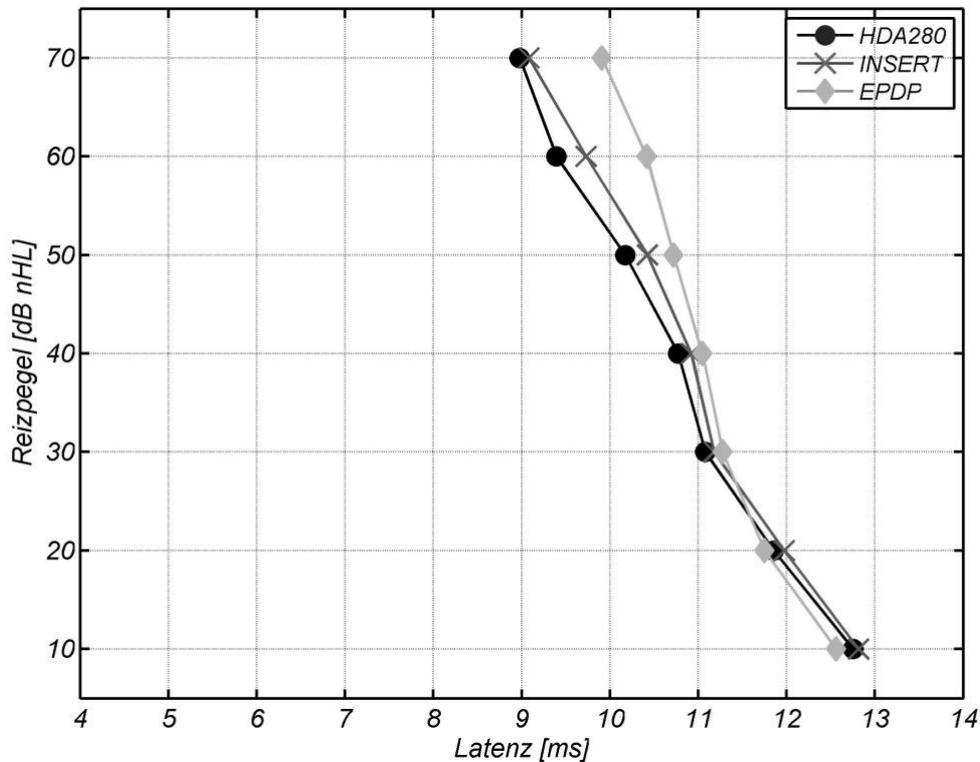


Abbildung 22: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Low-Chirp und Vergleich der verschiedenen Wandler

In der Abbildung 22 ist das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Low-Chirp dargestellt. Die Standardabweichung der Latenzen ist in *Tabelle 7* niedergelegt.

In der Varianzanalyse mit Post-hoc-Test ergeben sich signifikante Unterschiede bei Reizpegel zwischen 70 und 50 dB nHL jeweils zwischen Kopfhörer und Sonde, bei 70 und 60 dB zusätzliche zwischen Einsteckhörer und Sonde (siehe Anhang: *Tabelle 24* und *Tabelle 25*).

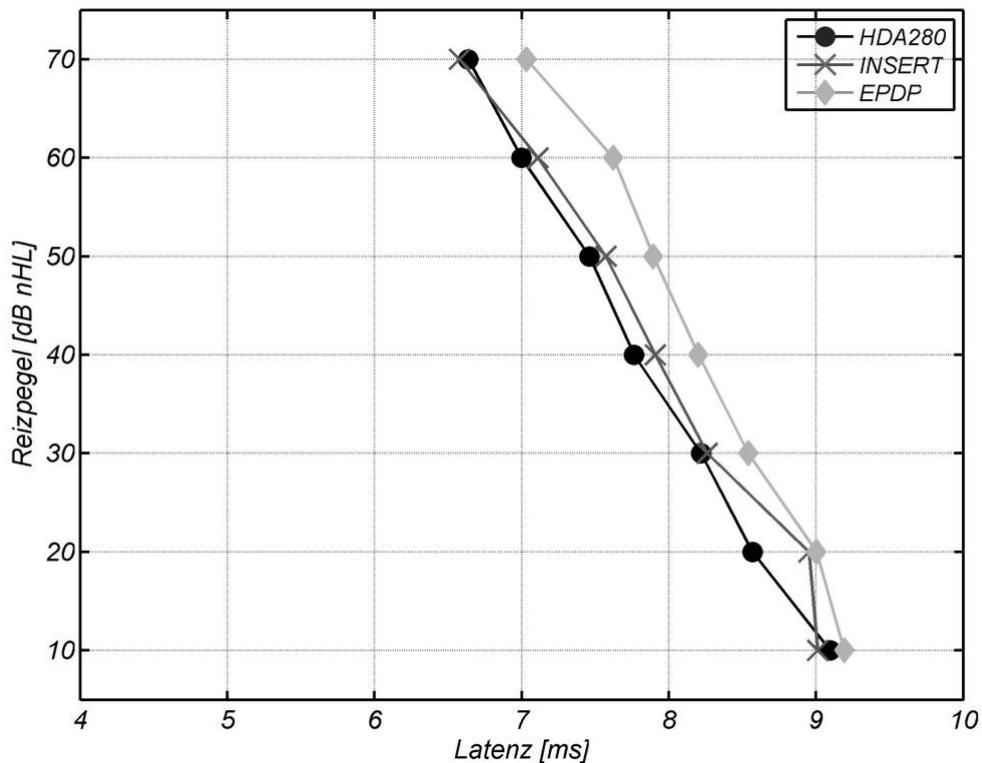


Abbildung 23: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Mid-Chirp und Vergleich der verschiedenen Wandler

Abbildung 23 zeigt das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Mid-Chirp. Die Standardabweichung der Latenzen kann der *Tabelle 8* entnommen werden.

Es ergibt sich ein signifikanter Unterschied der Latenzen bei der akustischen Reizung mit Kopfhörer und Sonde bei den Pegeln 60 dB bis 40 dB, bei 60 dB zusätzlich beim Einsteckhörer und bei der Sonde (*siehe Anhang: Tabelle 26 und Tabelle 27*).

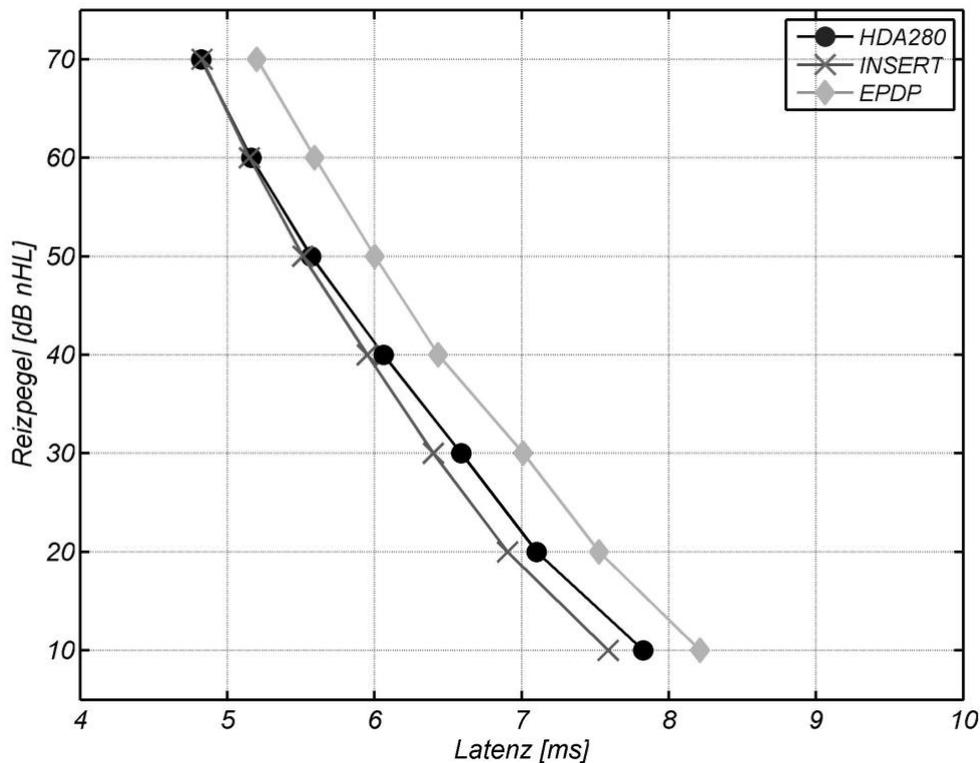


Abbildung 24: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für den Hi-Chirp und Vergleich der verschiedenen Wandler

Die Abbildung 24 zeigt das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für die verschiedenen Wandler beim Stimulus Hi-Chirp. Die Standardabweichung der Latenzen ist in der *Tabelle 9* niedergelegt.

Hier ergibt sich in der Varianzanalyse mit Post-hoc-Test ein Unterschied bei allen Reizpegeln zwischen Einsteckhörer und Sonde, bei 70 dB bis 20 dB zusätzlich zwischen Kopfhörer und Sonde (*siehe Anhang: Tabelle 28 sowie Tabelle 29*).

Auffällig ist hier eine deutlich verlängerte Latenz von etwa 0,5 ms bei allen Reizpegel nach Reizgabe mit der Sonde.

#### 5.2.1.2 Vergleich der Stimuli

Abbildung 25 zeigt das Pegel-Latenz-Verhalten für die einzelnen Stimuli nach Reizgabe mit dem Schallgeber Kopfhörer.

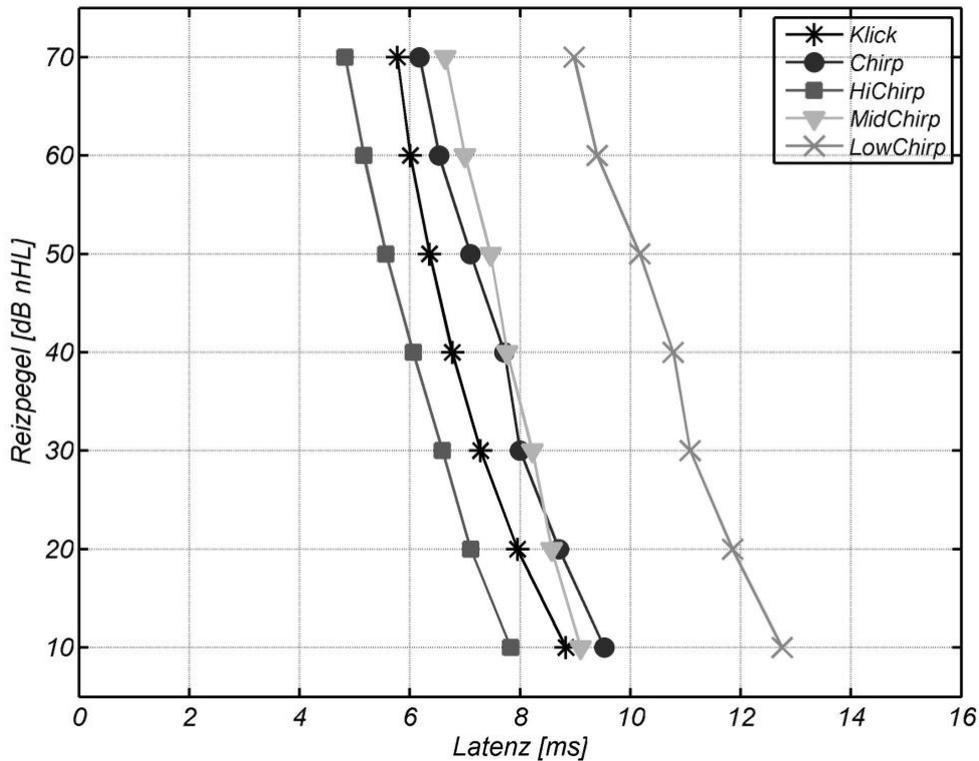


Abbildung 25: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA280 für die verschiedenen Stimuli

Die kürzeste Latenz der Welle V ergibt sich beim Hi-Chirp. Darauf folgen die Latenzen der Welle V beim Klick, beim Mid-Chirp und beim Chirp, wobei bei den letztgenannten etwa die gleichen Latenzwerte auftreten. Die Latenzen des Low-Chirp sind am längsten. Der Unterschied zwischen den Latenzen beim Low-Chirp und beim Hi-Chirp beträgt für alle Frequenzen etwa 5 ms.

In der Varianzanalyse (siehe Anhang: Tabelle 30) ergeben sich bei allen Reizpegeln signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Post-hoc-Analyse zeigt diesen Unterschied bei allen Gruppen bei 70-50 dB. Bei 40- 20 dB stellen die Gruppen Chirp und Mid-Chirp, bei 10 dB die Gruppen Klick und Mid-Chirp eine Ausnahme dar, hier ergibt sich jeweils kein signifikanter Unterschied (siehe Anhang: Tabelle 31).

Abbildung 26 stellt das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit der Sonde (EPDP) für die verschiedenen Stimuli dar.

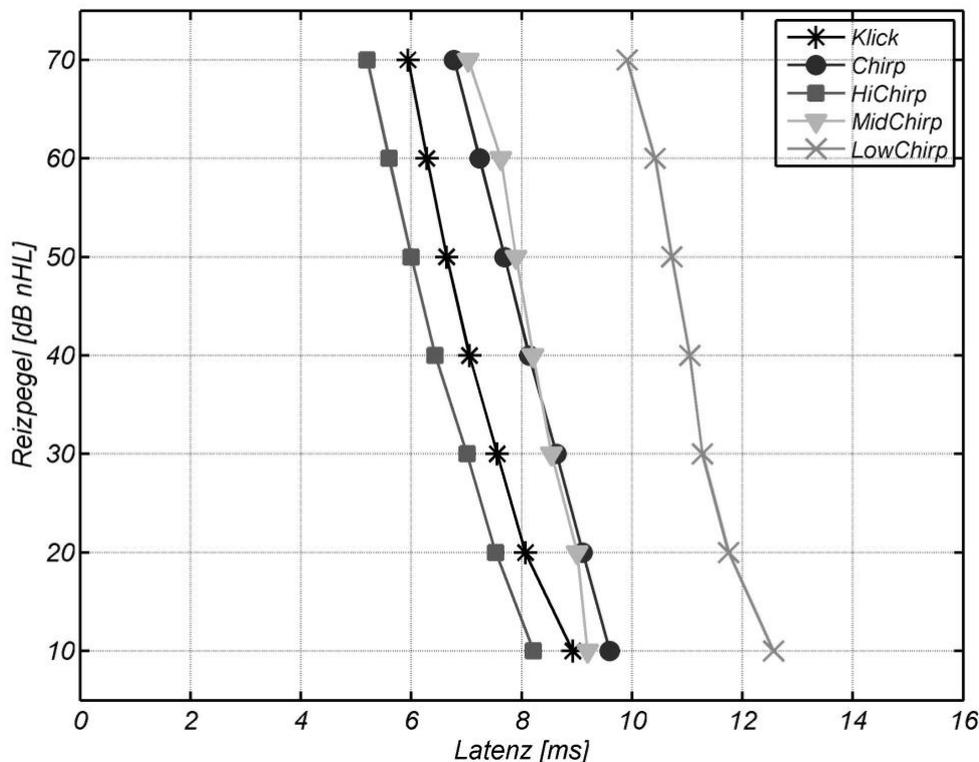


Abbildung 26: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit der Sonde (EPDP) für die verschiedenen Stimuli

Auch hier zeigt sich eine deutlich längere Latenz bei allen Reizpegeln im Falle des Low-Chirps. Die kürzesten Latenzzeiten ergeben sich ebenso beim Hi-Chirp und beim Klick.

In der Varianzanalyse mit ergänzendem Post-hoc-Test ergibt sich eine Signifikanz bei allen Reizpegeln zwischen sämtlichen Gruppen mit Ausnahme von Chirp und Mid-Chirp sowie bei 10 dB zusätzlich beim Klick und Hi-Chirp, hier zeigt sich jeweils kein signifikanter Unterschied (siehe Anhang: Tabelle 38 und Tabelle 39).

Die Abbildung 27 stellt das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V für die verschiedenen Stimuli bei akustischer Reizung durch die verschiedenen Stimuli mit dem Einsteckhörer dar.

