

Aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde
der Medizinischen Fakultät
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Einfluss der Cochleaimplantationsseite bei Patienten mit Single-Sided Deafness auf die frühe
Verarbeitung akustischer Stimuli in der Elektroenzephalografie

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. med.

(doctor medicinae)

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

vorgelegt von Peggy Seidel

aus Quedlinburg

Magdeburg 2022

Bibliografische Beschreibung:

Seidel, Peggy:

Einfluss der Cochleaimplantationsseite bei Patienten mit Single-Sided Deafness auf die frühe Verarbeitung akustischer Stimuli in der Elektroenzephalografie. – 2022. – 78 Bl., 25 Abb., 9 Tab., 3 Anl.

Kurzreferat:

In der vorliegenden Studie wurden Probanden mit postlingual unilateralem Hörverlust, die in der Universitätsklinik Magdeburg behandelt wurden, eingeschlossen. Jeweils 7 Probanden mit Single-Sided Deafness waren auf der linken beziehungsweise rechten Seite mit einem Cochleaimplantat versorgt. Für ein erfolgreiches Hörverstehen ist unter anderem die kortikale Sprachverarbeitung, die bei der Mehrheit der Menschen vorwiegend in der linken Gehirnhälfte lokalisiert ist, entscheidend. Anhand von Verhaltensdaten der Probanden und EEG-Daten wurde die Auswirkung der CI-Implantationsseite auf das Hörverstehen von Tönen und Sprache ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass beide CI-Gruppen bei CI-Sprachstimulation signifikant geringere Trefferquoten und verlängerte Reaktionszeiten im Vergleich zu anderen Bedingungen aufweisen. Hinsichtlich der EEG-Daten zeigen linksseitig versorgte SSD-CI-Träger ein ähnliches Amplitudenverhalten wie Normalhörende. Hingegen weisen rechtsseitig versorgte SSD-CI-Träger im Durchschnitt geringere Amplituden als Normalhörende auf. Zwischen beiden CI-Gruppen zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der N100-Amplituden. Auffällig ist eine Latenzverschiebung bei Sprachstimulation, wobei CI-Träger bei CI-Sprachstimulation längere N100-Latenzen als Normalhörende vorweisen. Unterschiede zwischen den beiden CI-Gruppen bestehen hierbei nicht. Bei Sprachstimulation des normalhörenden Ohres rechtsseitig versorgter SSD-CI-Träger zeigt sich zudem ein verändertes EEG-Muster. Zusammenfassend deuten die Ergebnisse auf einen möglichen Vorteil der links- verglichen mit rechtsseitigen SSD-CI-Trägern hinsichtlich dem Hörverstehen komplexer Sprachstimuli.

Schlüsselwörter: Single-Sided Deafness, Cochleaimplantat, auditorische Verarbeitung, kortikale Sprachverarbeitung, Elektroenzephalografie, N100

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung und Aufgabenstellung	6
1.1 Cochleaimplantate bei Single-Sided Deafness	6
1.2 Kortikale Sprachverarbeitung bei Kindern mit Cochleaimplantaten.....	7
1.3 Kortikale Sprachverarbeitung und der Einfluss der CI-Implantationsseite bei Erwachsenen.....	9
1.4 Messung des Antwortverhaltens von CI-Probanden	11
1.5 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	13
2 Material und Methoden.....	14
2.1 Versuchspersonen	14
2.2 Hördiagnostik	16
2.3 Die N100-Komponente der Elektroenzephalografie.....	18
2.4 Ablauf der Experimente.....	19
2.4.1 Normalhörende Probanden	19
2.4.2 SSD-CI-Probanden	21
2.5 EEG-Ableitung	22
2.5.1 EEG-Aufzeichnung.....	22
2.5.2 EEG-Datenanalyse	24
2.6 Statistische Auswertung	25
3 Ergebnisse	27
3.1 Auswertung der Sprachtests der CI-Probanden und der Höranstrengung während des Experimentes	27
3.2 Analyse des Reaktions- und Antwortverhaltens.....	29
3.2.1 Trefferquote	29
3.2.2 Reaktionszeit.....	35
3.3 Analyse der N100.....	40
3.3.1 Überblick der N100	40
3.3.2 N100-Amplitude	53

3.3.3	N100-Latenz	57
4	Diskussion.....	60
4.1	Beurteilung der Verhaltensdaten	60
4.2	Beurteilung der N100-Analyse.....	63
5	Zusammenfassung.....	69
6	Literaturverzeichnis	70
	Danksagungen	74
	Ehrenerklärung.....	75
	Darstellung des Bildungsweges.....	76
	Anlagen.....	77