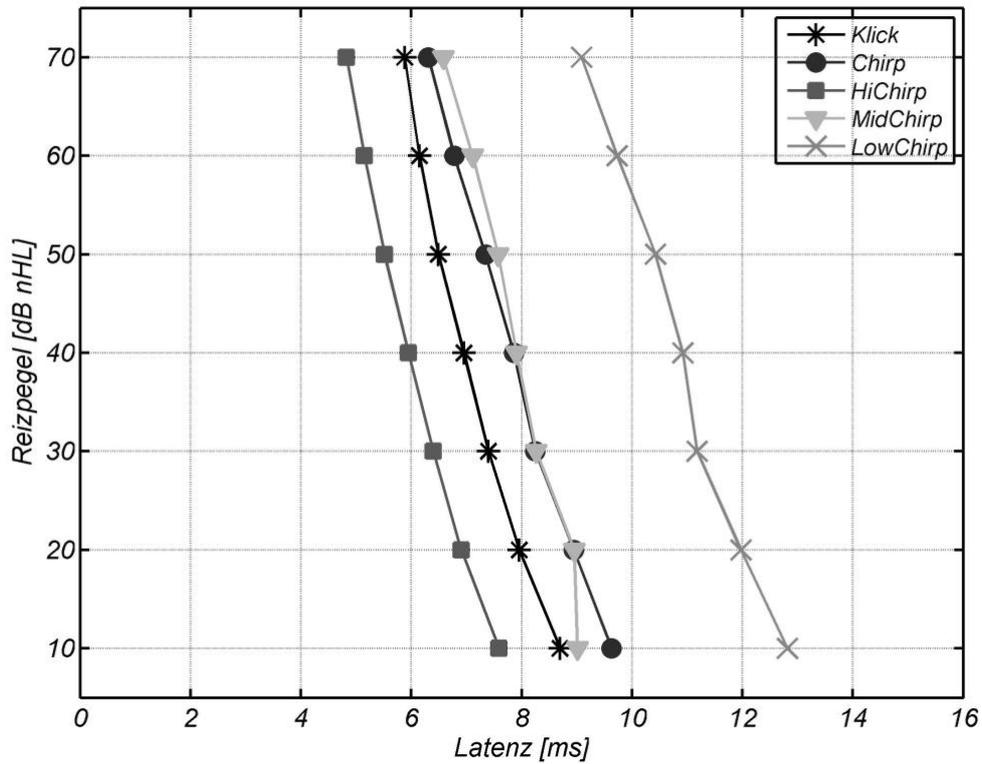


Abbildung 27: Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit dem Einsteckhörer (Insert) für die verschiedenen Stimuli

Wie auch bei Reizgabe mit den anderen Wandlern, zeigen sich die kürzesten Latenzzeiten beim Hi-Chirp. Extrem lange Latenzen ergeben sich beim Low-Chirp.

Zwischen fast allen Gruppen zeigt sich in der Varianzanalyse ein signifikanter Unterschied, außer zwischen Mid-Chirp und Chirp bei 50-20 dB und zwischen Klick und Mid-Chirp bei 10 dB (siehe Anhang: Tabelle 34 und Tabelle 35).

## 5.2.2 Amplitudenverhalten der Welle V

### 5.2.2.1 Vergleich Schallwandler

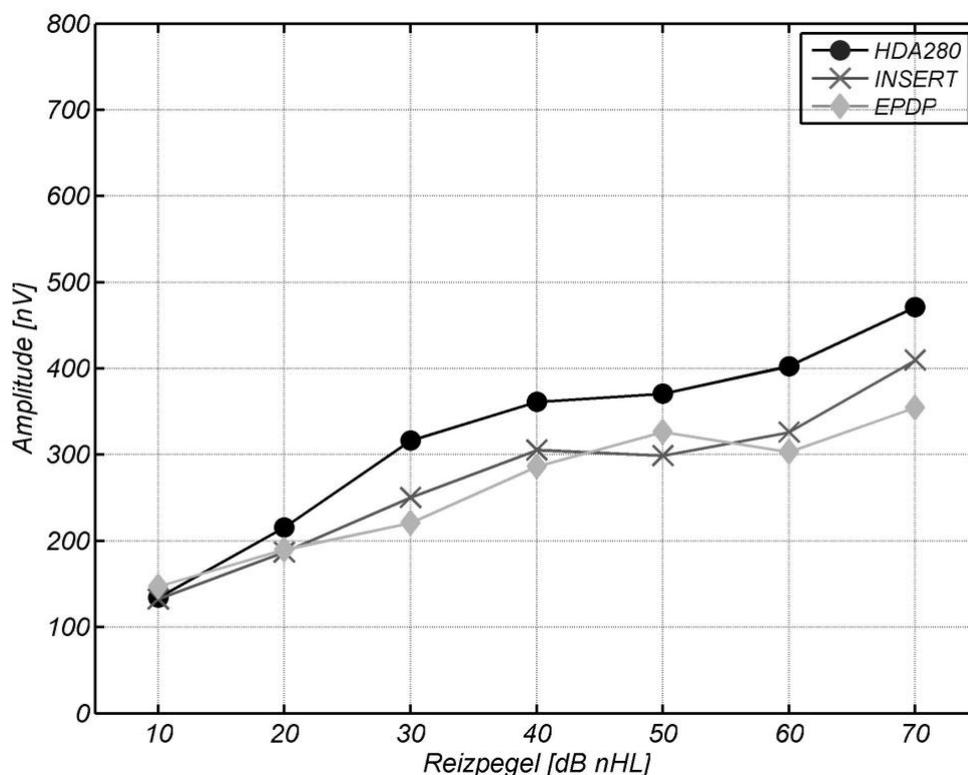


Abbildung 28: Amplitudenverhalte der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Klick-Reiz

Abbildung 28 stellt die Amplitude der Welle V in der beschriebenen Abhängigkeit dar. In der Varianzanalyse (siehe Anhang: Tabelle 11) ergeben sich bei 70 dB, 60 dB, 40 dB und 30 dB signifikante Unterschiede in den Amplituden bei den verschiedenen Schallwandlern. Es zeigt sich im Post-hoc Test (siehe Anhang: Tabelle 12), dass bei 70 dB, 60 dB, 40 dB und 30 dB ein signifikanter Unterschied zwischen den Amplituden beim Kopfhörer und bei der Sonde besteht, bei 60 dB und 30 dB zusätzlich beim Kopfhörer und beim Einsteckhörer.

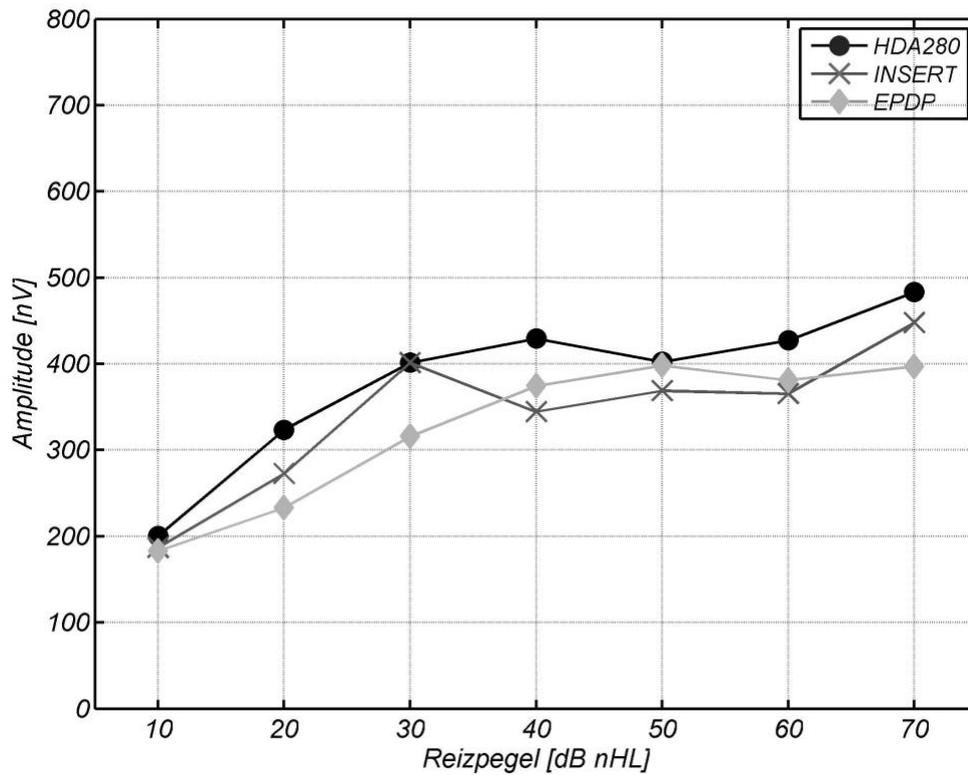


Abbildung 29: Amplitudenverhalten der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Chirp

In Abbildung 29 ist die Amplitude der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Chirp-Reiz dargestellt. In der Varianzanalyse und dem zugehörigen Post-hoc Test (siehe Anhang: Tabelle 13 und Tabelle 14) zeigt sich eine Signifikanz beim Reizpegel von 20 dB zwischen dem Kopfhörer und der Sonde.

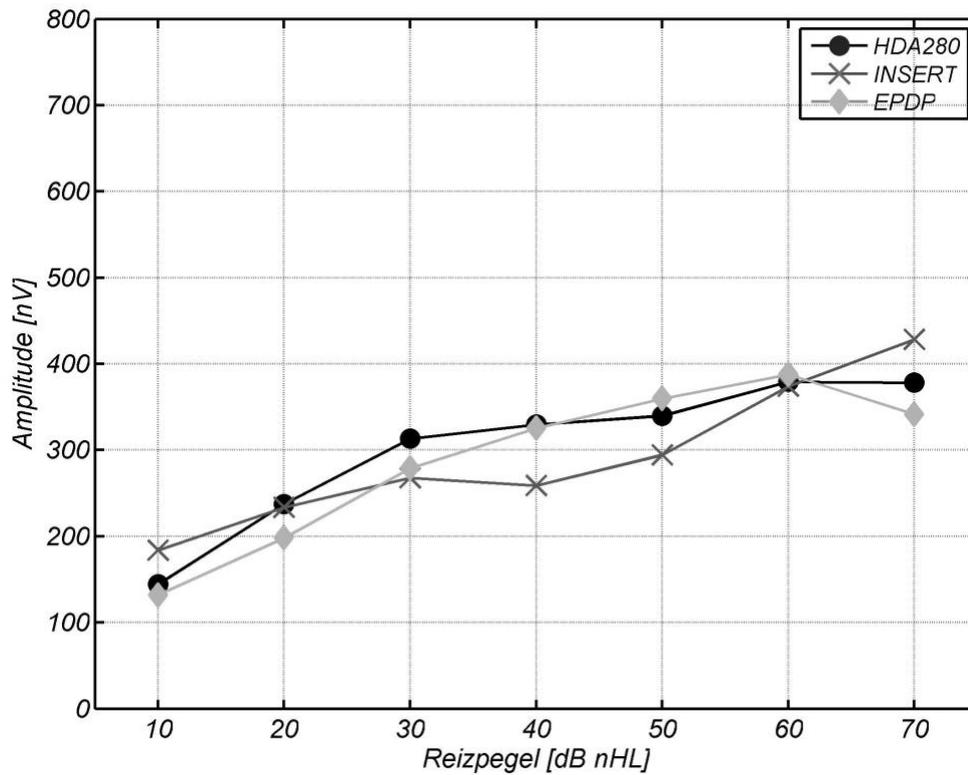


Abbildung 30: Amplitudenverhalten der Welle V bei Reizgabe über Kopfhörer HDA 280, Einsteckhörern (Insert) und der Sonde (EPDP) im Falle des Hi-Chirps

Die Abbildung 30 stellt die Amplitude der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Hi-Chirp-Reiz dar. In der Varianzanalyse mit Post-hoc Test (siehe Anhang: Tabelle 18 und Tabelle 19) zeigt sich ein signifikanter Unterschied bei 70 dB zwischen dem Einsteckhörer und der Sonde.

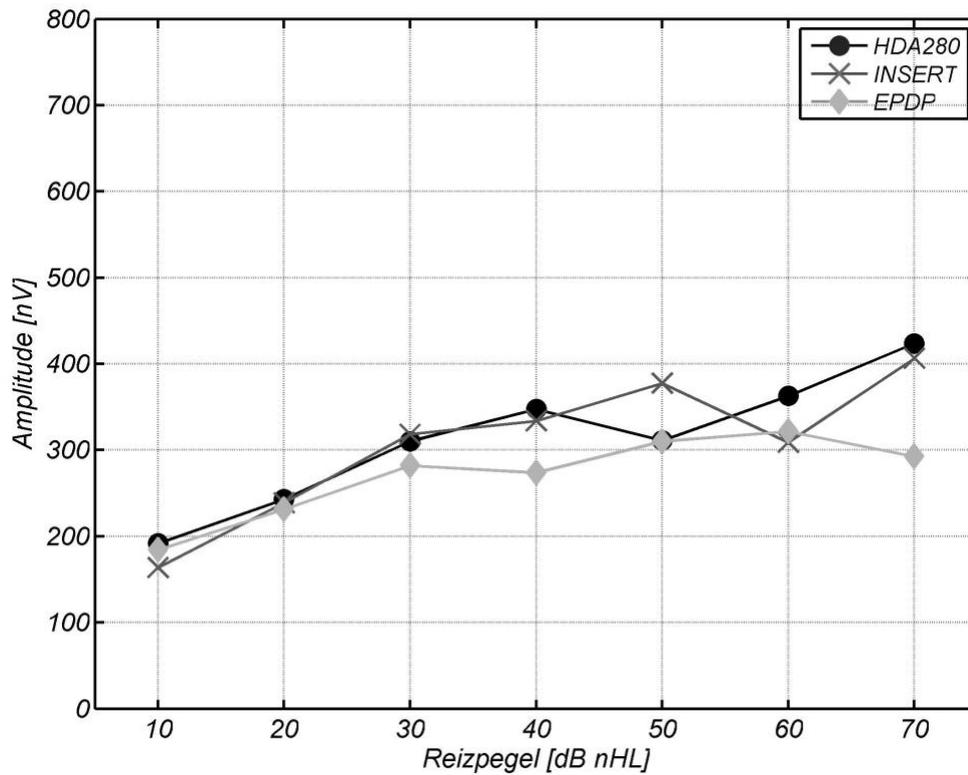


Abbildung 31: Amplitudenverhalten der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Low-Chirp

Die Abbildung 31 stellt die Amplitude der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Low-Chirp-Reiz dar. In der Varianzanalyse (siehe Anhang: Tabelle 15) zeigt sich bei 70 dB ein signifikanter Unterschied der Amplituden bei allen Gruppen. Es ergibt sich im Post-hoc Test (siehe Anhang: Tabelle 16), dass diese Signifikanz zwischen dem Kopfhörer und der Sonde und zwischen der Sonde und den Einsteckhörer besteht.

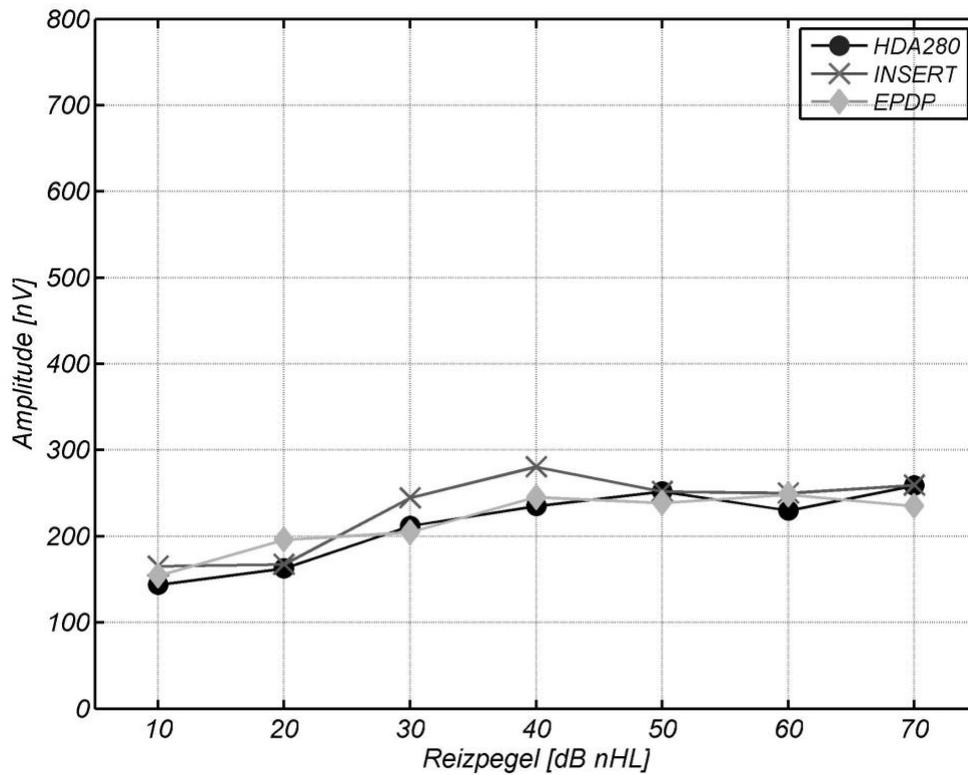


Abbildung 32: Amplituden-Verhalten der Welle V bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA 280, Einsteckhörern (Insert) und der Sonde (EPDP) im Falle des Mid-Chirps

Abbildung 32 zeigt die Amplitude der Welle V in Abhängigkeit vom Reizpegel für die verschiedenen Wandler nach Reizgabe mit dem Mid-Chirp-Reiz abgebildet. In der Varianzanalyse (siehe Anhang Tabelle 17) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

### 5.2.2.2 Vergleich Stimuli

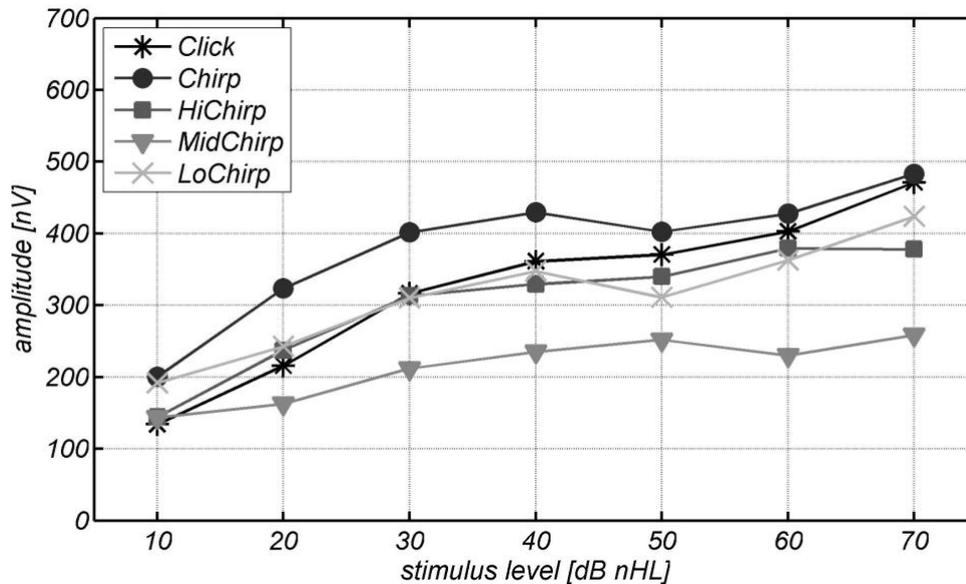


Abbildung 33: Vergleich der Amplitude der Welle V für die verschiedenen Stimuli bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA 280

Die Abbildung 33 vergleicht die Amplitude der Welle V für die verschiedenen Stimuli bei Reizgabe mit dem Kopfhörer HDA 280. Es stellt sich heraus, dass beim Mid-Chirp die kleinste Amplitude auftritt. Der Chirp generiert dagegen die größten Amplituden. Beim Klick, Low- und Hi-Chirp ergeben sich ähnliche Amplituden. Die entsprechenden Analysen mit den Wandlern Einsteckhörer und Sonde ergeben ein ähnliches Bild, sodass zur Wahrung der Übersichtlichkeit nur dieses exemplarisch gezeigt wird.

In den Varianzanalysen (siehe Anhang: Tabelle 32, Tabelle 36 und Tabelle 40) ergeben sich jeweils für alle Reizpegel ein signifikanter Unterschied in den Amplitudenwerten bei den verschiedenen Stimuli. Den Post-hoc Tests (siehe Anhang: Tabelle 33, Tabelle 37 und Tabelle 40) kann entnommen werden, zwischen welchen diese Signifikanz jeweils besteht.

### 5.3 Fallbeispiel Patient mit cochleärer Hochtenschwerhörigkeit

Im folgenden Kapitel werden die Testergebnisse eines Patienten mit cochleärer Hochtenschwerhörigkeit vorgestellt.

Das Tonschwellenaudiogramm des Patienten zeigt bei tiefen Frequenzen eine nahezu normale Schwelle, bei hohen Frequenzen liegt hingegen ein deutlicher Hörverlust vor (siehe Abbildung 34).

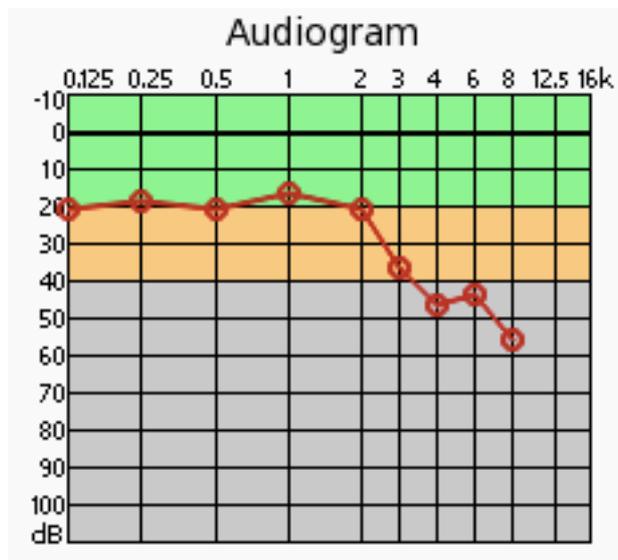
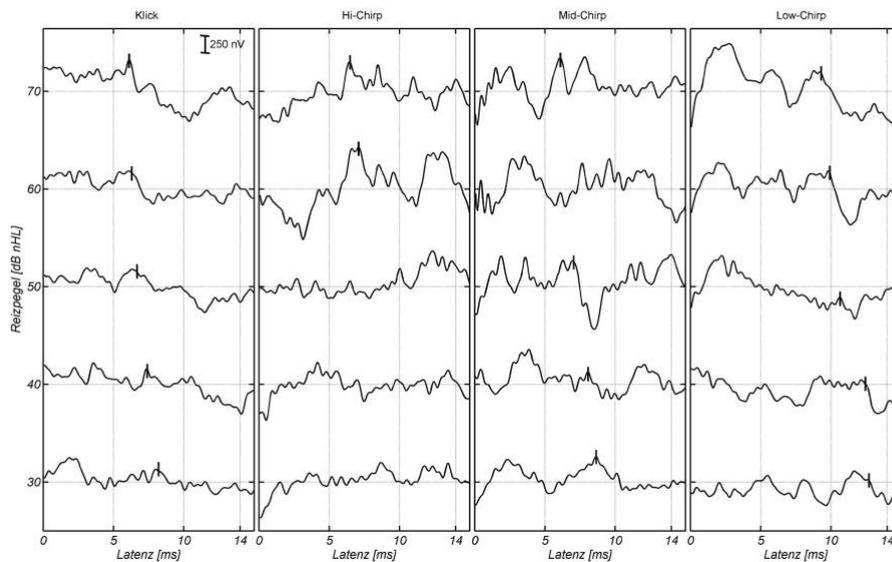


Abbildung 34: Audiogramm des Patienten mit Hochtenschwerhörigkeit

Die Abbildung 35 zeigt die FAEP eines Patienten mit Hochtenschwerhörigkeit. Die Reizgabe erfolgte über den Kopfhörer HDA 280 bei Schallpegeln von 70 dB, 60 dB, 50 dB, 40 dB und 30 dB. Auf die Messung bei den Pegeln 20 dB und 10 dB wurde verzichtet, um die Messzeit nicht zu lange zu gestalten. Eine zweite Messung konnte daher entfallen.

Es fällt auf, dass bei den Stimuli Klick, Mid-Chirp und Low-Chirp die Welle V bei Reizpegeln bis zu 30 dB nachweisbar war. Beim Hi-Chirp konnten FAEP nur bei den Pegeln 70 und 60 dB ausgelöst werden.



**Abbildung 35: FAEP Patient mit Hochtenschwerhörigkeit**

Beim Klick ergab sich für die Latenz der Welle V bei einem Schallpegel von 70 dB ein Wert von 6,125 ms, bei 60 dB 6,188 ms, bei 50 dB 6,625 ms, bei 40 dB 7,438 ms und bei 30 dB 8,188 ms.

Beim Hi-Chirp hatte die Welle V bei einem Schallpegel von 70 dB eine Latenz von 6,438 ms, bei 60 dB eine Latenz von 7,125 ms. Bei niedrigeren Schallpegeln war die Welle V nicht zu identifizieren.

Beim Mid-Chirp betrug die Latenz der Welle V bei 70 dB 6,063 ms, bei 50 dB 7,000 ms, bei 40 dB 8,063 ms und bei 30 dB 8,688 ms. Bei 60 dB war keine Welle V mehr identifizierbar.

Beim Low-Chirp ergab sich bei einem Schallpegel von 70 dB eine Latenz der Welle V von 9,313 ms. Bei 60 dB betrug die Latenz der Welle V 9,875 ms, bei 50 dB 10,690 ms, bei 40 dB 12,440 und bei 30 dB 12,880 ms.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

### 6.1 Diskussion des Fallbeispiels normalhörender Proband

Im Abschnitt 5.1 *Fallbeispiel normalhörender Proband* werden die Ergebnisse eines normalhörenden Probanden exemplarisch dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen sich wie erwartet. Für die verschiedenen Stimuli lassen sich mit unterschiedlichen Schallwandlern frühe akustisch evozierte Potentiale ableiten. Es ist somit möglich, mit dieser Methode ein normales Hörvermögen zu verifizieren.

### 6.2 Diskussion der Ergebnisse des Kollektivs

Bei den Ergebnissen fällt zunächst auf, dass nicht immer Messungen von allen 30 Probanden vorgelegen haben. Der Grund für eine geringere Probandenanzahl als 30 liegt darin, dass bei diesen Probanden in der jeweiligen Messung nicht in allen Reizstufen Potentiale abgeleitet werden konnten. Dies kann beispielsweise durch eine zu hohe muskuläre Spannung in der Kiefer- und Nackenmuskulatur bedingt sein, die die Ableitung der evozierten Potentiale elektrisch stören kann. Um dies bei weiteren Studien oder der Anwendung im klinischen Alltag zu umgehen, könnte eine an die Probanden angepasste, medikamentöse Sedierung verwendet werden, wie dies beispielsweise in einer Studie von Levit et al. (2018) angewandt worden ist, wobei jedoch immer die Verhältnismäßigkeit zu bedenken ist und gegebenenfalls eine erweiterte Aufklärung der Patienten oder Probanden erfolgen muss. Zudem ist eine entsprechende medizinische Expertise zur Durchführung vorauszusetzen sowie das Vorhalten einer möglicherweise benötigten Notfallausrüstung (DGAI, 2011).

Für den Stimulus **Klick** ist die Anzahl der gültigen Werte für Latenzzeit und Amplitude bei allen Schallgebern bei den Reizstufen von 70 dB bis 30 dB nahezu maximal. Damit ist das Messergebnis für alle Schallgeber zufriedenstellend. Durch Reizgabe mittels Kopfhörer sowie Einsteckhörer kann bei den niedrigen Reizpegeln (20 dB und 10 dB) eine höhere Prozentzahl gültiger Werte beobachtet werden als mittels der Sonde. In der Varianzanalyse mit Post-hoc-Test ergibt sich für die Latenzzeiten zudem über alle Reizpegelstärken ein signifikanter Unterschied zwischen Kopfhörer und Sonde, bei 10 dB nHL

zusätzlich zwischen Einsteckhörer und Sonde (*siehe Anhang: Tabelle 20 und Tabelle 21*). Beim Vergleich des Amplitudenverhaltens für die verschiedenen Wandler zeigt sich in der Varianzanalyse und im Post-hoc-Test (*siehe Anhang: Tabelle 11 und Tabelle 12*), dass bei den Reizpegeln 70 dB, 60 dB, 40 dB und 30 dB ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten für Kopfhörer und Sonde besteht, bei 60 dB und 30 dB zusätzlich zwischen den Werten für Kopfhörer und Einsteckhörer. Dies wirft die Frage auf, ob die Sonde insbesondere bei niedrigen Schallpegeln eine zuverlässige Ausgabe der akustischen Reize gewährleistet und ob möglicherweise eine Abhängigkeit von der Positionierung der Sonde im Gehörgang besteht. Man könnte beispielsweise den Schallpegel der Sonde und die individuelle Positionierung im Gehörgang überprüfen.

Der Stimulus **Chirp** löst bei den Pegeln von 70 dB bis 20 dB mit allen Schallgebern Potentiale mit maximalen Amplituden aus. Die gültigen Werte liegen nahezu bei 100 %. Ebenso sind die gültigen Werte beim Stimulus Hi-Chirp bei annähernd 100 % bei den Reizpegeln von 70 dB bis 30 dB. Die Ergebnisse sind damit mit denen des Klick- und des Breitband-Chirp-Reizes vergleichbar. Diese Reize lösen damit sehr stabile Potentialantworten aus. Bei der Betrachtung der Latenzzeiten ergibt sich in der Varianzanalyse mit anschließendem Post-hoc-Test ein signifikanter Unterschied bei den Reizpegeln 70, 40 und 20 dB zwischen Kopfhörer und Sonde, sowie bei 60, 50 und 30 dB zwischen allen drei Schallgebern (*siehe Anhang: Tabelle 22 sowie Tabelle 23*). Bezüglich der Amplitude ergibt sich für den Chirp-Reiz in der Varianzanalyse mit dem Post-hoc Test (*siehe Anhang: Tabelle 13 und Tabelle 14*) ein signifikanter Unterschied beim Reizpegel von 20 dB im Falle des Kopfhörers und der Sonde.

Vergleicht man die Latenzzeit der mit dem Breitband-Chirp mit denen der Studie von Elberling und Don (2010), in der auch ein Breitband-Chirp (CE-Chirp) verwendet wurde, so zeigt sich, dass die in der vorliegenden Untersuchung beobachtete Latenzzeit einen größeren Wert aufweist, als es in der genannten Studie der Fall war. Die jeweiligen Durchschnittswerte sind der *Tabelle 6: Ergebnisse Kollektiv - Stimulus Chirp* zu entnehmen. Dabei ist zu

berücksichtigen, dass in der Studie von Elberling und Don (2010) der Start der Messung der Latenzzeit 1,72 ms später begonnen wurde als in der vorliegenden Untersuchung. Daher sind in der *Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Latenzzeiten des Breitband-Chirps und des CE-Chirps nach Eberling und Dau (2010)* die angepassten Werte des CE-Chirps aufgeführt.

**Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Latenzzeiten des Breitband-Chirps und des CE-Chirps nach Eberling und Dau (2010)**

| <b>dB</b>  | <b>60</b> | <b>40</b> | <b>30</b> | <b>20</b> | <b>10</b> |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CE-Chirp   | 3,96 ms   | 5,17 ms   | 5,79 ms   | 6,42 ms   | 7,01 ms   |
| Angepasste Werte CE-Chirp (+1,72ms)                | 5,68 ms   | 6,89 ms   | 7,51 ms   | 8,14 ms   | 8,73 ms   |
| Breitband-Chirp (HDA 280)                          | 6,53 ms   | 7,72 ms   | 8,00 ms   | 8,71 ms   | 9,53 ms   |
| Differenz angepasster CE-Chirp und Breitband-Chirp | 0,85 ms   | 0,83 ms   | 0,49 ms   | 0,51 ms   | 0,8 ms    |

Die Gründe für diesen Sachverhalt könnten in der Wahl eines unterschiedlichen Cochlea-Modells liegen. So wurde in der vorliegenden Untersuchung das Modell „Don 2“ (Elberling et al., 2010) verwendet, wohingegen von Elberling und Don (2010) das Modell „Don-Chirp“ (Elberling et al., 2007) verwendet worden ist. Außerdem wurden die Reize in den verschiedenen Studien jeweils unterschiedlich kalibriert. So wurde der Reiz bei Elberling und Don (2010) mittels eines Kupplers an 25 Normalhörenden kalibriert, in der vorliegenden Studie, wie oben genauer aufgeführt, an 26 normalhörenden Probanden. Darüber hinaus wurde in der Untersuchung von Elberling und Don (2010) zur Ausgabe der Reize ein anderer Schallgeber (Elberling ER3-A insert earphone) verwendet.

Der Vergleich der absoluten Amplitudenwerte zeigt, dass die größten Potentialamplituden bei der Stimulation mit dem Chirp hervorgerufen wurden. Die Ursache für diesen Sachverhalt ist wahrscheinlich auf die Konstruktion der Stimuli zurückzuführen. Der Chirp zeigt hohe Amplitudenwerte, da er so konstruiert ist, dass zunächst tiefe, dann mittlere und zuletzt hohe Frequenzen ausgegeben werden. Entsprechend der Anatomie der Cochlea, werden

letztendlich mehrere Bereiche der Cochlea gleichzeitig angeregt, da die tieferen Frequenzen eine längere Laufzeit auf der Basilarmembran entlang der Cochlea benötigen als bei den hohen Frequenzen der Fall ist (Dau et al., 2000). In der bereits genannte Studie von Stuart und Cobb (2014) wurde ebenso gezeigt, dass Breitband-Chirp-Stimuli bei Neugeborenen größere Amplituden der Welle V generieren als Klick-Stimuli.

Ein weiterer Vorteil des Chirp-Reizes ist ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis, was letztendlich die Testzeit im Vergleich zu Messungen mit dem Klick-Stimulus reduziert (Elberling, Don, Cebulla, & Sturzebecher, 2007).

Diese Verminderung der Testzeit wurde auch durch eine Studie von Stuart und Cobb (2014) belegt, welche die akustisch evozierten Potentiale einmal ausgelöst durch Breitband-Chirp-Reize und zum anderen ausgelöst durch Klick-Stimuli miteinander verglichen hat. Dabei wurde gezeigt, dass die Breitband-Chirp-Reize im Vergleich zu den Klick-Reizen Potentiale mit signifikant größerer Amplitudenantwort ausgelöst haben. Zudem waren die Testzeiten kürzer.