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
CAL	Versuchsabschnitt „Kontrollbedingung auditorisch links“
CAR	Versuchsabschnitt „Kontrollbedingung auditorisch rechts“
CI	Cochleaimplantat
CIL	Cochleaimplantat-Patienten, die das Implantat im linken Ohr tragen
CIR	Cochleaimplantat-Patienten, die das Implantat im rechten Ohr tragen
CI-Ohr	Cochleaimplantat-Ohr
CSD	Current Source Density (2. räumliche Ableitung des EEG-Signals)
CV	Versuchsabschnitt „Kontrollbedingung visuell“
ECG-Elektrode	Elektrokardiografie-Elektrode
EEG	Elektroenzephalografie
ERP	Event-related potential (Ereigniskorreliertes Potenzial)
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
fNIRS	functional near-infrared spectroscopy (funktionelle Nahinfrarotspektroskopie)
GFP	Global Field Power
MRT	Magnetresonanztomografie
NH	Normalhörend
NH-Ohr	normalhörendes Ohr
OLSA	Oldenburger Satztest
SAL	Versuchsabschnitt „Sprachbedingung auditorisch links“
SAR	Versuchsabschnitt „Sprachbedingung auditorisch rechts“
SSD	Single-Sided Deafness (Patienten mit einseitiger Gehörlosigkeit)
SV	Versuchsabschnitt „Sprachbedingung visuell“
VEOG-Elektrode	vertikale Elektrookulografie-Elektrode (für vertikale Augenbewegungen)

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Cochleaimplantate bei Single-Sided Deafness

Single-Sided Deafness (SSD) führt zu Einschränkungen im Hörvermögen und der Lebensqualität. Betroffen sind Menschen mit einseitigem hochgradigen sensorineuralen Hörverlust bis hin zur Gehörlosigkeit. Hieran kann theoretisch jeder Mensch im Laufe seines Lebens erkranken, egal ob im Kindes- oder Erwachsenenalter. Die Ursachen sind vielfältig und können beispielsweise ein Hörsturz oder auch ein progredienter Hörverlust sein. In solchen Fällen gilt die Versorgung mit einem Cochleaimplantat (CI) mittlerweile als gängiges Therapieverfahren. Schätzungen zufolge waren im Jahr 2013 zwischen 25.000 und 30.000 Menschen in Deutschland mit einem oder zwei Cochleaimplantaten versorgt, wobei aufgrund fehlender bundesweiter Register keine genauen Angaben zur Zahl der CI-Träger¹ gemacht werden können (Schaarschmidt, 2013).

Durch solch ein Cochleaimplantat kann trotz einseitiger Gehörlosigkeit ein beidseitiges Hörverstehen bei SSD-Patienten ermöglicht werden. Auch wenn der Input über das CI nicht dem normalhörenden Ohr ähnlich ist, steigt die Lebensqualität der betroffenen Personen durch die CI-Versorgung merklich an. Finke et al. und Döge et al. beschrieben hierzu in ihren Arbeiten, dass die Implantation eines CIs eine große Hilfe im Alltag von SSD-Patienten darstellt. Durch die CI-Versorgung verbessert sich die Lokalisationsfähigkeit von auditorischen Signalquellen und die Sprachwahrnehmung unter Lärmbedingungen. Bei manchen Patienten wird zudem die Belastung durch einen Tinnitus reduziert. Um dieses Maß an Zufriedenheit und erhöhter Lebensqualität erreichen zu können, ist es jedoch notwendig, dass die Patienten eine ausreichende Schulung und Training im Umgang mit dem Implantat erhalten (Döge et al., 2017; Finke et al., 2017).

Zudem wird in der Studie von Shiomi et al. der Zugewinn an Lebensqualität durch eine CI-Implantation im Vergleich zu einer Versorgung mit Hörgeräten verdeutlicht, welcher abhängig vom Grad der Schwerhörigkeit ist. Dazu wurden bei Patienten mit Hörgeräten verschiedene Sprachtests vor und nach der CI-Implantation durchgeführt. Im Ergebnis zeigt sich hierbei eine deutlich verbesserte Sprachwahrnehmung mit dem CI im Vergleich zur Hörgeräteausstattung zuvor, sodass die Implantation eines Cochleaimplantats als Zugewinn bezüglich des Outcomes im Alltag angesehen werden kann (Shiomi et al., 1999). Jedoch profitiert nicht jeder CI-Träger gleich von der Implantation. Die Leistung, die mit dem CI erreicht werden kann, ist von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig. Lazard et al. untersuchten diese Parameter

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text nur die männliche Form verwendet. Gemeint ist stets die weibliche, männliche und diverse Form.

anhand von retrospektiven Daten von ca. 2250 Probanden. Sie führten Sprachtests unter Ruhe- und Lärmbedingungen zu verschiedenen Zeitpunkten nach der CI-Implantation durch und verglichen die Ergebnisse. Dabei nahmen folgende Faktoren besonderen Einfluss auf das Outcome nach der CI-Implantation: das Alter der Probanden zu Beginn des Hörverlustes, der Umstand, ob die Probanden während der Phase des Hörverlustes mit einem Hörgerät versorgt waren oder nicht, die Dauer der Ertaubungszeit vor der CI-Versorgung, die Anzahl der aktiven Elektroden des Implantats in der Cochlea und die Dauer der CI-Erfahrung der Probanden, wobei diese den größten Effekt auf eine erfolgreiche CI-Nutzung hat (Lazard et al., 2012b).