Bei den Ergebnissen der Stimulation mit dem **Low-Chirp** fällt auf, dass im Vergleich zum Klick und Chirp vor allem bei Stimulation mit der Sonde sowohl weniger gültige Antworten generiert werden konnten als auch weniger Probanden überhaupt valide Potentiale gezeigt haben. Außerdem ist nennenswert, dass die Latenzzeiten bei den hohen Reizpegeln (70 dB bis 50 dB) eine auffallend hohe Standardabweichung aufweisen. In der Varianzanalyse mit dem Post-hoc-Test ergeben sich für die Latenz signifikante Unterschiede bei Reizpegeln zwischen 70 und 50 dB nHL jeweils bei Stimulation mit Kopfhörer und Sonde, bei 70 und 60 dB zusätzlich zwischen Einsteckhörer und Sonde (*siehe Anhang: Tabelle 24 und Tabelle 25*). Bei Betrachtung der Amplitude ergibt sich in der Varianzanalyse mit dem Post-hoc-Test (*siehe Anhang: Tabelle 15 und Tabelle 16*), bei Reizpegeln von 70 dB ein signifikanter Unterschied zwischen den mit dem Kopfhörer und der Sonde und den mit der Sonde und den Einsteckhörern ausgelösten Potentialen.

Eine Ursache könnte in der basalen Miterregung liegen, die nicht ausreichend durch die Maskierung ausgeschaltet werden konnte. Folgeuntersuchungen, bei denen die Maskierung individuell noch besser anzupassen ist, sind notwendig um weiterführende valide Ergebnisse zu erhalten.

Bei der Stimulation mit dem **Mittelfrequenz-Chirp** ist bemerkenswert, dass zum einen bei weniger Probanden valide Reizantworten aufgetreten sind im Vergleich zum Klick und Breitband-Chirp und zum anderen die gültigen Werte, also die Anzahl der verwertbaren Potentialantworten, geringer ausfallen sind als es bei den Klick- und Chirp-Stimuli der Fall war. Daneben fällt eine hohe Standardabweichung bei den Reizpegeln von 70 dB bis 50 dB auf. Der Grund für diesen Sachverhalt könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Mittelfrequenz-Chirp-Reiz nur einen kleinen Frequenzbereich von 1000 Hz bis 3000 Hz umfasst und damit weniger Nervenfasern an der Potentialgenerierung beteiligt sind (*siehe 2.1.4 Informationsverarbeitung im ZNS*). In weiteren Untersuchungen sollte eine Verlängerung der Testzeit in Erwägung gezogen werden, um dadurch eine bessere Artefaktunterdrückung zu erreichen (*siehe 4.2.5 Ableitparameter*).

Im Vergleich der Latenzen ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen Kopfhörer und Sonde bei den Pegeln 60 dB – 40 dB, bei 60 dB zusätzlich bei Einsteckhörer und Sonde (*siehe Anhang: Tabelle 26 und Tabelle 27*). In der Varianzanalyse der Amplitudenwerte (*siehe Anhang: Tabelle 17*) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Im Vergleich der absoluten Amplitudenwerte zeigt sich, dass Potentiale mit den geringsten Amplitudenwerten bei Stimulation mit dem Mid-Chirp hervorgerufen werden. Dies begründet sich ebenfalls in der Konstruktion des Chirp-Reizes mit der geringeren Frequenzbandbreite (wie bereits beschrieben). Dadurch werden nur wenige Bereiche der Cochlea angeregt, was letztendlich zu kleineren Potentialamplituden führt.

Beim **Hochfrequenz-Chirp** ergibt sich für die Latenzzeit in der Varianzanalyse mit dem Post-hoc-Test ein Unterschied bei allen Reizpegeln, dies sowohl beim Vergleich zwischen Einsteckhörer und Sonde, bei 70 dB bis 20 dB zusätzlich beim Vergleich zwischen Kopfhörer und Sonde (*siehe Anhang: Tabelle 28 sowie*

*Tabelle 29*). Auffällig ist eine verlängerte Latenz von etwa 0,5 ms bei allen Reizpegeln nach Reizgabe mit der Sonde.

Bei den Amplitudenwerten zeigt sich in der Varianzanalyse mit dem Post-hoc Test (*siehe Anhang: Tabelle 18 und Tabelle 19*) lediglich beim Reizpegel von 70 dB ein signifikanter Unterschied der Potentialamplituden im Falle des Einsteckhörers und der Sonde.

Vergleicht man das Pegel-Latenz-Verhalten der Welle V bei den verschiedenen Wandlern, ergibt sich in der Varianzanalyse jeweils ein signifikanter Unterschied bei allen Reizpegeln (*siehe Anhang: Tabelle 30, Tabelle 34 und Tabelle 38*). Im Post-hoc-Test (*siehe Anhang: Tabelle 31, Tabelle 35 und Tabelle 39*) zeigt sich dieser Unterschied zwischen allen Gruppen, mit Ausnahme der Gruppen Chirp und Mid-Chirp, hier zeigt sich bei der Sonde (alle Reizpegel), beim Einsteckhörer (zwischen den Reizpegeln 50 dB und 20 dB) und beim Kopfhörer (zwischen den Reizpegeln 40 und 20 dB) jeweils kein signifikanter Unterschied. Zusätzlich zeigte sich bei 10 dB kein signifikanter Unterschied zwischen Klick und Mid-Chirp (bei Ausgabe durch den Kopfhörer) und zwischen Klick und Mid-Chirp (bei Ausgabe durch die Einsteckhörer). Da sich die Latenzzeiten in Abhängigkeit des Reizgebers zum Teil signifikant unterscheiden, ist es essentiell, für jeden Schallwandler eine separate Bestimmung der normativen Werte durchzuführen, da eine Übernahme der ermittelten Werte auf andere Wandler zu keinen validen Ergebnissen führen würde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beim Verwenden von Kopfhörer und Einsteckhörer bei allen Stimuli ein annähernd ähnliches Latenzverhalten der Welle V auftritt. Auffällig hingegen ist die bei fast allen Stimuli auftretende Verlängerung der Latenzzeit bei Präsentation der Stimuli mittels Sonde.

Eine mögliche Erklärung hierfür kann der Frequenzgang der Sonde sein, der bedingt, dass vor allem der tieffrequente Tonbereich nicht so gut wiedergegeben werden kann wie dies der Kopfhörer und die Einsteckhörer vermögen. Ein weiteres Problem der Sonde besteht darin, dass diese vor jeder Testung individuell kalibriert wird und somit kein nachweislich einheitlicher Schallpegel

ausgegeben wird, beispielsweise bei nachträglicher Veränderung der ursprünglichen Position durch bewusste oder unbewusste Muskelaktivität. Es besteht somit die Möglichkeit, dass bei den Messungen mit der Sode nicht die am Gerät eingestellten Schallpegel verwendet worden sind, sondern systematisch, bei allen Probanden, ein zu geringer Reizpegel appliziert wurde.

Im Hinblick auf Verwendung verschiedener Schallwandler lässt sich festhalten, dass sich die Latenz der mit dem Hi-Chirp ausgelösten Potentiale bei allen Schallgebern am kürzesten darstellt, darauf folgt die Latenz der mit dem Klick-Stimulus ausgelösten Potentiale. Ebenso weist die Latenz der mit dem Low-Chirp ausgelösten Potentiale bei allen verwendeten Schallwandlern den größten Latenzwert auf. Die Latenzen der mit den Stimuli Mid-Chirp und Chirp ausgelösten Potentiale weisen bei den meisten Schallgebern ähnliche Werte auf.

Zusammengefasst zeigt sich, dass bei allen Schallwandlern für alle Reizpegel der Hi-Chirp Potentiale mit den kürzesten Latenzen und der Low-Chirp Potentiale mit den längsten Latenzen generiert. Die Differenz der Latenzen beim Low-Chirp und beim Hi-Chirp beträgt circa 5 ms. Das ist mit der tonotopen Abbildung der Tonfrequenz auf der Basalmembran zu erklären. Hohe Frequenzen werden an der Schneckenbasis abgebildet, tiefe Frequenzen an der Schneckenspitze. Demzufolge lässt sich die längere Latenz der mit dem Low-Chirp ausgelösten Potentiale mit der längeren Laufzeit auf der Basilmembran erklären.

Eine Studie von Stuart und Cobb (2014) haben die Latenzzeiten der Welle V der akustisch evozierten Potentiale einmal ausgelöst durch Breitband-Chirp-Reize und zum anderen ausgelöst durch den Klick-Stimulus miteinander verglichen. Dabei wurde gezeigt, dass die Breitband-Chirp-Reize im Vergleich zu den Klick-Reizen eine signifikant verlängerte Welle-V-Latenz hervorrufen. Dies entspricht dem in dieser Studie eruierten Sachverhalt.

Der Vergleich der Amplitude der Welle V für die verschiedenen Stimuli zeigt in den Varianzanalysen (*siehe Anhang: Tabelle 32, Tabelle 36 und Tabelle 40*) jeweils für alle Reizpegel einen signifikanten Unterschied. Den Post-hoc Tests (*siehe Anhang: Tabelle 33, Tabelle 37 und Tabelle 41*) kann entnommen werden,

zwischen welchen diese Signifikanz jeweils besteht. Zusammenfassend lässt sich daher auch bezüglich der Festlegung der Referenzbereiche hinsichtlich der Potentialamplitude festhalten, dass eine entsprechende Testreihe mit normalhörenden Probanden spezifisch für jeden eingesetzten Schallwandler durchzuführen ist.

### **6.3 Diskussion des Fallbeispiels Patient mit Hochtonschwerhörigkeit**

Es zeigt sich, dass in dem Fallbeispiel die Welle V der FAEP für die Reize Klick, Mid-Chirp und Low-Chirp jeweils bis zu einem Reizpegel von 30 dB nachgewiesen werden kann. Beim Hi-Chirp-Stimulus konnte die Welle V der FAEP nur bei den Pegeln 70 dB und 60 dB nachgewiesen werden, bei den niedrigeren Schallpegeln war eine Welle V nicht erkennbar.

Das lässt darauf schließen, dass das Hörvermögen des Patienten in hohen Frequenzbereichen ab einem Schallpegel 50 dB eingeschränkt ist, was durch die Messung der Hörschwelle mit Hilfe des Tonschwellenaudiogramms so auch bestätigt worden ist.

Bei der Testung mit dem Reiz Mid-Chirp fällt auf, dass beim Reizpegel von 60 dB keine Welle V identifizierbar war. Bei den geringeren Schallpegeln von 50 dB, 40 dB und 30 dB war dies jedoch wieder möglich. Es liegt also nahe, dass dies einer technischen Ursache geschuldet und nicht das Hörvermögen des Probanden ursächlich ist. Beispielsweise könnten Interferenzen durch das Anspannen der Nacken- oder Kiefermuskulatur vorgelegen haben, die die Messung in diesem Moment gestört haben. Für eine weiterführende klinische Untersuchung könnten Maßnahmen wie Sedierung oder Wiederholung der Testreihe, wie unter *6.2 Diskussion der Ergebnisse des Kollektivs* aufgezeigt, eingesetzt werden.

Es lässt sich also feststellen, dass mit Hilfe der mit verschiedenen Stimuli ausgelösten FAEP eine Aussage über das Hörvermögen des Patienten möglich ist.

### **6.4 Klinische Relevanz**

Um die Frage nach der klinischen Relevanz zu beantworten, sind mehrere Aspekte in Erwägung zu ziehen.

Zum einen ist festzuhalten, dass die Messung der FAEP eine längere Zeit in Anspruch nimmt als andere Messmethoden, wie beispielsweise das klassische Bestimmen der Hörschwelle mittels subjektiver Hörtests. Außerdem ist zur Auswertung die Kenntnis der Kurvenverläufe und damit entsprechend ausgebildetes Personal nötig. Eine automatische Aussage über das Hörvermögen ist daher nicht machbar (Unlu, I. Guclu, E. & Yaman, H., 2014).

Zum anderen besteht jedoch der Vorteil, dass es sich bei dem Verfahren der Hörschwellenbestimmung mit FAEP um einen objektiven Hörtest handelt, der ohne die Mitwirkung der getesteten Person das Hörvermögen erfassen kann. Darüber hinaus ist es mit den frequenzspezifischen Chirp-Stimuli möglich, das Hörvermögen auch frequenzspezifisch zu bestimmen. So wurde in einer Studie des *Children's Hospital of Fudan University* an 68 Säuglingen mit beidseitig geringem bis ausgeprägtem Hörverlust die Aussagekraft von frequenzspezifischen akustisch evozierten Potentialen mit der subjektiven Bestimmung des Hörverlustes mittels der visuell konditionierten Audiometrie verglichen. Hier zeigte sich, dass sich insbesondere bei ausgeprägter Schwerhörigkeit das Ausmaß der Schwerhörigkeit mit Hilfe der akustisch evozierten Potentiale besser abschätzen lässt, als es mit der subjektiven Methode der Fall ist, vor allem bei tiefen und mittleren Frequenzen (Xu, Z. Cheng, W. & Yao, Z., 2014).

Insbesondere bei der Hördiagnostik mit dem Ziel einer Cochlea-Implantat-Versorgung bei Kindern ist die präzise Erfassung der Hörstörung auf objektiver Basis unverzichtbar, sodass die Methode der Erfassung der frühen evozierten Potentiale einen festen Stellenwert in der Untersuchung der Patienten hat. Des Weiteren ist diese ein wichtiger Bestandteil bei postoperativer Reevaluation (Shehata-Dieler, W. & Großmann, W., 2017).

Bei der Frage nach der Auswahl des Schallgebers ist zu bedenken, dass sich sowohl die Latenzzeiten, als auch die Amplitudenwerte in Abhängigkeit des Reizgebers zum Teil signifikant unterscheiden. Somit besteht die Notwendigkeit, für jeden Schallwandler eine separate Bestimmung der normativen Werte der

Reize durchzuführen, da eine Übernahme der ermittelten Werte auf einen anderen Wandler nicht zwingend zu validen Ergebnisse führen würde.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Methode der mit frequenzspezifischen Chirp-Reizen ausgelösten FAEP eine sehr gute Möglichkeit bietet, das Hörvermögen frequenzspezifisch und objektiv zu erfassen.

## 7. Fazit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit hat neben der Kalibrierung der Reize darin bestanden, zum einen eine Aussage über den Einfluss des Schallwandlers auf die Reizantwort der frühen akustisch evozierten Potentiale zu treffen und zum anderen Normdaten für Latenz und Amplitude für die einzelnen Stimuli zu erstellen.

Die in dieser Arbeit vorgelegten Normdaten - vor allem bezüglich der Latenz der Welle V der frühen akustisch evozierten Potentiale ausgelöst mit verschiedenen frequenzspezifischen Stimuli - können einen Beitrag zur Etablierung eines objektiven Hörtest leisten, der eine weiterführende Aussage über den Frequenzbereich der Hörstörung treffen kann.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Präsentation der Reize über Kopfhörer und Einsteckhörer die besten Reizantworten hervorgerufen hat. Jedoch ist zu bedenken, dass die einfache Übertragung der erhobenen Daten auf beliebige Schallgeber nicht möglich ist, da sich die erhobenen Ergebnisse für Latenzzeit und Amplitude in Abhängigkeit des verwendeten Schallwandler teils signifikant unterscheiden. Somit erscheint eine erneute Bestimmung der Referenzwerte für jeden Schallwandler notwendig zu sein. Hierfür können die erhobenen Referenzwerte für die verwendeten Schallwandler zum Vergleich herangezogen werden.

Anhand eines Fallbeispiels eines Patienten mit Hochtonschwerhörigkeit konnte gezeigt werden, dass mittels der mit frequenzspezifischen Reizen ausgelösten frühen akustisch evozierten Potentialen eine objektive Einschätzung einer Hörstörung möglich ist.