1.2 Kortikale Sprachverarbeitung bei Kindern mit Cochleaimplantaten

Um zu verstehen, wie Sprachverarbeitung bei erwachsenen SSD-Patienten funktioniert, ist es wichtig, sich mit der Spezifizierung des auditorischen Kortex und der damit einhergehenden Verarbeitung von Sprache bei Kindern zu befassen. Sprache wird bei Kindern auf der kontralateral zum gebotenen Reiz gelegenen Seite verarbeitet, wohingegen die Sprachverarbeitung bei Erwachsenen vorwiegend auf der linken Hirnhemisphäre erfolgt. Diese Reifung des auditorischen Kortex ist abhängig von der Hörerfahrung und führt zur Spezialisierung der Hemisphären (Jiwani et al., 2016). Eine Studie dazu stammt von Chilosi et al. Sie untersuchten den Unterschied von links- und rechtsseitig versorgten Kindern mit Cochleaimplantaten, die beidseits prälingual ertaubten. Kinder mit rechtsseitigem CI entwickeln zu ca. 77 % eine Sprachverarbeitung in der linken Hirnhemisphäre, Kinder mit linksseitigem CI nur zu ca. 43 %. Die CI-Probanden mit einer Spezialisierung der linken Hemisphäre auf Sprachverarbeitung erreichen durchschnittlich eine höhere Punktzahl in den durchgeführten Sprachverständnistests als jene mit vorwiegend rechtsseitiger Hemisphärenaktivierung. So schneiden etwa 40 % der Probanden mit linker und nur etwa 20 % der Probanden mit rechter kortikaler Aktivierung mit einer Maximalpunktzahl im Spracherfolg ab. Rückschließend kann man somit sagen, dass binaural gehörlose Kinder mit einem CI auf der rechten Seite bessere Sprachergebnisse erzielen als Kinder mit einer linksseitigen CI-Versorgung (Chilosi et al., 2014).

Henkin et al. betrachten in ihrer Arbeit prälingual bilateral ertaubte Kinder mit einseitiger CI-Versorgung. Diese bekamen über Lautsprecher einsilbige Wörter präsentiert, die sie korrekt nachsprechen sollten. Kinder mit rechtsseitigem CI schneiden hierbei unabhängig vom Implantationsalter mit ca. 62% richtiger Antworten prozentual besser ab als linksseitig versorgte mit ca. 49%. Dabei zeigt sich dieser Vorteil vor allem bei den Kindern, die ihr CI bereits mit einem Alter von maximal 2 Jahren erhalten haben. Henkin et al. begründen dies mit der ungefähren Dauer von ca. 3,5 Jahren, in der das auditorische System besonders plastisch für Anpassungsprozesse ist, sodass sich die kortikalen Aktivierungswege für Sprache bei rechtsseitiger CI-Versorgung ähnlich entwickeln können wie die Normalhörender. Bei linksseitigen CI-Trägern entwickle sich hingegen aufgrund der ipsilateral gelegenen Sprachhemisphäre ein

verändertes Muster an Aktivierungswegen verglichen mit Normalhörenden (Henkin et al., 2008). Auch Lazard et al. befassen sich mit der Sprachverarbeitung bei gehörlosen Kindern und erkennen dabei eine Phase der kortikalen Plastizität von etwa 3,5 Jahren. Ab einem Alter von etwa 7 Jahren kommt es dann zu einer Spezifizierung des Sprachverständnisses und zu komplexeren Verarbeitungsmustern. In der Zwischenzeit dieser Altersspanne kann eine individuelle Plastizität noch vorhanden sein (Lazard et al., 2012a).

Ähnliche Erkenntnisse werden in dem Review von Kraaijenga et al. gewonnen, in dem Studien von Kindern und Erwachsenen mit unilateraler CI-Versorgung zusammengefasst wurden. Der Vorteil einer Implantation des CIs in das rechte Ohr (kontralateral zur sprachdominierenden linken Hirnhemisphäre (Bethmann et al., 2007)) ist bei Kindern mit beidseitigem Hörverlust vom Zeitpunkt der Ertaubung abhängig. So spezialisiert sich die linke Gehirnhälfte auf die Verarbeitung von Sprache, wenn Kinder beidseits prälingual ertauben und eine CI-Versorgung im rechten Ohr erhalten oder wenn sie postlingual ertauben und ein CI im linken Ohr implantiert wird. Demnach entwickeln Kinder mit einem Alter von unter 3 Jahren und einer prälingualen CI-Implantation im linken Ohr eine Spezialisierung der rechten Hemisphäre auf die Sprachverarbeitung. Wohingegen postlingual ertaubte Kinder mit einem Implantationsalter von über 8 Jahren Sprache auf der bis dahin etablierten linken Hemisphäre ipsilateral zum CI verarbeiten. Eine Reorganisation von Sprache in eine andere Hemisphäre ist laut der Autoren bis zu einem Alter von ca. 3,5 Jahren möglich. Diese Zeitspanne wird auch als „sensible Phase“ bezeichnet, da hier das Gehirn noch plastisch ist und sich an veränderte Bedingungen anpassen kann. Zusätzlich kann man aus dem Review entnehmen, dass rechtsseitig unilateral ertaubte Kinder schlechtere verbale und nonverbale Fähigkeiten gegenüber linksseitigen SSD-Kindern aufweisen. Dies gibt einen weiteren Hinweis darauf, dass auditorische Reize über das rechte Ohr einen größeren Beitrag zur Sprachwahrnehmung liefern als andersseitig (Kraaijenga et al., 2018).

Ein ähnliches kompensatorisches Verhalten in der Verarbeitung von auditorischen Reizen bei CI-Trägern wird auch in der Arbeit von Easwar et al. deutlich. In dieser Studie wurden prälingual ertaubten und beidseitig mit Cochleaimplantaten versorgten Kindern Klicklaute dargeboten. Diese wurden entweder auf dem linken, dem rechten oder auf beiden Ohren abgespielt. Im Vergleich zu normalhörenden Kindern zeigt sich bei den CI-Trägern bei unilateraler Stimulation eine erhöhte bilaterale Aktivität im EEG. Diese kommt durch eine verhältnismäßig geringere kontralaterale und vermehrte ipsilaterale Verarbeitung zustande. Dabei werden zusätzlich nicht-auditorische Gehirnareale, wie beispielsweise visuelle Regionen, rekrutiert, wodurch sich die prozentuale Richtigkeit bei der Beantwortung der Aufgaben im Experiment erhöht. Dennoch verzeichnet sich bei den Kindern mit CI-Versorgung trotz kortikaler Kompensationsmechanismen eine schlechtere Tonverarbeitung als bei Normalhörenden (Easwar et al., 2017).

1.3 Kortikale Sprachverarbeitung und der Einfluss der CI-Implantationsseite bei Erwachsenen

Selpien et al. berichten in ihrer Arbeit von einem Vorteil der linken Hirnhemisphäre gegenüber der rechtsseitigen bei der Verarbeitung von visuell präsentierten Sprachstimuli. Normalhörende Probanden bekamen die Stimuli im rechten oder linken visuellen Sichtfeld gezeigt und antworteten dabei aufgrund der kontralateralen Verarbeitung schneller und öfter richtig, wenn die Stimuli im rechten visuellen Feld lagen (Selpien et al., 2015). Ähnliche Ergebnisse zeigt das Review von Anderson et al. bei postlingual ertaubten und mit einem unilateralen CI versorgten Probanden. Sie untersuchten die Auswirkung von Gehörlosigkeit und einer CI-Implantation auf die auditorische und visuelle Sprachverarbeitung. Im Resultat wird eine stärkere Korrelation von Konsonanten, Vokalen und Sätzen hinsichtlich einer Aktivierung der linken Hemisphäre im Vergleich zur rechten nachgewiesen (Anderson et al., 2017).