## 8. Literaturverzeichnis

- Allen, J. B. (1980). Cochlear micromechanics--a physical model of transduction. *J Acoust Soc Am*, 68(6), 1660-1670.
- Balfour, P. B., Pillion, J. P., & Gaskin, A. E. (1998). Distortion product otoacoustic emission and auditory brain stem response measures of pediatric sensorineural hearing loss with islands of normal sensitivity. *Ear Hear*, 19(6), 463-472.
- Bell, S. L., Allen, R., & Lutman, M. E. (2002). An investigation of the use of band-limited chirp stimuli to obtain the auditory brainstem response. *Int J Audiol*, 41(5), 271-278.
- Dallos, P. (1992). The active cochlea. *J Neurosci*, 12(12), 4575-4585.
- Dau, T., Wegner, O., Mellert, V., & Kollmeier, B. (2000). Auditory brainstem responses with optimized chirp signals compensating basilar-membrane dispersion. *J Acoustical Society of America*, 107(3), 1530-1540.
- Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie (2015). Leitlinie „Auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen (AVMS)“, 36-37.
- Elberling, C., Callo, J., & Don, M. (2010). Evaluating auditory brainstem responses to different chirp stimuli at three levels of stimulation. *J Acoust Soc Am*, 128(1), 215-223.
- Elberling, C., & Don, M. (2008). Auditory brainstem responses to a chirp stimulus designed from derived-band latencies in normal-hearing subjects. *J Acoust Soc Am*, 124(5), 3022-3037.
- Elberling, C., & Don, M. (2010). A direct approach for the design of chirp stimuli used for the recording of auditory brainstem responses. *J Acoust Soc Am*, 128(5), 2955-2964. doi: 10.1121/1.3489111
- Elberling, C., Don, M., Cebulla, M., & Sturzebecher, E. (2007). Auditory steady-state responses to chirp stimuli based on cochlear traveling wave delay. *J Acoust Soc Am*, 122(5), 2772-2785. doi: 10.1121/1.2783985
- Etymotic\_Research\_inc. Datasheet ER-3A INSERT EARPHONES for Audiometry.
- G-BA. (2008). Beschluss des Gemeinsamen Bundesausschusses über eine Änderung der Kinder-Richtlinien: Einführung eines Neugeborenen-

- Hörscreenings Vom 19. Juni 2008. *Dtsch Arztebl International*, 105(43), 2289-.
- Jacobson, J. (1985). The auditory brainstem response (pp. 301). San Diego, Calif.: College-Hill Press.
- Klinke, R. (2010). Hören und Sprechen: Kommunikation des Menschen. In R. Klinke & R. Baumann (Eds.), *Physiologie* (6., vollständig überarb. Aufl. ed., pp. 675-693). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Lenarz, T., & Boenninghaus, H.-G. (2012). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde* (14. ed.). Berlin ; Heidelberg: Springer.
- Lenhardt, E., & Janssen, T. (2009). Physiologie und Pathophysiologie des Innenohrs. In E. Lenhardt (Ed.), *Praxis der Audiometrie* (Vol. 9., pp. 35-46). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Levit, Y., Mandel, D. Matot I. (2018). "Frequency-specific auditory brainstem response testing with age-appropriate sedation." *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.*(108): 73-79.
- Mrowinski, D. (2009). ERA - Elektrische Reaktionsaudiometrie. In E. Lenhardt (Ed.), *Praxis der Audiometrie* (9. ed., pp. 203-238). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Mrowinski, D. (2011). Überhören und Vertäubung. In D. Mrowinski & G. Scholz (Eds.), *Audiometrie - Eine Anleitung für die praktische Hörprüfung* (4., aktualisierte und erw. Aufl. ed., pp. 27 - 36). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Mrowinski, D., & Scholz, G. (2011). Akustisch evozierte Potentiale (ERA). In D. Mrowinski & G. Scholz (Eds.), *Audiometrie - Eine Anleitung für die praktische Hörprüfung* (4., aktualisierte und erw. Aufl. ed., pp. 93 - 108). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- PATH\_medical\_GmbH. Ear Probe Data Sheet. Rev. 07.
- PATH\_medical\_GmbH. (2011). 6 ABR - How-to use. *Senti and Sentiero - HOW-TO MANUAL*, 37-49.
- PATH\_medical\_GmbH. (2015). Sentiero Advanced - The all in one instrument for OAE, ABR and Audiometry!

<http://www.pathme.de/index.php/en/products/sentiero-advanced>.

Retrieved 08.08.2015

- Rumstadt, J.W., am Zehnhoff-Dinnesen, A., A., Knief, D., Deuster, P., Matulat, K., Rosslau, & C.-M., Schmidt. (2012). Pädaudiologische Diagnostik im ersten Lebensjahr. *HNO*, 60(10), 919-926.
- Sennheiser\_electronic\_GmbH\_&\_Co.\_KG. (2003). Audiometrie-Kopfhörer-Technische Daten.
- Shehata-Dieler, W. and W. Großmann (2017). "Präoperative audiologische Evaluation und postoperative Verlaufsdiagnostik bei Cochleaimplantatversorgung - Bedeutung objektiver Testverfahren." *HNO* 65(4): 298-307.
- Stuart, A., & Cobb, K. M. (2014). Effect of stimulus and number of sweeps on the neonate auditory brainstem response. *Ear and Hearing (formerly Journal of the American Audiology Society)*, 35(5), 585-588.
- Trepel, M. (2008). *Neuroanatomie - Struktur und Funktion* (4 ed.). München [u.a.]: Elsevier, Urban & Fischer.
- Unlu, I., Guclu, E., Yaman, H. (2014). "When should automatic auditory brainstem response test be used for newborn hearing screening?" *Auris Nasus Larynx*. 2(3):199-202.
- Warren, M. P. (1989). The auditory brainstem response in pediatrics. *Otolaryngol Clin North Am*, 22(3), 473-500.
- Wegner, O., & Dau, T. (2002). Frequency specificity of chirp-evoked auditory brainstem responses. *J Acoust Soc Am*, 111(3), 1318-1329.
- Xu, Z., Cheng, WX, Yao, ZH., (2014). "Prediction of frequency-specific hearing threshold using chirp auditory brainstem response in infants with hearing losses." *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 78(5): 812-816.
- Zenner, H.-P. (1988). Motility of outer hair cells as an active, actin-mediated process. *Acta Otolaryngol*, 105(1-2), 39-44.
- Zenner, H.-P. (2010). Die Kommunikation des Menschen: Hören und Sprechen. In R. F. Schmidt (Ed.), *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie* (31., überarb. und aktualisierte Aufl. ed., pp. 315-400). Heidelberg: Springer.

## 9. Anhang

Tabelle 11: Varianzanalyse (1) der Amplitude der Welle V beim Klick in Abhängigkeit der Schallwandler

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz    | F      | Signifikanz       |
|----|-----------------------|--------------|----|------------|--------|-------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 198727,4432  | 2  | 99363,7216 | 5,1669 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1634629,92   | 85 | 19230,9402 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1833357,92   | 87 |            |        |                   |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 160779,0575  | 2  | 80389,5287 | 5,7657 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1171192,68   | 84 | 13942,77   |        |                   |
|    | Gesamt                | 1331971,738  | 86 |            |        |                   |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 77106,4138   | 2  | 38553,2069 | 2,8977 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1117599      | 84 | 13304,75   |        |                   |
|    | Gesamt                | 1194705,414  | 86 |            |        |                   |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 86882,1429   | 2  | 43441,0714 | 4,0407 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 870829,96    | 81 | 10750,9872 |        |                   |
|    | Gesamt                | 957712,1029  | 83 |            |        |                   |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 137325,4535  | 2  | 68662,7267 | 7,4953 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 760343       | 83 | 9160,759   |        |                   |
|    | Gesamt                | 897668,4535  | 85 |            |        |                   |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 13317,8356   | 2  | 6658,9178  | 1,6682 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 279422,85    | 70 | 3991,755   |        |                   |
|    | Gesamt                | 292740,6856  | 72 |            |        |                   |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 1369,2222    | 2  | 684,6111   | 0,2492 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 90645,53     | 33 | 2746,8342  |        |                   |

|  |        |            |    |  |  |  |
|--|--------|------------|----|--|--|--|
|  | Gesamt | 92014,7522 | 35 |  |  |  |
|--|--------|------------|----|--|--|--|

**Tabelle 12: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (1)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                    | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | -61                    | -147,1466   | 25,1466    | n.s.               |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -116                   | -202,1466   | -29,8534   | <b>p &gt; 0,05</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | -55                    | -141,8735   | 31,8735    | n.s.               |
| 60                       | HDA 280 vs. Insert | -77                    | -150,3675   | -3,6325    | <b>p &gt; 0,05</b> |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -100                   | -174,0307   | -25,9693   | <b>p &gt; 0,05</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | -23                    | -97,6444    | 51,6444    | n.s.               |
| 40                       | HDA 280 vs. Insert | -55                    | -120,6707   | 10,6707    | n.s.               |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -75                    | -140,6707   | -9,3293    | <b>p &gt; 0,05</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | -20                    | -87,3767    | 47,3767    | n.s.               |
| 30                       | HDA 280 vs. Insert | -66                    | -126,5177   | -5,4823    | <b>p &gt; 0,05</b> |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -95                    | -154,9845   | -35,0155   | <b>p &gt; 0,05</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | -29                    | -89,5177    | 31,5177    | n.s.               |

**Tabelle 13: Varianzanalyse (2) der Amplitude der Welle V beim Chirp-Reiz in Abhängigkeit der Schallwandler**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz    | F      | Signifikanz |
|----|-----------------------|--------------|----|------------|--------|-------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 105733,6395  | 2  | 52866,8198 | 2,9075 | n.s.        |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1509200,00   | 83 | 18183,1325 |        |             |
|    | Gesamt                | 1614933,64   | 85 |            |        |             |

|    |                       |             |    |            |        |                   |
|----|-----------------------|-------------|----|------------|--------|-------------------|
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 60454,4235  | 2  | 30227,2118 | 2,0536 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1206943,00  | 82 | 14718,8171 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1267397,424 | 84 |            |        |                   |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 19414,9882  | 2  | 9707,4941  | 0,6837 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1164352,00  | 82 | 14199,4146 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1183766,99  | 84 |            |        |                   |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 110283,8721 | 2  | 55141,936  | 4,5144 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1013826,72  | 83 | 12214,7798 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1124110,592 | 85 |            |        |                   |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 131969,4118 | 2  | 65984,7059 | 4,6752 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1157341,00  | 82 | 14113,9146 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1289310,412 | 84 |            |        |                   |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 133747,284  | 2  | 66873,642  | 6,1112 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 853538,82   | 78 | 10942,8054 |        |                   |
|    | Gesamt                | 987286,104  | 80 |            |        |                   |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 2641,4423   | 2  | 1320,7212  | 0,2657 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 243532,22   | 49 | 4970,0453  |        |                   |
|    | Gesamt                | 246173,6623 | 51 |            |        |                   |

Tabelle 14: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (2)

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |            |             |                   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------|-------------|-------------------|
|                          | Differenz          | Untergrenze            | Obergrenze | Signifikanz |                   |
| 20                       | HDA 280 vs. Insert | -51,00                 | -116,6754  | 14,6754     | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -101,00                | -170,2694  | -31,7306    | <b>P &lt; 0,5</b> |

|                 |        |           |         |      |
|-----------------|--------|-----------|---------|------|
| Insert vs. EPDP | -50,00 | -120,3348 | 20,3348 | n.s. |
|-----------------|--------|-----------|---------|------|

**Tabelle 15: Varianzanalyse (3) der Amplitude der Welle V beim Low-Chirp in Abhängigkeit der Schallwandler**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz     | F      | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|----|-------------|--------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 228715,875   | 2  | 114357,9375 | 7,0335 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1121877,00   | 69 | 16259,087   |        |                    |
|    | Gesamt                | 1350592,875  | 71 |             |        |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 40079,3514   | 2  | 20039,6757  | 1,1918 | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1193867,00   | 71 | 16815,0282  |        |                    |
|    | Gesamt                | 1233946,351  | 73 |             |        |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 69169,3239   | 2  | 34584,662   | 2,2139 | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1062252,00   | 68 | 15621,3529  |        |                    |
|    | Gesamt                | 1131421,32   | 70 |             |        |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 72279,0857   | 2  | 36139,5429  | 2,7825 | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 870215,00    | 67 | 12988,2836  |        |                    |
|    | Gesamt                | 942494,0857  | 69 |             |        |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 15916,9855   | 2  | 7958,4928   | 0,4969 | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1057056,00   | 66 | 16016       |        |                    |
|    | Gesamt                | 1072972,986  | 68 |             |        |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 1118,7925    | 2  | 559,3962    | 0,0576 | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 485633       | 50 | 9712,66     |        |                    |
|    | Gesamt                | 486751,7925  | 52 |             |        |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 3066,95      | 2  | 1533,4737   | 0,2362 | n.s.               |

|  |                       |           |    |           |  |  |
|--|-----------------------|-----------|----|-----------|--|--|
|  | Innerhalb der Gruppen | 103880,57 | 16 | 6492,5356 |  |  |
|  | Gesamt                | 106947,52 | 18 |           |  |  |

Tabelle 16: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (3)

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                    | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | -17,00                 | -102,6856   | 68,6856    | n.s.               |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -131,00                | -219,8668   | -42,1332   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | -114,00                | -205,2644   | -22,7356   | <b>p &lt; 0,05</b> |

Tabelle 17: Varianzanalyse (4) der Amplitude der Welle V beim Mid-Chirp in Abhängigkeit der Schallwandler

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz    | F      | Signifikanz |
|----|-----------------------|--------------|----|------------|--------|-------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 8304,7164    | 2  | 4152,3582  | 0,4311 | n.s.        |
|    | Innerhalb der Gruppen | 616483,36    | 64 | 9632,5525  |        |             |
|    | Gesamt                | 624788,0764  | 66 |            |        |             |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 4958,8571    | 2  | 2479,4286  | 0,2409 | n.s.        |
|    | Innerhalb der Gruppen | 617616,05    | 60 | 10293,6008 |        |             |
|    | Gesamt                | 622574,9071  | 62 |            |        |             |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 2199,6       | 2  | 1099,8     | 0,1316 | n.s.        |
|    | Innerhalb der Gruppen | 518042,30    | 62 | 8355,521   |        |             |
|    | Gesamt                | 520241,90    | 64 |            |        |             |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 27661,7714   | 2  | 13830,8857 | 1,7565 | n.s.        |
|    | Innerhalb der Gruppen | 527579,26    | 67 | 7874,3173  |        |             |

|    |                       |             |    |           |        |      |
|----|-----------------------|-------------|----|-----------|--------|------|
|    | Gesamt                | 555241,0314 | 69 |           |        |      |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 19307,2698  | 2  | 9653,6349 | 1,7157 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 337590,42   | 60 | 5626,507  |        |      |
|    | Gesamt                | 356897,6898 | 62 |           |        |      |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 7187,3684   | 2  | 3593,6842 | 1,3307 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 94519,64    | 35 | 2700,5611 |        |      |
|    | Gesamt                | 101707,0084 | 37 |           |        |      |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 1738,00     | 2  | 869,0000  | 0,1554 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 106229,81   | 19 | 5591,0426 |        |      |
|    | Gesamt                | 107967,81   | 21 |           |        |      |

**Tabelle 18: Varianzanalyse (5) der Amplitude der Welle V beim Hi-Chirp in Abhängigkeit der Schallwandler**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz    | F      | Signifikanz       |
|----|-----------------------|--------------|----|------------|--------|-------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 104480,1882  | 2  | 52240,0941 | 3,6418 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1176258,88   | 82 | 14344,6205 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1280739,068  | 84 |            |        |                   |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 2820,5235    | 2  | 1410,2118  | 0,0752 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1538562,00   | 82 | 18762,9634 |        |                   |
|    | Gesamt                | 1541383,424  | 84 |            |        |                   |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 62794,8095   | 2  | 31397,4048 | 3,0714 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 828022,14    | 81 | 10222,4956 |        |                   |
|    | Gesamt                | 890816,95    | 83 |            |        |                   |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 83882,939    | 2  | 41941,4695 | 3,4901 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen |              |    |            |        |                   |
|    | Gesamt                |              |    |            |        |                   |

|    |                       |             |    |            |        |      |
|----|-----------------------|-------------|----|------------|--------|------|
|    | Innerhalb der Gruppen | 949373,00   | 79 | 12017,3797 |        |      |
|    | Gesamt                | 1033255,939 | 81 |            |        |      |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 31334,9639  | 2  | 15667,4819 | 1,1379 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1101471,50  | 80 | 13768,3938 |        |      |
|    | Gesamt                | 1132806,464 | 82 |            |        |      |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 21948,72    | 2  | 10974,36   | 1,2837 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 615508,23   | 72 | 8548,7254  |        |      |
|    | Gesamt                | 637456,95   | 74 |            |        |      |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 24096,32    | 2  | 12048,1600 | 3,2135 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 176215,24   | 47 | 3749,2604  |        |      |
|    | Gesamt                | 200311,56   | 49 |            |        |      |

Tabelle 19: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (5)

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|-------------------|
|                          |                    | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz       |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | 50,00                  | -25,7456    | 125,7456   | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | -36,00                 | -111,7456   | 39,7456    | n.s.              |
|                          | Insert vs. EPDP    | -86,00                 | -162,4072   | -9,5928    | <b>p &lt; 0,5</b> |

Tabelle 20: Varianzanalyse (6) der Latenz der Welle V beim Klick in Abhängigkeit der Schallwandler

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz | F      | Signifikanz       |
|----|-----------------------|--------------|----|---------|--------|-------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 0,4397       | 2  | 0,2199  | 5,9394 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 3,1466       | 85 | 0,037   |        |                   |
|    | Gesamt                | 3,5864       | 87 |         |        |                   |

|    |                       |         |    |        |        |                   |
|----|-----------------------|---------|----|--------|--------|-------------------|
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 1,0576  | 2  | 0,5288 | 8,6611 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 5,1286  | 84 | 0,0611 |        |                   |
|    | Gesamt                | 6,1862  | 86 |        |        |                   |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 1,1572  | 2  | 0,5786 | 7,2548 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 6,6992  | 84 | 0,0798 |        |                   |
|    | Gesamt                | 7,8564  | 86 |        |        |                   |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 1,1552  | 2  | 0,5776 | 5,1645 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 9,0591  | 81 | 0,1118 |        |                   |
|    | Gesamt                | 10,2144 | 83 |        |        |                   |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 1,1444  | 2  | 0,5722 | 3,8856 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 12,2221 | 83 | 0,1473 |        |                   |
|    | Gesamt                | 13,3665 | 85 |        |        |                   |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 0,2213  | 2  | 0,1107 | 0,703  | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 11,0194 | 70 | 0,1574 |        |                   |
|    | Gesamt                | 11,2407 | 72 |        |        |                   |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 4,4052  | 2  | 2,2026 | 8,8376 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 8,2246  | 33 | 0,2492 |        |                   |
|    | Gesamt                | 12,6298 | 35 |        |        |                   |