Nach den bisher dargestellten Erkenntnissen ergibt sich nun die Frage, ob es vorteilhaft ist, ein Cochleaimplantat bevorzugt im linken oder rechten Ohr zu implantieren. Moberly et al. untersuchten zu dieser Fragestellung postlingual ertaubte Erwachsene, die ein CI auf der linken, der rechten Seite oder beidseits erhielten. In verschiedenen Tests zu neurokognitiven Funktionen (allgemeine Intelligenz, Arbeitsgedächtnis) und der Sprachwahrnehmung zeigt die Implantationsseite hierbei keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Studie (Moberly et al., 2016). Zu gleichen Erkenntnissen kommen auch Morris et al. Sie führten bei unilateral versorgten CI-Probanden mit schwerem bis hochgradigem bilateralem Hörverlust verschiedene Sprachwahrnehmungstests zu definierten Zeitpunkten vor und nach der Implantation durch. Unter den CI-Trägern waren sowohl prä- als auch postlingual ertaubte, wobei ca. ein Drittel ein CI auf der linken und zwei Drittel auf der rechten Seite erhielten. Ein Jahr nach der CI-Versorgung wurden die Testergebnisse verglichen, ohne dass sich ein Unterschied in der Sprachwahrnehmung zwischen den links- und rechtsseitig versorgten CI-Probanden zeigte (Morris et al., 2007). Wedekind et al. bemerken zudem anhand ihrer Arbeit, dass für das CI-Outcome letztlich nicht die Dauer der Gehörlosigkeit oder die Ertaubungsseite, sondern ein zuvor etablierter binauraler Aktivierungsweg hauptverantwortlich für ein späteres gutes Verständnis mit dem CI ist. Dazu unterzogen sich postlingual unilateral im frühen Kindesalter ertaubte und erst im Erwachsenenalter mit einem CI versorgte Probanden Sprachtests in verschiedenen Umgebungssituationen. Damit die Bevorzugung eines Ohres aufgrund von langem einseitigen Hörverlust reversibel ist, sei vor allem eine vor der Gehörlosigkeit binaurale Aktivierung der auditorischen Kortexe für eine gleichmäßige Nutzung von normalhörendem und CI-Ohr entscheidend (Wedekind et al., 2018).

Anders als in den bisher genannten Arbeiten gibt es auch Studien, die über einen Vorteil des rechten Ohres hinsichtlich der Sprachverarbeitung aufgrund der kontralateral gelegenen sprachdominierenden linken Hemisphäre berichten (Hugdahl & Westerhausen, 2016).

Eine Arbeit dazu stammt von Kraaijenga et al. In diesem Review wurde das postoperative Outcome bei Kindern und Erwachsenen mit bilateraler Schwerhörigkeit und einseitiger CI-Versorgung abhängig von der Implantationsseite verglichen. Demnach sei ein Vorteil der rechtsseitigen Implantation vor allem vom Zeitpunkt der Gehörlosigkeit, gemeint ist eine prä- oder postlinguale Taubheit, abhängig. Innerhalb der Probanden zeigen rechtsseitig Versorgte ein ähnliches Sprachverarbeitungsmuster wie Normalhörende. Linksseitige CI-Träger weisen eine erhöhte ipsilateral zum Implantat gelegene Aktivierung auf. Ohne CI-Versorgung stellen sich im Umkehrschluss schlechtere verbale und nonverbale Fähigkeiten bei rechts- gegenüber linksseitig ertaubten Probanden heraus, sodass man zusammenfassen kann, dass bei gehörlosen Erwachsenen Hinweise auf einen Vorteil der rechtsseitigen CI-Versorgung vorhanden sind (Kraaijenga et al., 2018). Auch Liang et al. berichten über solch einen Vorteil der rechtsseitigen Implantation bei bilateral ertaubten. Sie zeigen in ihrer Studie, dass bei Probanden mit rechts implantierten CIs eine stärker dominierende kontralateral zum CI gelegene Hirnaktivität vorliegt als bei linksseitig versorgten CI-Trägern. Außerdem können die rechtsseitigen CI-Träger Frequenzveränderungen besser erkennen als linksseitige. Aus diesem Grund schließen sie, dass die CI-Implantationsseite neuroplastische Wege und somit das Outcome von CI-Trägern beeinflusst (Liang et al., 2020).

Die bisherigen Erkenntnisse treffen jedoch nicht auf einseitig ertaubte Probanden zu. Wenn eine unilaterale rechtsseitige Taubheit vorliegt, sind die physiologischen kontralateralen Aktivierungswege zur sprachdominierenden linken Hemisphäre betroffen, weshalb in solch einem Fall eine rechtsseitige Gehörlosigkeit und somit rechtsseitige CI-Implantation Nachteile bezüglich der Sprachverarbeitung bringen kann. In diesem Fall werden von CI-Trägern alternativ ipsilateral zum NH-Ohr gelegene Hirnareale oder Areale anderer Modalitäten zur Verarbeitung akustischer Reize hinzugezogen. Zhou et al. erkannten in diesem Zusammenhang, dass eine gesteigerte crossmodale² Aktivierung im auditorischen Kortex mit einem schlechteren Outcome im Sprachverständnis assoziiert ist. In ihrer Arbeit wurde die kortikale Sprachverarbeitung bei rechtsseitig versorgten CI-Trägern mittels funktioneller Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) untersucht. Dabei zeigt sich eine Korrelation von fNIRS-Antwort und Sprachverständnisfähigkeit für die linke Hirnhemisphäre, nicht jedoch für die rechte. Die CI-Probanden zeigen allgemein eine größere Varianz der Gehirnaktivität sowohl für auditorische als auch visuelle Stimuli sowie eine vermehrte Aktivierung der rechten Hemisphäre bei auditorischen Aufgaben verglichen mit Normalhörenden (Zhou et al., 2018). Es stellte sich heraus, dass ein zeitlich längerer Hörverlust vor der CI-Versorgung mit einer verminderten Verarbeitung von Sprache im superioren temporalen Kortex und einer vermehrten crossmodalen Aktivität weiterer Hirnregionen einhergeht (Anderson et al., 2017). In weiteren Studien zur auditorischen Plastizität des menschlichen Gehirns wurden unter anderem linksseitig ertaubte SSD-

² Interaktion zwischen zwei oder mehr verschiedenen sensorischen Modalitäten

Patienten untersucht, die bisher keine Hörversorgung erhielten und deshalb lediglich mit dem rechten Ohr hörten. Hierbei zeigt sich allgemein eine vermehrte ipsilateral zum Reizinput gelegene Aktivierung in der rechten Hemisphäre, was ein Zeichen für eine gesteigerte Neuroplastizität dieser Hirnhälfte darstellt. Dadurch geht bei SSD-Probanden die Asymmetrie der kortikalen Pfade zu gewissen Maßen verloren, da weitere zusätzliche Areale aktiviert werden, um das einseitige auditorische Signal weiterhin adäquat verarbeiten zu können (Firszt et al., 2006; Burton et al., 2012; Hanss et al., 2009).

1.4 Messung des Antwortverhaltens von CI-Probanden

Mithilfe von Trefferquoten und Reaktionszeiten von Probanden können bereits ohne die Analyse von speziellen Verarbeitungsprozessen des Gehirns erste Aussagen zum Hörverstehen von SSD-Probanden mit einseitigem Cochleaimplantat gegenüber Normalhörenden getroffen werden. Anhand der Anzahl der richtig beantworteten Aufgaben (Trefferquote) und der Reaktionszeiten der Probanden auf den Stimulus kann man ableiten, ob es Unterschiede bzw. Defizite zwischen CI-Trägern und Normalhörenden und zwischen linksseitig und rechtsseitig versorgten CI-Probanden gibt.

Finke et al. beschreiben in ihrer Arbeit über das Verhältnis von auditorischer Wahrnehmung und Sprachverständlichkeit bei CI-Trägern, dass sich verlängerte Reaktionszeiten und geringere Trefferquoten bei CI-Probanden im Vergleich zu Normalhörenden zeigen. Hierbei wurden postlingual ertaubte Erwachsene mit ein- oder beidseitiger CI-Versorgung untersucht. Man präsentierte ihnen zweisilbige Wörter in ruhiger Umgebung und mit Hintergrundgeräuschen. Diese sollten jeweils den Kategorien lebendige (z.B. Tiere) oder nicht lebendige (z. B. Gegenstände) Objekte zugeordnet werden (Finke et al., 2016a). In einer weiteren Studie von Finke et al. mit gleichem Design wurden postlingual ertaubte SSD-Patienten einbezogen. Die Aufgabe war dieselbe wie oben beschrieben. Zusammenfassend zeigt sich dabei, dass die Reaktionszeiten bei Stimulation des CI-Ohres länger sind als bei dem normalhörenden Ohr. Sie nehmen an, dies sei aufgrund des verminderten CI-Signals auf eine höher geordnete Verarbeitung des Gehirns zurückzuführen, wodurch eine Rekonstruktion des Signals erreicht werden sollte. Daraus ergebe sich eine größere Höranstrengung für CI-Probanden, was in einer längeren Verarbeitungszeit des Signals resultiere. Auch in den Trefferquoten sieht man diesen Unterschied, da die Anzahl an richtig zugeordneten Wörtern auf dem normalhörenden Ohr im Mittel bei ca. 97% liegt, auf dem CI-Ohr hingegen nur bei ca. 65% (Finke et al., 2016b).

Schierholz et al. beschreiben in ihrer Arbeit die auditorische und audio-visuelle Verarbeitung bei Patienten mit auditorischen Defiziten. Dabei wurden postlingual ertaubte Probanden mit unilateralem CI, Patienten mit auditorischen Hirnstammimplantaten und Patienten mit auditorischen Mittelhirnimplantaten im Vergleich zu normalhörenden Probanden untersucht.

Sie bekamen auditorisch, visuell und kombiniert audio-visuell einsilbige Wörter monaural präsentiert, auf die sie mittels Mausclick am Computer schnellst möglich reagieren sollten. Bezüglich der Trefferquoten und Reaktionszeiten ergeben sich anders als in der Arbeit von Finke et al. (2016a) keine Unterschiede zwischen den CI- und normalhörenden Probanden, jedoch antworten beide Gruppen für die kombiniert audio-visuelle Aufgabe schneller als bei den einzelnen Modalitäten ‚visuell‘ und ‚auditorisch‘ (Schierholz et al., 2017).