**Tabelle 21: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (6)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |            |             |                   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------|-------------|-------------------|
|                          | Differenz          | Untergrenze            | Obergrenze | Signifikanz |                   |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | 0,11                   | -0,0095    | 0,2295      | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,17                   | 0,0505     | 0,2895      | <b>p &lt; 0,5</b> |

|    |                    |       |         |         |                   |
|----|--------------------|-------|---------|---------|-------------------|
| 60 | Insert vs. EPDP    | 0,06  | -0,0605 | 0,1805  | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. Insert | 0,14  | -0,0135 | 0,2935  | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,27  | 0,1151  | 0,4249  | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,13  | -0,0262 | 0,2862  | n.s.              |
| 50 | HDA 280 vs. Insert | 0,13  | -0,0471 | 0,3071  | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,28  | 0,1045  | 0,4555  | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,15  | -0,0285 | 0,3285  | n.s.              |
| 40 | HDA 280 vs. Insert | 0,18  | -0,0318 | 0,3918  | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,28  | 0,0682  | 0,4918  | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,1   | -0,1173 | 0,3173  | n.s.              |
| 30 | HDA 280 vs. Insert | 0,12  | -0,1226 | 0,3626  | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,28  | 0,0395  | 0,5205  | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,16  | -0,0826 | 0,4026  | n.s.              |
| 10 | HDA 280 vs. Insert | -0,14 | -0,6504 | 0,3704  | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | -0,8  | -1,2798 | -0,3202 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | -0,66 | -1,2106 | 0,1094  | <b>p &lt; 0,5</b> |

**Tabelle 22: Varianzanalyse (7) der Latenz der Welle V beim Chirp in Abhängigkeit der Schallwandler**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz | F       | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|----|---------|---------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 5,5155       | 2  | 2,7578  | 35,9059 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 6,3748       | 83 | 0,0768  |         |                    |
|    | Gesamt                | 11,8904      | 85 |         |         |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 7,2112       | 2  | 3,6056  | 32,8125 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 9,0106       | 82 | 0,1099  |         |                    |

|    |                       |         |    |        |         |                    |
|----|-----------------------|---------|----|--------|---------|--------------------|
|    | Gesamt                | 16,2219 | 84 |        |         |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 4,905   | 2  | 2,4525 | 19,6213 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 10,2492 | 82 | 0,125  |         |                    |
|    | Gesamt                | 15,1542 | 84 |        |         |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 2,4453  | 2  | 1,2226 | 10,859  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 9,3451  | 83 | 0,1126 |         |                    |
|    | Gesamt                | 11,7904 | 85 |        |         |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 5,5628  | 2  | 2,7814 | 18,8095 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 12,1254 | 82 | 0,1479 |         |                    |
|    | Gesamt                | 17,6882 | 84 |        |         |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 2,0478  | 2  | 1,0239 | 5,5234  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 14,4591 | 78 | 0,1854 |         |                    |
|    | Gesamt                | 16,5069 | 80 |        |         |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 0,1026  | 2  | 0,0513 | 0,2077  | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 12,101  | 49 | 0,247  |         |                    |
|    | Gesamt                | 12,2036 | 51 |        |         |                    |

**Tabelle 23: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (7)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |            |             |                    |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------|-------------|--------------------|
|                          | Differenz          | Untergrenze            | Obergrenze | Signifikanz |                    |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | 0,014                  | -0,0322    | 0,3122      | n.s.               |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,6                    | 0,4246     | 0,7754      | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | 0,46                   | 0,2831     | 0,6369      | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 60                       | HDA 280 vs. Insert | 0,25                   | 0,0422     | 0,4578      | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                    |      |         |        |                    |
|----|--------------------|------|---------|--------|--------------------|
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,71 | 0,4984  | 0,9216 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,46 | 0,2484  | 0,6716 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | HDA 280 vs. Insert | 0,24 | 0,0184  | 0,4616 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,59 | 0,3643  | 0,8157 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,35 | 0,1243  | 0,5757 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | HDA 280 vs. Insert | 0,14 | -0,0685 | 0,3485 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,41 | 0,1976  | 0,6224 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,27 | 0,0558  | 0,4842 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 30 | HDA 280 vs. Insert | 0,25 | 0,011   | 0,489  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,63 | 0,3841  | 0,8759 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,38 | 0,1321  | 0,6279 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 20 | HDA 280 vs. Insert | 0,23 | -0,0403 | 0,5003 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,39 | 0,1049  | 0,6751 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,16 | -0,1295 | 0,4495 | n.s.               |

**Tabelle 24: Varianzanalyse (8) der Latenz der Welle V beim Low-Chirp in Abhängigkeit der Schallgeber**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz | F       | Signifikanz       |
|----|-----------------------|--------------|----|---------|---------|-------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 11,7234      | 2  | 5,8617  | 36,3535 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 11,1257      | 69 | 0,1612  |         |                   |
|    | Gesamt                | 22,8491      | 71 |         |         |                   |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 16,8631      | 2  | 8,4316  | 31,9676 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 18,7265      | 71 | 0,2638  |         |                   |
|    | Gesamt                | 35,5896      | 73 |         |         |                   |

|    |                       |         |    |        |        |                   |
|----|-----------------------|---------|----|--------|--------|-------------------|
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 3,0918  | 2  | 1,5459 | 6,9261 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 15,1777 | 68 | 0,2232 |        |                   |
|    | Gesamt                | 18,2695 | 70 |        |        |                   |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 0,48    | 2  | 0,24   | 1,0918 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 14,7281 | 67 | 0,2198 |        |                   |
|    | Gesamt                | 15,2081 | 69 |        |        |                   |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 0,4887  | 2  | 0,2443 | 0,8135 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 19,824  | 66 | 0,3004 |        |                   |
|    | Gesamt                | 20,3127 | 68 |        |        |                   |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 0,6653  | 2  | 0,3326 | 0,8838 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 18,8183 | 50 | 0,3764 |        |                   |
|    | Gesamt                | 19,4836 | 52 |        |        |                   |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 0,1263  | 2  | 0,0632 | 0,1125 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 8,979   | 16 | 0,5612 |        |                   |
|    | Gesamt                | 9,1054  | 18 |        |        |                   |

**Tabelle 25: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (8)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|-------------------|
|                          |                    | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz       |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | 0,1                    | -0,1698     | 0,3698     | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,93                   | 0,6501      | 1,2099     | <b>p &lt; 0,5</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | 0,83                   | 0,5426      | 1,1174     | <b>p &lt; 0,5</b> |
| 60                       | HDA 280 vs. Insert | -0,02                  | -0,368      | 0,328      | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 1,01                   | 0,662       | 1,358      | <b>p &lt; 0,5</b> |

|    |                    |      |         |        |                   |
|----|--------------------|------|---------|--------|-------------------|
|    | Insert vs. EPDP    | 1,03 | 0,6751  | 1,3849 | <b>p &lt; 0,5</b> |
| 50 | HDA 280 vs. Insert | 0,2  | -0,1309 | 0,5309 | n.s.              |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,5  | 0,1765  | 0,8235 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,3  | -0,0341 | 0,6341 | n.s.              |

**Tabelle 26: Varianzanalyse (9) der Latenz der Welle V beim Mid-Chirp in Abhängigkeit der Schallgeber**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz | F      | Signifikanz       |
|----|-----------------------|--------------|----|---------|--------|-------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 2,5689       | 2  | 1,2844  | 4,8085 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 17,0955      | 64 | 0,2671  |        |                   |
|    | Gesamt                | 19,6644      | 66 |         |        |                   |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 4,6728       | 2  | 2,3364  | 7,9074 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 17,728       | 60 | 0,2955  |        |                   |
|    | Gesamt                | 22,4008      | 62 |         |        |                   |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 1,961        | 2  | 0,9805  | 4,2184 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 14,4107      | 62 | 0,2324  |        |                   |
|    | Gesamt                | 16,3717      | 64 |         |        |                   |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 2,3037       | 2  | 1,1518  | 6,9551 | <b>p &lt; 0,5</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 11,0959      | 67 | 0,1656  |        |                   |
|    | Gesamt                | 13,3996      | 69 |         |        |                   |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 1,2119       | 2  | 0,6059  | 2,8754 | n.s.              |
|    | Innerhalb der Gruppen | 12,6441      | 60 | 0,2107  |        |                   |
|    | Gesamt                | 13,856       | 62 |         |        |                   |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 1,516        | 2  | 0,758   | 2,1407 | n.s.              |

|    |                       |         |    |        |        |      |
|----|-----------------------|---------|----|--------|--------|------|
|    | Innerhalb der Gruppen | 12,3936 | 35 | 0,3541 |        |      |
|    | Gesamt                | 13,9096 | 37 |        |        |      |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 0,0887  | 2  | 0,0444 | 0,1354 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 6,2254  | 19 | 0,3277 |        |      |
|    | Gesamt                | 6,3141  | 21 |        |        |      |

**Tabelle 27: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (9)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|-------------------|
|                          |                    | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz       |
| 60                       | HDA 280 vs. Insert | 0,11                   | -0,2981     | 0,5181     | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,62                   | 0,2164      | 1,0236     | <b>p &lt; 0,5</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | 0,51                   | 0,1115      | 0,9085     | <b>p &lt; 0,5</b> |
| 50                       | HDA 280 vs. Insert | 0,11                   | -0,2278     | 0,4478     | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,43                   | 0,0657      | 0,7943     | <b>p &lt; 0,5</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | 0,32                   | 0,041       | 0,681      | n.s.              |
| 40                       | HDA 280 vs. Insert | 0,15                   | -0,13       | 0,4346     | n.s.              |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,44                   | 0,1524      | 0,7276     | <b>p &lt; 0,5</b> |
|                          | Insert vs. EPDP    | 0,29                   | -0,0341     | 0,5746     | n.s.              |

**Tabelle 28: Varianzanalyse (10) der Latenz der Welle V beim Hi-Chirp in Abhängigkeit der Schallgeber**

| dB |                       | Quadratsumme | df | Varianz | F       | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|----|---------|---------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 2,6431       | 2  | 1,3216  | 24,0981 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 4,4969       | 82 | 0,0548  |         |                    |
|    | Gesamt                | 7,14         | 82 |         |         |                    |

|    |                       |         |    |        |         |                    |
|----|-----------------------|---------|----|--------|---------|--------------------|
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 3,7182  | 2  | 1,8591 | 27,4321 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 5,5572  | 82 | 0,0678 |         |                    |
|    | Gesamt                | 9,2753  | 84 |        |         |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 3,9818  | 2  | 1,9909 | 21,0905 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 7,6463  | 81 | 0,0944 |         |                    |
|    | Gesamt                | 11,6281 | 83 |        |         |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 3,3909  | 2  | 1,6955 | 15,4744 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 8,6557  | 79 | 0,1096 |         |                    |
|    | Gesamt                | 12,0466 | 81 |        |         |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 5,2079  | 2  | 2,604  | 17,8812 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 11,65   | 80 | 0,1456 |         |                    |
|    | Gesamt                | 16,8579 | 82 |        |         |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 4,928   | 2  | 2,464  | 13,3551 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 13,284  | 72 | 0,1845 |         |                    |
|    | Gesamt                | 18,212  | 74 |        |         |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 2,6799  | 2  | 1,34   | 5,4509  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 11,5537 | 47 | 0,2458 |         |                    |
|    | Gesamt                | 14,2336 | 49 |        |         |                    |

**Tabelle 29: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (10)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                    | 95%-Konfidenzintervall |            |             |                    |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------|-------------|--------------------|
|                          | Differenz          | Untergrenze            | Obergrenze | Signifikanz |                    |
| 70                       | HDA 280 vs. Insert | 0,01                   | -0,1381    | 0,1581      | n.s.               |
|                          | HDA 280 vs. EPDP   | 0,38                   | 0,2319     | 0,5281      | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                    |       |         |        |                    |
|----|--------------------|-------|---------|--------|--------------------|
|    | Insert vs. EPDP    | 0,37  | 0,2206  | 0,5194 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 60 | HDA 280 vs. Insert | -0,01 | -0,1746 | 0,1546 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,44  | 0,2754  | 0,6046 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,45  | 0,2839  | 0,6161 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | HDA 280 vs. Insert | -0,06 | -0,2562 | 0,1362 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,43  | 0,2356  | 0,6244 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,49  | 0,2921  | 0,6879 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | HDA 280 vs. Insert | -0,11 | -0,3235 | 0,1035 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,37  | 0,1585  | 0,5815 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,48  | 0,2627  | 0,6973 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 30 | HDA 280 vs. Insert | -0,19 | -0,4342 | 0,0542 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,42  | 0,1783  | 0,6617 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,61  | 0,3596  | 0,8604 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 20 | HDA 280 vs. Insert | -0,2  | -0,4824 | 0,0824 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,43  | 0,1322  | 0,7278 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,63  | 0,3348  | 0,9252 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 10 | HDA 280 vs. Insert | -0,24 | -0,6244 | 0,1444 | n.s.               |
|    | HDA 280 vs. EPDP   | 0,38  | -0,0704 | 0,8304 | n.s.               |
|    | Insert vs. EPDP    | 0,62  | 0,1654  | 1,0746 | <b>p &lt; 0,05</b> |

**Tabelle 30: Varianzanalyse (11) der Latenz der Welle V in Abhängigkeit der Stimuli bei Wiedergabe durch den Kopfhörer HDA 280**

| dB |                       | Quadratsumme | df  | Varianz | F        | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|-----|---------|----------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 276,0692     | 4   | 69,0173 | 638,4058 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 15,0271      | 139 | 0,1081  |          |                    |

|    |                       |          |     |          |          |                    |
|----|-----------------------|----------|-----|----------|----------|--------------------|
|    | Gesamt                | 291,0963 | 143 |          |          |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 290,3901 | 4   | 72,5975  | 473,9898 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 21,2896  | 139 | 0,1532   |          |                    |
|    | Gesamt                | 311,6797 | 143 |          |          |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 353,6368 | 4   | 88,4092  | 547,2721 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 22,4548  | 139 | 0,1615   |          |                    |
|    | Gesamt                | 376,0916 | 143 |          |          |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 374,8438 | 4   | 93,7109  | 740,7333 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 17,5850  | 139 | 0,1265   |          |                    |
|    | Gesamt                | 392,4288 | 143 |          |          |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 339,8452 | 4   | 84,9613  | 522,7768 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 22,5902  | 139 | 0,1625   |          |                    |
|    | Gesamt                | 362,4354 | 143 |          |          |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 379,0552 | 4   | 94,7638  | 275,5369 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 47,8054  | 139 | 0,3439   |          |                    |
|    | Gesamt                | 426,8606 | 143 |          |          |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 405,1209 | 4   | 101,2802 | 357,8924 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 39,3357  | 139 | 0,2830   |          |                    |
|    | Gesamt                | 444,4566 | 143 |          |          |                    |

**Tabelle 31: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (11)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                     | 95%-Konfidenzintervall |            |             |                    |
|--------------------------|---------------------|------------------------|------------|-------------|--------------------|
|                          | Differenz           | Untergrenze            | Obergrenze | Signifikanz |                    |
| 70                       | Klick vs. Chirp     | 0,4000                 | 0,1654     | 0,6346      | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Low-Chirp | 3,2100                 | 2,9712     | 3,4488      | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp | 0,8700                 | 0,6265     | 1,1135      | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |          |          |          |                    |
|----|-------------------------|----------|----------|----------|--------------------|
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,9500  | -1,1846  | -0,7154  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,8100   | 2,5712   | 3,0488   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,4700   | 0,2265   | 0,7135   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,3500  | -1,5846  | -1,1154  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,3400  | -2,5875  | -2,0925  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,1600  | -4,3988  | -3,9212  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,8200  | -2,0635  | -1,5765  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 60 | Klick vs. Chirp         | 0,5200   | 0,2407   | 0,7993   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,3800   | 3,0958   | 3,6642   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9900   | 0,7002   | 1,2798   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 0,8500   | -1,1293  | -0,5707  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,8600   | 2,5758   | 3,1442   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,4700   | 0,1802   | 0,7598   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,3700  | -1,6493  | -1,0907  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,3900  | -2,6846  | -2,0954  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,2300  | -4,5142  | -3,9458  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,8400  | -2,1298  | -1,5502  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | Klick vs. Chirp         | 0,7400   | 0,4532   | 1,0268   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,8400   | 3,5481   | 4,1319   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,1000   | 0,8024   | 1,3976   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | - 0,7900 | - 1,0768 | - 0,5032 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,1000   | 2,8081   | 3,3919   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,3600   | 0,0624   | 0,6576   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | - 1,5300 | - 1,8168 | - 1,2432 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,7400  | -3,0425  | - 2,4375 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | - 4,6300 | - 4,9219 | - 4,3381 | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |          |          |          |                    |
|----|-------------------------|----------|----------|----------|--------------------|
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | - 1,8900 | - 2,1876 | - 1,5924 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | Klick vs. Chirp         | 0,9500   | 0,6962   | 1,2038   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 4,0300   | 3,7717   | 4,2883   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9900   | 0,7266   | 1,2534   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,7100  | -0,9638  | -0,4562  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,0800   | 2,8217   | 3,3383   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,0400   | -0,2234  | 0,3034   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,6600  | -1,9138  | -1,4062  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -3,0400  | -3,3077  | -2,7723  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,7400  | -4,9983  | -4,4817  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,7000  | -1,9634  | -1,4366  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 30 | Klick vs. Chirp         | 0,7200   | 0,4323   | 1,0077   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,8200   | 3,5272   | 4,1128   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9400   | 0,6415   | 1,2385   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,6900  | -0,9777  | -0,4023  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,1000   | 2,8072   | 3,3928   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,2200   | -0,0785  | 0,5185   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,4100  | -1,6977  | -1,1223  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,8800  | -3,1834  | -2,5766  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,5100  | -4,8028  | -4,2172  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,6300  | -1,9285  | -1,3315  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 20 | Klick vs. Chirp         | 0,7600   | 0,3415   | 1,1785   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,9500   | 3,5241   | 4,3759   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,6200   | 0,1857   | 1,0543   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,8500  | -1,2685  | -0,4315  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,1900   | 2,7641   | 3,6159   | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |         |         |         |                    |
|----|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -0,1400 | -0,5743 | 0,2943  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,6100 | -2,0285 | -1,1915 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -3,3300 | -3,7714 | -2,8886 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,8000 | -5,2259 | -4,3741 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,4700 | -1,9043 | -1,0357 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 10 | Klick vs. Chirp         | 0,7000  | 0,3204  | 1,0796  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,9700  | 3,5837  | 4,3563  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,2700  | -0,1239 | 0,6639  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -1,0000 | -1,3796 | -0,6204 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,2700  | 2,8837  | 3,6563  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -0,4300 | -0,8239 | -0,0361 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,7000 | -2,0796 | -1,3204 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -3,7000 | -4,1004 | -3,2996 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,9700 | -5,3563 | -4,5837 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,2700 | -1,6639 | -0,8761 | <b>p &lt; 0,05</b> |

**Tabelle 32: Varianzanalyse (12) der Amplitude der Welle V in Abhängigkeit der Stimuli bei Wiedergabe durch den Kopfhörer HDA**

| dB |                       | Quadratsumme | df  | Varianz     | F       | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|-----|-------------|---------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 898973,7500  | 4   | 224743,4375 | 11,6403 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 2683732,8400 | 139 | 19307,4305  |         |                    |
|    | Gesamt                | 3582706,5900 | 143 |             |         |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 642138,5556  | 4   | 160534,6389 | 12,1033 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1843662,0000 | 139 | 13263,7554  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2485800,5556 | 143 |             |         |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 372247,5556  | 4   | 93061,8889  | 7,0773  | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                       |              |     |             |         |                    |
|----|-----------------------|--------------|-----|-------------|---------|--------------------|
|    | Innerhalb der Gruppen | 1827757,2500 | 139 | 13149,3327  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2200004,8056 | 143 |             |         |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 545543,5556  | 4   | 136385,8889 | 10,8596 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1745710,0000 | 139 | 12559,0647  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2291253,5556 | 143 |             |         |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 503360,6389  | 4   | 125840,1597 | 9,2691  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1887103,2500 | 139 | 13576,2824  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2390463,8889 | 143 |             |         |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 383335,5556  | 4   | 95833,8889  | 13,3693 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 383335,5556  | 139 | 7168,2044   |         |                    |
|    | Gesamt                | 1379715,9656 | 143 |             |         |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 110063,0000  | 4   | 27515,7500  | 6,7961  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 562776,3700  | 139 | 4048,7509   |         |                    |
|    | Gesamt                | 672839,3700  | 143 |             |         |                    |

**Tabelle 33: Post-Hoc-Test zur Varianzanalyse (12)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                     | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|---------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                     | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | Klick vs. Chirp     | 12,0000                | -87,1532    | 111,1532   | n.s.               |
|                          | Klick vs. Low-Chirp | -47,0000               | -147,9082   | 53,9082    | n.s.               |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp | -212,0000              | -314,8961   | -109,1039  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Hi-Chirp  | -93,0000               | -192,1532   | 6,1532     | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Low-Chirp | -59,0000               | -159,9082   | 41,9082    | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Mid-Chirp | -224,0000              | -326,8961   | -121,1039  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Hi-Chirp  | -105,0000              | -204,1532   | -5,8468    | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |           |           |           |                    |
|----|-------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -165,0000 | -269,5884 | -60,4116  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -46,0000  | -146,9082 | 54,9082   | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 119,0000  | 16,1039   | 221,8961  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 60 | Klick vs. Chirp         | 25,0000   | -61,4171  | 111,4171  | n.s.               |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | -40,0000  | -127,9467 | 47,9467   | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -173,0000 | -262,6793 | -83,3207  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -24,0000  | -110,4171 | 62,4171   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -65,0000  | -152,9467 | 22,9467   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -198,0000 | -287,6793 | -108,3207 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -49,0000  | -135,4171 | 37,4171   | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -133,0000 | -224,1542 | -41,8458  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 16,0000   | -71,9467  | 103,9467  | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 149,0000  | 59,3207   | 238,6793  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | Klick vs. Chirp         | 32,0000   | -49,8269  | 113,8269  | n.s.               |
|    | Klick vs. Lo-Chirp      | -60,0000  | -143,2753 | 23,2753   | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -119,0000 | -203,9158 | -34,0842  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -31,0000  | -112,8269 | 50,8269   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -92,0000  | -175,2753 | -8,7247   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -151,0000 | -235,9158 | -66,0842  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -63,0000  | -144,8269 | 18,8269   | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -59,0000  | -145,3124 | 27,3124   | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 29,0000   | -54,2753  | 112,2753  | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 88,0000   | 3,0842    | 172,9158  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | Klick vs. Chirp         | 69,0000   | -10,9693  | 148,9693  | n.s.               |
|    | Klick vs. Lo-Chirp      | -14,0000  | -95,3848  | 67,3848   | n.s.               |

|    |                         |           |           |            |                    |
|----|-------------------------|-----------|-----------|------------|--------------------|
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -126,0000 | -208,9880 | -43,0120   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -31,0000  | -110,9693 | 48,9693    | n.s.               |
|    | Chirp vs. Lo-Chirp      | -83,0000  | -164,3848 | -1,6152    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -195,0000 | -277,9880 | -112,0120  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -100,0000 | -179,9693 | -20,0307   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -112,0000 | -196,3529 | -27,6471   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -17,0000  | -98,3848  | 64,3848    | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 95,0000   | 12,0120   | 177,9880   | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 30 | Klick vs. Chirp         | 86,0000   | 2,8552    | 169,1448   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Lo-Chirp      | -6,0000   | -90,6165  | 78,6165    | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -104,0000 | -190,2834 | -17,7166   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -3,0000   | -86,1448  | 80,1448    | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -92,0000  | -176,6165 | -7,3835    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -190,0000 | -276,2834 | ,-103,7166 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -89,0000  | -172,1448 | -5,8552    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -98,0000  | -185,7024 | -10,2976   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 3,0000    | -81,6165  | 87,6165    | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 101,0000  | 14,7166   | 187,2834   | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 20 | Klick vs. Chirp         | 108,0000  | 47,5843   | 168,4157   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 27,0000   | -34,4851  | 88,4851    | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -53,0000  | -115,6963 | 9,6963     | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 21,0000   | -39,4157  | 81,4157    | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -81,0000  | -142,4851 | -19,5149   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -161,0000 | -223,6963 | -98,3037   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -87,0000  | -147,4157 | -26,5843   | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |          |           |          |                    |
|----|-------------------------|----------|-----------|----------|--------------------|
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -80,0000 | -143,7274 | -16,2726 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -6,0000  | -6,0000   | 55,4851  | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 74,0000  | 11,3037   | 136,6963 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 10 | Klick vs. Chirp         | 66,0000  | 20,5949   | 111,4051 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Chirp         | 58,0000  | 11,7912   | 104,2088 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 10,0000  | -37,1191  | 57,1191  | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 10,0000  | -35,4051  | 55,4051  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -8,0000  | -54,2088  | 38,2088  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -56,0000 | -103,1191 | - 8,8809 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -56,0000 | -101,4051 | 10,5949  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -48,0000 | -95,8941  | -0,1059  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -48,0000 | -94,2088  | -1,7912  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 0,0000   | -47,1191  | 47,1191  | n.s.               |

**Tabelle 34: Varianzanalyse (13) der Latenz der Welle V Abhängigkeit der Stimuli bei Ausgabe durch Insert**

| dB |                       | Quadratsumme | df  | Varianz | F        | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|-----|---------|----------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 276,7161     | 4   | 69,1790 | 585,3738 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 16,1906      | 137 | 0,1182  |          |                    |
|    | Gesamt                | 292,9066     | 141 |         |          |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 274,5355     | 4   | 68,6339 | 376,5861 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 24,9686      | 137 | 0,1823  |          |                    |
|    | Gesamt                | 299,5041     | 141 |         |          |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 376,5287     | 4   | 94,1322 | 671,3912 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 19,2080      | 137 | 0,1402  |          |                    |
|    | Gesamt                | 395,7367     | 141 |         |          |                    |

|    |                       |          |     |          |          |                    |
|----|-----------------------|----------|-----|----------|----------|--------------------|
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 384,6851 | 4   | 96,1713  | 710,8740 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 18,5342  | 137 | 0,1353   |          |                    |
|    | Gesamt                | 403,2192 | 141 |          |          |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 360,1641 | 4   | 90,0410  | 494,9250 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 24,9242  | 137 | 0,1819   |          |                    |
|    | Gesamt                | 385,0884 | 141 |          |          |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 407,1312 | 4   | 101,7828 | 452,7519 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 30,7989  | 137 | 0,2248   |          |                    |
|    | Gesamt                | 437,9300 | 141 |          |          |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 433,0951 | 4   | 108,2738 | 369,6116 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 40,1327  | 137 | 0,2929   |          |                    |
|    | Gesamt                | 473,2278 | 141 |          |          |                    |

**Tabelle 35: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (13)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                        | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                        | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | Klick vs. Chirp        | 0,4300                 | 0,1804      | 0,6796     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Low-Chirp    | 3,2000                 | 2,9482      | 3,4518     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs Mid-Chirp     | 0,7000                 | 0,4482      | 0,9518     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs Hi-Chirp      | -1,0500                | -1,3018     | -0,7982    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs Low-Chirp     | 2,7700                 | 2,5182      | 3,0218     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs Mid-Chirp     | 0,2700                 | 0,0182      | 0,5218     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs Hi-Chirp      | -1,4800                | -1,7318     | -1,2282    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Low-Chirp vs Mid-Chirp | -2,5000                | -2,7540     | -2,2460    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Low-Chirp vs Hi-Chirp  | -4,2500                | -4,5040     | -3,9960    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp | -1,7500                | -2,0040     | -1,4960    | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |         |         |         |                    |
|----|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
| 60 | Klick vs. Chirp         | 0,6300  | 0,3201  | 0,9399  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,2200  | 2,9073  | 3,5327  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9600  | 0,6473  | 1,2727  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -1,0000 | -1,3127 | -0,6873 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,5900  | 2,2773  | 2,9027  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,3300  | 0,0173  | 0,6427  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,6300 | -1,9427 | -1,3173 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,2600 | -2,5754 | -1,9446 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,2200 | -4,5354 | -3,9046 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,9600 | -2,2754 | -1,6446 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | Klick vs. Chirp         | 0,8500  | 0,5782  | 1,1218  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,9100  | 3,6358  | 4,1842  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,0800  | 0,8058  | 1,3542  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,9800 | -1,2542 | -0,7058 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,0600  | 2,7858  | 3,3342  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,2300  | -0,0442 | 0,5042  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,8300 | -2,1042 | -1,5558 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,8300 | -3,1066 | -2,5534 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,8900 | -5,1666 | -4,6134 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -2,0600 | -2,3366 | -1,7834 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | Klick vs. Chirp         | 0,9100  | 0,6430  | 1,1770  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,9500  | 3,6806  | 4,2194  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9600  | 0,6906  | 1,2294  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -1,0000 | -1,2694 | -0,7306 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -3,0400 | 2,7706  | 3,3094  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,0500  | -0,2194 | 0,3194  | n.s.               |

|    |                         |         |         |         |                    |
|----|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,9100 | -2,1794 | -1,6406 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,9900 | -3,2617 | -2,7183 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,9500 | -5,2217 | -4,6783 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,9600 | -2,2317 | -1,6883 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 30 | Klick vs. Chirp         | 0,8500  | 0,5404  | 1,1596  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,8000  | 3,4876  | 4,1124  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,8600  | 0,5476  | 1,1724  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -1,0000 | -1,3124 | -0,6876 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,9500  | 2,6376  | 3,2624  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,0100  | -0,3024 | 0,3224  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,8500 | -2,1624 | -1,5376 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,9400 | -3,2551 | -2,6249 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,8000 | -5,1151 | -4,4849 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,8600 | -2,1751 | -1,5449 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 20 | Klick vs. Chirp         | 0,9900  | 0,6458  | 1,3342  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 4,0500  | 3,7028  | 4,3972  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,0000  | 0,6528  | 1,3472  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -1,0500 | -1,3972 | -0,7028 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,0600  | 2,7128  | 3,4072  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,0100  | -0,3372 | 0,3572  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -2,0400 | -2,3872 | -1,6928 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -3,0500 | -3,4003 | -2,6997 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -5,1000 | -5,4503 | -4,7497 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -2,0500 | -2,4003 | -1,6997 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 10 | Klick vs. Chirp         | 0,9400  | 0,5471  | 1,3329  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 4,1100  | 3,7136  | 4,5064  | <b>p &lt; 0,05</b> |

|                         |         |         |         |                    |
|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
| Klick vs. Mid-Chirp     | 0,3200  | -0,0764 | 0,7164  | n.s.               |
| Klick vs. Hi-Chirp      | -1,1000 | -1,4964 | -0,7036 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Chirp vs. Low-Chirp     | 3,1700  | 2,7736  | 3,5664  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Chirp vs. Mid-Chirp     | -0,6200 | -1,0164 | -0,2236 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Chirp vs. Hi-Chirp      | -2,0400 | -2,4364 | -1,6436 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -3,7900 | -4,1899 | -3,3901 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -5,2100 | -5,6099 | -4,8101 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,4200 | -1,8199 | -1,0201 | <b>p &lt; 0,05</b> |

**Tabelle 36: Varianzanalyse (14) der Amplitude der Welle V in Abhängigkeit der Stimuli bei Wiedergabe durch Insert**

| dB |                       | Quadratsumme | df  | Varianz     | F       | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|-----|-------------|---------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 638061,5493  | 4   | 159515,3873 | 10,4487 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 2091510,3200 | 137 | 15266,4987  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2729571,8693 | 141 |             |         |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 280661,5775  | 4   | 70165,3944  | 5,3009  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1813404,6800 | 137 | 13236,5305  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2094066,2575 | 141 |             |         |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 324739,4648  | 4   | 81184,8662  | 6,4333  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1728878,0300 | 137 | 12619,5477  |         |                    |
|    | Gesamt                | 2053617,4948 | 141 |             |         |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 145341,1620  | 4   | 36335,2905  | 3,8319  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1299089,7200 | 137 | 9482,4067   |         |                    |
|    | Gesamt                | 1444430,8820 | 141 |             |         |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 489327,8662  | 4   | 122331,9665 | 9,0420  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1853521,2700 | 137 | 13529,3523  |         |                    |

|    |                       |              |     |            |        |                    |
|----|-----------------------|--------------|-----|------------|--------|--------------------|
|    | Gesamt                | 2342849,1362 | 141 |            |        |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 204333,7746  | 4   | 51083,4437 | 6,5776 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1063978,1100 | 137 | 7766,2636  |        |                    |
|    | Gesamt                | 1268311,8846 | 141 |            |        |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 53545,4930   | 4   | 13386,3732 | 2,6247 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 698723,9900  | 137 | 5100,1751  |        |                    |
|    | Gesamt                | 752269,4830  | 141 |            |        |                    |