Eine weitere Möglichkeit, das Antwortverhalten von Probanden zu bewerten, ist die Aufzeichnung und Auswertung einer Elektroenzephalografie (EEG). Die EEG ist eine etablierte Untersuchungsmethode zur medizinischen Diagnostik in der Neurologie sowie in der experimentellen Forschung. Sie stellt anhand von Spannungsdifferenzen an der Kopfoberfläche die elektrische Aktivität des Gehirns dar und wird mithilfe von Latenzen und Amplitudenerhebungen beschrieben.

Daliri et al. verwendeten eine frühe Komponente der EEG (N100), um das Antwortverhalten normalhörender Probanden auf auditorisch präsentierte Töne und Sprachstimuli im Sinne von Silben zu untersuchen. Dabei zeigen sich größere Amplituden und längere Latenzen für Silben gegenüber den Tönen (Daliri & Max, 2016). Auch Schierholz et al. führten eine EEG-Studie mit auditorischen Sprachstimuli in Form von Wörtern durch. Sie verglichen dabei das Antwortmuster von Normalhörenden und einseitig mit einem CI versorgten Probanden. Bezüglich der Amplituden ergeben sich hierbei keine Unterschiede zwischen den Probandengruppen, jedoch weisen die CI-Träger längere Latenzen gegenüber den Normalhörenden auf (Schierholz et al., 2017). SSD-CI-Probanden wurden in der Arbeit von Polonenko et al. untersucht. Dabei wurde das EEG bei einseitiger akustischer Stimulation mit akustischen Klicks bzw. biphasischen elektrischen Pulsen zwischen dem normalhörenden und dem CI-Ohr dieser Probanden verglichen. Das Antwortverhalten der physiologischen und elektrischen Stimulation in der EEG unterscheidet sich dabei nicht maßgeblich (Polonenko et al., 2019).

Im Hinblick auf die Sprachwahrnehmung mit dem CI zeigen Finke et al. in ihrer EEG-Studie eine Beziehung zwischen auditorischer Verarbeitungsleistung und verbalen Fähigkeiten bei CI-Probanden auf. Demnach hängt die Sprachwahrnehmung bei CI-Trägern mit verschiedenen Faktoren wie den ereigniskorrelierten Potenzialen im EEG, den lexikalischen Fähigkeiten und dem verbalen Arbeitsgedächtnis der Probanden sowie der Höranstrengung zusammen. Die eingeschränkte Qualität des elektrischen CI-Inputs gegenüber eines normalhörenden auditorischen Reizes führe zu einer vermehrten Höranstrengung und einer verlängerten neuronalen Sprachverarbeitung. So sei eine schnellere kortikale Wortverarbeitung mit einer besseren Sprachwahrnehmung assoziiert, wobei kognitive Fähigkeiten helfen können, den verminderten Input über das CI zu kompensieren (Finke et al., 2016a). Hingegen kommen Purdy et al. zu gegenteiligen Erkenntnissen. Sie finden keine Korrelation der EEG-Daten mit den Fähigkeiten zur Sprachwahrnehmung bei CI-Trägern. In dieser Studie unterzogen sich

postlingual Ertaubte zu definierten Zeitpunkten nach der CI-Implantation (in der Woche der CI-Implantation, nach 1, 3, 6 und 9 Monaten) verschiedenen Sprachwahrnehmungstests und EEG-Ableitungen. Während der Zeit nach der Implantation konnten dabei keine signifikanten EEG-Veränderungen beobachtet werden. Zudem besteht zwischen den Ergebnissen der EEG-Auswertung und den Resultaten der Sprachwahrnehmungstests der CI-Probanden in dieser Studie kein Zusammenhang (Purdy & Kelly, 2016).

1.5 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Anknüpfend an die bisherige Literatur, wird in der hier vorliegenden Arbeit die frühe Verarbeitung akustischer Stimuli bei postlingual, einseitig ertaubten erwachsenen CI-Trägern untersucht. In diesem Rahmen wird die Auswirkung der Implantationsseite auf die Verarbeitung von akustischen Reizen im Gehirn und somit dem Hörverstehen von CI-Trägern hinterfragt. Dabei gilt es, das Reaktions- und Antwortverhalten der Probanden sowie entsprechende EEG-Daten in Kombination mit vorliegenden Ergebnissen aus Sprachtests auszuwerten. Getestet wurde das Studiendesign vorab an normalhörenden Probanden. Diese wurden nicht als Korrelat zu den CI-Trägern ausgesucht, da sie nicht als direkte Vergleichsprobanden angesehen werden.