**Tabelle 37: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (14)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                         | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                         | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | Klick vs. Chirp         | 38,0000                | - 51,6935   | 127,6935   | n.s.               |
|                          | Klick vs. Low-Chirp     | - 3,0000               | - 93,4908   | 87,4908    | n.s.               |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp     | - 151,0000             | - 241,4908  | - 60,5092  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Hi-Chirp      | 18,0000                | -72,4908    | 108,4908   | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Low-Chirp     | -41,0000               | -131,4908   | 49,4908    | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Mid-Chirp     | -189,0000              | -279,4908   | -98,5092   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Hi-Chirp      | -20,0000               | -110,4908   | 70,4908    | n.s.               |
|                          | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -148,0000              | -239,2811   | -56,7189   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 21,0000                | -70,2811    | 112,2811   | n.s.               |
|                          | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 169,0000               | 77,7189     | 260,2811   | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 60                       | Klick vs. Chirp         | 40,0000                | -43,5177    | 123,5177   | n.s.               |
|                          | Klick vs. Low-Chirp     | -17,0000               | -101,2601   | 67,2601    | n.s.               |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp     | -76,0000               | -160,2601   | 8,2601     | n.s.               |
|                          | Klick vs. Hi-Chirp      | 48,0000                | -36,2601    | 132,2601   | n.s.               |

|    |                         |           |           |          |                    |
|----|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------|
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -57,0000  | -141,2601 | 27,2601  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -116,0000 | -200,2601 | -31,7399 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | 8,0000    | -76,2601  | 92,2601  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -59,0000  | -143,9960 | 25,9960  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 65,0000   | -19,9960  | 149,9960 | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 124,0000  | 39,0040   | 208,9960 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | Klick vs. Chirp         | 70,0000   | -11,5480  | 151,5480 | n.s.               |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 79,0000   | -3,2729   | 161,2729 | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -47,0000  | -129,2729 | 35,2729  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -5,0000   | -87,2729  | 77,2729  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 9,0000    | -73,2729  | 91,2729  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -117,0000 | -199,2729 | -34,7271 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -75,0000  | -157,2729 | 7,2729   | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -126,0000 | -208,9914 | -43,0086 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -84,0000  | -166,9914 | -1,0086  | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 42,0000   | -40,9914  | 124,9914 | n.s.               |
| 40 | Klick vs. Chirp         | 39,0000   | -31,6888  | 109,6888 | n.s.               |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 28,0000   | -43,3171  | 99,3171  | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -25,0000  | -96,3171  | 46,3171  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -47,0000  | -118,3171 | 24,3171  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -11,0000  | -82,3171  | 60,3171  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -64,0000  | -135,3171 | 7,3171   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -86,0000  | -157,3171 | -14,6829 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -53,0000  | -124,9400 | 18,9400  | n.s.               |

|    |                         |           |           |          |                    |
|----|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------|
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -75,0000  | -146,9400 | -3,0600  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -22,0000  | -93,9400  | 49,9400  | n.s.               |
| 30 | Klick vs. Chirp         | 151,0000  | 66,5636   | 235,4364 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 68,0000   | -17,1870  | 153,1870 | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -5,0000   | -90,1870  | 80,1870  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 18,0000   | -67,1870  | 103,1870 | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -83,0000  | -168,1870 | 2,1870   | n.s.               |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -156,0000 | -241,1870 | -70,8130 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -133,0000 | -218,1870 | -47,8130 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -73,0000  | -158,9310 | 12,9310  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -50,0000  | -135,9310 | 35,9310  | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -23,0000  | -62,9310  | 108,9310 | n.s.               |
| 20 | Klick vs. Chirp         | 86,0000   | 22,0269   | 149,9731 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 52,0000   | -12,5418  | 116,5418 | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -19,0000  | -83,5418  | 45,5418  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 47,0000   | -17,5418  | 111,5418 | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -34,0000  | -98,5418  | 30,5418  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -105,0000 | -169,5418 | -40,4582 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -39,0000  | -103,5418 | 25,5418  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -71,0000  | -136,1054 | -5,8946  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -5,0000   | -70,1054  | 60,1054  | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 66,0000   | 0,8946    | 131,1054 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 10 | Klick vs. Chirp         | 54,0000   | 2,1578    | 105,8422 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 31,0000   | -21,3031  | 83,3031  | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 32,0000   | -20,3031  | 84,3031  | n.s.               |

|                         |          |          |          |      |
|-------------------------|----------|----------|----------|------|
| Klick vs. Hi-Chirp      | 51,0000  | -1,3031  | 103,3031 | n.s. |
| Chirp vs. Low-Chirp     | -23,0000 | -75,3031 | 29,3031  | n.s. |
| Chirp vs. Mid-Chirp     | -22,0000 | -74,3031 | 30,3031  | n.s. |
| Chirp vs. Hi-Chirp      | -3,0000  | -55,3031 | 49,3031  | n.s. |
| Low-Chirp vs. Mid-Chirp | 1,0000   | -51,7599 | 53,7599  | n.s. |
| Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 20,0000  | -32,7599 | 72,7599  | n.s. |
| Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 19,0000  | -33,7599 | 71,7599  | n.s. |

**Tabelle 38: Varianzanalyse (15) der Latenz der Welle V in Abhängigkeit der Stimuli bei Wiedergabe durch EPDP**

| dB |                       | Quadratsumme | df  | Varianz | F        | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|-----|---------|----------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 335,0438     | 4   | 83,7610 | 675,2080 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 16,1268      | 130 | 0,1241  |          |                    |
|    | Gesamt                | 351,1706     | 134 |         |          |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 353,7362     | 4   | 88,4340 | 674,9545 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 17,0329      | 130 | 0,1310  |          |                    |
|    | Gesamt                | 370,7691     | 134 |         |          |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 339,4326     | 4   | 84,8581 | 586,1100 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 18,8217      | 130 | 0,1448  |          |                    |
|    | Gesamt                | 358,2543     | 134 |         |          |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 320,5835     | 4   | 80,1459 | 479,7540 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 21,7173      | 130 | 0,1671  |          |                    |
|    | Gesamt                | 342,3008     | 134 |         |          |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 284,0553     | 4   | 71,0138 | 314,3408 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 29,3687      | 130 | 0,2259  |          |                    |

|    |                       |          |     |         |          |                    |
|----|-----------------------|----------|-----|---------|----------|--------------------|
|    | Gesamt                | 313,4240 | 134 |         |          |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 268,0756 | 4   | 67,0189 | 210,6838 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 41,3532  | 130 | 0,3181  |          |                    |
|    | Gesamt                | 309,4288 | 134 |         |          |                    |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 351,9559 | 4   | 87,9890 | 207,5030 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 55,1248  | 130 | 0,4240  |          |                    |
|    | Gesamt                | 407,0807 | 134 |         |          |                    |

**Tabelle 39: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (15)**

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                         | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                         | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | Klick vs. Chirp         | 0,8300                 | 0,5694      | 1,0906     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Low-Chirp     | 3,9700                 | 3,7041      | 4,2359     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,0900                 | 0,8269      | 1,3531     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,7400                | -0,9981     | -0,4819    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,1400                 | 2,8696      | 3,4104     | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,2600                 | -0,0077     | 0,5277     | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,5700                | -1,8328     | -1,3072    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,8800                | -3,1529     | -2,6071    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,7100                | -4,9781     | -4,4419    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,8300                | -2,0954     | -1,5646    | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | 60                      | Klick vs. Chirp        | 0,9600      | 0,6922     | 1,2278             |
| Klick vs. Low-Chirp      |                         | 4,1200                 | 3,8467      | 4,3933     | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Klick vs. Mid-Chirp      |                         | 1,3400                 | 1,0696      | 1,6104     | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Klick vs. Hi-Chirp       |                         | -0,6800                | -0,9453     | -0,4147    | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |         |         |         |                    |
|----|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,1600  | 2,8821  | 3,4379  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,3800  | 0,1049  | 0,6551  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,6400 | -1,9101 | -1,3699 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,7800 | -3,0605 | -2,4995 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,8000 | -5,0755 | -4,5245 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -2,0200 | -2,2927 | -1,7473 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | Klick vs. Chirp         | 1,0500  | 0,7685  | 1,3315  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 4,0600  | 3,7727  | 4,3473  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,2500  | 0,9657  | 1,5343  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,6400 | -0,9189 | -0,3611 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,0100  | 2,7179  | 3,3021  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,2000  | -0,0892 | 0,4892  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,6900 | -1,9739 | -1,4061 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,8100 | -3,1048 | -2,5152 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,7000 | -4,9896 | -4,4104 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,8900 | -2,1767 | -1,6033 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | Klick vs. Chirp         | 1,0800  | 0,7776  | 1,3824  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,9500  | 3,6414  | 4,2586  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,1500  | 0,8446  | 1,4554  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 0,6200  | -0,9196 | -0,3204 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,8700  | 2,5562  | 3,1838  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | 0,0700  | -0,2407 | 0,3807  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,7000 | -2,0050 | -1,3950 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,8000 | -3,1167 | -2,4833 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,5700 | -4,8811 | -4,2589 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,7700 | -2,0779 | -1,4621 | <b>p &lt; 0,05</b> |

|    |                         |         |         |         |                    |
|----|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
| 30 | Klick vs. Chirp         | 1,0700  | 0,7184  | 1,4216  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 3,7400  | 3,3812  | 4,0988  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9800  | 0,6249  | 1,3351  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,5500 | -0,8984 | -0,2016 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,6700  | 2,3051  | 3,0349  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -0,0900 | -0,4513 | 0,2713  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,6200 | -1,9746 | -1,2654 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,7600 | -3,1283 | -2,3917 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,2900 | -4,6518 | -3,9282 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,5300 | -1,8881 | -1,1719 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 20 | Klick vs. Chirp         | 1,0300  | 0,6128  | 1,4472  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. LowChirp      | 3,6300  | 3,2042  | 4,0558  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 0,9300  | 0,5086  | 1,3514  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | -0,5400 | -0,9534 | -0,1266 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 2,6000  | 2,1670  | 3,0330  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -0,1000 | -0,5287 | 0,3287  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,5700 | -1,9908 | -1,1492 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -2,7000 | -3,1370 | -2,2630 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,1700 | -4,5993 | -3,7407 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -1,4700 | -1,8949 | -1,0451 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 10 | Klick vs. Chirp         | 1,5700  | 1,0883  | 2,0517  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 4,5700  | 4,0784  | 5,0616  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | 1,1600  | 0,6735  | 1,6465  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 0,1800  | -0,2973 | 0,6573  | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | 3,0000  | 2,5000  | 3,5000  | <b>p &lt; 0,05</b> |

|                         |         |         |         |                    |
|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------|
| Chirp vs. Mid-Chirp     | -0,4100 | -0,9050 | 0,0850  | n.s.               |
| Chirp vs. Hi-Chirp      | -1,3900 | -1,8759 | -0,9041 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -3,4100 | -3,9146 | -2,9054 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -4,3900 | -4,8857 | -3,8943 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | -0,9800 | -1,4706 | -0,4894 | <b>p &lt; 0,05</b> |

**Tabelle 40: Varianzanalyse (16) der Amplitude der Welle V in Abhängigkeit der Stimuli bei Wiedergabe durch EPDP**

| dB |                       | Quadratsumme | df  | Varianz     | F      | Signifikanz        |
|----|-----------------------|--------------|-----|-------------|--------|--------------------|
| 70 | Zwischen den Gruppen  | 410193,3333  | 4   | 102548,3333 | 8,6615 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1539148,9200 | 130 | 11839,6071  |        |                    |
|    | Gesamt                | 1949342,2533 | 134 |             |        |                    |
| 60 | Zwischen den Gruppen  | 361887,7333  | 4   | 90471,9333  | 5,2171 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 2254368,2500 | 130 | 17341,2942  |        |                    |
|    | Gesamt                | 2616255,9833 | 134 |             |        |                    |
| 50 | Zwischen den Gruppen  | 375124,4000  | 4   | 93781,1000  | 8,3801 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1454819,0000 | 130 | 11190,9154  |        |                    |
|    | Gesamt                | 1829943,4000 | 134 |             |        |                    |
| 40 | Zwischen den Gruppen  | 266253,0815  | 4   | 66563,2704  | 5,8218 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1486353,1300 | 130 | 11433,4856  |        |                    |
|    | Gesamt                | 1752606,2115 | 134 |             |        |                    |
| 30 | Zwischen den Gruppen  | 229630,9333  | 4   | 57407,7333  | 6,6689 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Innerhalb der Gruppen | 1119079,1100 | 130 | 8608,3008   |        |                    |
|    | Gesamt                | 1348710,0433 | 134 |             |        |                    |
| 20 | Zwischen den Gruppen  | 35106,9926   | 4   | 8776,7481   | 1,2728 | n.s.               |
|    | Innerhalb der Gruppen | 896434,8600  | 130 | 6895,6528   |        |                    |

|    |                       |             |     |            |        |      |
|----|-----------------------|-------------|-----|------------|--------|------|
|    | Gesamt                | 931541,8526 | 134 |            |        |      |
| 10 | Zwischen den Gruppen  | 56403,7333  | 4   | 14100,9333 | 2,9295 | n.s. |
|    | Innerhalb der Gruppen | 625735,4800 | 130 | 4813,3498  |        |      |
|    | Gesamt                | 682139,2133 | 134 |            |        |      |

Tabelle 41: Post-hoc Test zur Varianzanalyse (16)

| Post-Hoc-Test: Tukey HSD |                         | 95%-Konfidenzintervall |             |            |                    |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                          |                         | Differenz              | Untergrenze | Obergrenze | Signifikanz        |
| 70                       | Klick vs. Chirp         | 42,0000                | -38,4963    | 122,4963   | n.s.               |
|                          | Klick vs. Low-Chirp     | -62,0000               | -144,1468   | 20,1468    | n.s.               |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp     | -120,0000              | -201,2940   | -38,7060   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Klick vs. Hi-Chirp      | -13,0000               | -92,7484    | 66,7484    | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Low-Chirp     | -104,0000              | -187,5434   | -20,4566   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Mid-Chirp     | -162,0000              | -244,7050   | -79,2950   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Hi-Chirp      | -55,0000               | -136,1864   | 26,1864    | n.s.               |
|                          | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -58,0000               | -142,3123   | 26,3123    | n.s.               |
|                          | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 49,0000                | -33,8231    | 131,8231   | n.s.               |
|                          | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 107,0000               | 25,0227     | 188,9773   | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 60                       | Klick vs. Chirp         | 78,0000                | -19,4199    | 175,4199   | n.s.               |
|                          | Klick vs. Low-Chirp     | 19,0000                | -80,4174    | 118,4174   | n.s.               |
|                          | Klick vs. Mid-Chirp     | -55,0000               | -153,3853   | 43,3853    | n.s.               |
|                          | Klick vs. Hi-Chirp      | 85,0000                | -11,5148    | 181,5148   | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Low-Chirp     | -59,0000               | -160,1078   | 42,1078    | n.s.               |
|                          | Chirp vs. Mid-Chirp     | -133,0000              | -233,0931   | -32,9069   | <b>p &lt; 0,05</b> |
|                          | Chirp vs. Hi-Chirp      | 7,0000                 | -91,2551    | 105,2551   | n.s.               |

|    |                         |           |           |          |                    |
|----|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------|
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -74,0000  | -176,0383 | 28,0383  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 66,0000   | -34,2360  | 166,2360 | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 140,0000  | 40,7876   | 239,2124 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 50 | Klick vs. Chirp         | 72,0000   | -6,2600   | 150,2600 | n.s.               |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | -16,0000  | -95,8647  | 63,8647  | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -87,0000  | -166,0355 | -7,9645  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 34,0000   | -43,5329  | 111,5329 | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -88,0000  | -169,2225 | -6,7775  | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -159,0000 | -239,4074 | -78,5926 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -38,0000  | -116,9309 | 40,9309  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -71,0000  | -152,9700 | 10,9700  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 50,0000   | -30,5222  | 130,5222 | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 121,0000  | 41,3001   | 200,6999 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| 40 | Klick vs. Chirp         | 88,0000   | 8,8964    | 167,1036 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | -12,0000  | -92,7256  | 68,7256  | n.s.               |
|    | Klick vs. Mid-Chirp     | -41,0000  | -120,8875 | 38,8875  | n.s.               |
|    | Klick vs. Hi-Chirp      | 39,0000   | -39,3687  | 117,3687 | n.s.               |
|    | Chirp vs. Low-Chirp     | -100,0000 | -182,0981 | -17,9019 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Mid-Chirp     | -129,0000 | -210,2742 | -47,7258 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Chirp vs. Hi-Chirp      | -49,0000  | -128,7818 | 30,7818  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -29,0000  | -111,8537 | 53,8537  | n.s.               |
|    | Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | 51,0000   | -30,3902  | 132,3902 | n.s.               |
|    | Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 80,0000   | -0,5591   | 160,5591 | n.s.               |
| 30 | Klick vs. Chirp         | 95,0000   | 26,3618   | 163,6382 | <b>p &lt; 0,05</b> |
|    | Klick vs. Low-Chirp     | 61,0000   | -9,0456   | 131,0456 | n.s.               |

|                         |           |           |          |                    |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------|
| Klick vs. Mid-Chirp     | -16,0000  | -85,3184  | 53,3184  | n.s.               |
| Klick vs. Hi-Chirp      | 58,0000   | -10,0005  | 126,0005 | n.s.               |
| Chirp vs. Low-Chirp     | -34,0000  | -105,2365 | 37,2365  | n.s.               |
| Chirp vs. Mid-Chirp     | -111,0000 | -181,5216 | -40,4784 | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Chirp vs. Hi-Chirp      | -37,0000  | -106,2266 | 32,2266  | n.s.               |
| Low-Chirp vs. Mid-Chirp | -77,0000  | -148,8921 | -5,1079  | <b>p &lt; 0,05</b> |
| Low-Chirp vs. Hi-Chirp  | -3,0000   | -73,6223  | 67,6223  | n.s.               |
| Mid-Chirp vs. Hi-Chirp  | 74,0000   | 4,0989    | 143,9011 | <b>p &lt; 0,05</b> |

## Danksagung

Zwar musste ich diese Arbeit allein schreiben, dennoch möchte ich mich bei allen bedanken, die an Ihrem guten Gelingen beteiligt gewesen sind.

An erster Stelle gilt ein herzlicher Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. med. habil. Thomas Janssen, welcher stets „*ein Ohr*“ für meine Anliegen hatte und mich auf dem Weg dieser Arbeit fortwährend konstruktiv begleitet hat. Das habe ich nie als selbstverständlich gesehen.

Besonderen Dank ebenfalls an meinen Betreuer Dr.-Ing. Thomas Rosner für die unentwegte technische Unterstützung, die Kollegialität, die viele Geduld und für die Bereitstellung des Testgerätes.

Darüber hinaus danke ich meinem Mann Sebastian für die andauernde motivierende Begleitung. Ebenso meinen Verwandten und Freunden für den emotionalen Rückhalt.