Ziel der Studie ist es, Unterschiede in der Verarbeitung akustischer Stimuli zwischen links- und rechtsseitig versorgten SSD-CI-Trägern aufzuzeigen. Die Hypothese war, dass es bei einfachen Tonstimuli keine Unterschiede zwischen den SSD-CI-Probanden gibt, wohingegen bei komplexen Sprachstimuli linksseitig versorgte CI-Träger ein besseres Outcome aufweisen werden als rechtsseitig Versorgte. Die dabei verwendete Methode der EEG gilt es in diesem Rahmen zu evaluieren. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse soll die bisherige Forschung zum Einfluss der CI-Implantationsseite bei Personen mit einseitiger Gehörlosigkeit dahingehend ergänzt werden, Defizite im Sprachverstehen zwischen den beiden SSD-CI-Gruppen aufzudecken und diese somit gezielter während der Phase der Rehabilitation und Nachsorge reduzieren zu können.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchspersonen

Ein positives Votum der Ethikkommission der Universität Magdeburg lag für diese Studie vor. Die Teilnehmer wurden sowohl schriftlich als auch mündlich über die Studie aufgeklärt und unterschrieben anschließend eine Einverständniserklärung. Zudem erhielt jeder Proband für jede absolvierte Stunde eine Aufwandsentschädigung von zehn Euro.

In der vorliegenden Studie nahmen insgesamt 27 Probanden im Alter von 21 bis 76 Jahren (11 weiblich, 16 männlich) im Zeitraum von Juli 2018 bis Dezember 2019 teil. Die Teilnehmer wurden in 3 Gruppen eingeteilt. Zuerst erfolgte das Experiment an normalhörenden Probanden. Danach folgte die Messung von einseitigen CI-Trägern, die im Nachfolgenden in links- und rechtsseitige CI-Probanden unterschieden werden.

Die normalhörende Gruppe bestand aus 13 Probanden, deren Hörschwellen bezogen auf Alter und Geschlecht der DIN EN ISO 7029 von 2017 entsprachen. Von der Studie ausgeschlossen wurden Personen, die außerhalb dieser Norm lagen. In dieser Gruppe waren alle Teilnehmer Rechtshänder und das Durchschnittsalter lag bei $27 \pm 5,2$ Jahren (Altersspanne von 21-39 Jahren). Alle Normalhörenden waren zur Ermittlung der Sprachlateralisierung vorab in einer Magnetresonanztomografie (MRT) und zeigten dort eine hauptsächliche Verarbeitung von Sprache in der linken Hemisphäre mit Ausnahme eines Probanden, der Sprache vorrangig rechts verarbeitete.

Zudem wurden 14 SSD-Probanden mit einseitiger CI-Versorgung aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg zur Teilnahme einbezogen. Hierbei waren 13 der Probanden Rechtshänder und einer beidhändig. Das durchschnittliche Alter dieser Gruppe lag bei $60 \pm 10,4$ Jahren (Altersspanne von 43-77 Jahren). Dabei unterschied sich das Durchschnittsalter zwischen den beiden CI-Gruppen nicht wesentlich (CIL: $60 \pm 11,9$ Jahre; CIR: $61 \pm 9,7$ Jahre). Insgesamt 7 Patienten trugen das Implantat im linken und 7 im rechten Ohr. Die Gründe für die Versorgung sind vielseitig und in Tabelle 01 aufgezeigt. Im Durchschnitt erfolgte der operative Eingriff vor 2 Jahren. Dabei lag die kürzeste Versorgungszeit bei ca. 5 Monaten und die längste bei ca. 5 Jahren (Tabelle 02). Die durchschnittliche Nutzungsdauer der CIL-Gruppe lag zum Zeitpunkt der Datenerhebung seit der CI-Implantation bei etwa $2,6 \pm 1,6$ Jahren und die der CIR-Gruppe bei $1,7 \pm 1,1$ Jahren. Bei den von der Universitätsklinik verwendeten Implantaten handelt es sich um Modelle der Firmen Cochlear® und MED-EL. Dabei waren 6 der 14 Implantate mit Geräten von Cochlear® und 8 mit Geräten von MED-EL versorgt. Die Hörschwellen der jeweils normalhörenden Ohren lagen bei den CIL-Probanden im Durchschnitt bei etwa 14 dB und bei den CIR-Trägern bei ca. 20 dB.

Von den insgesamt 27 gemessenen Probanden konnten die Daten von drei normalhörenden Personen nicht berücksichtigt werden. Eine durchgeführte Kontrollmessung musste verworfen werden, da nachfolgende unter veränderten standardisierten Bedingungen stattfanden. Ein anderer Normalhörender wurde im Datensatz nicht mitberücksichtigt, da anzunehmen ist, dass er aufgrund einer neurologischen Erkrankung mit einem Tremor des Kopfes die Ergebnisse durch zu hohe Muskelaktivitäten verfälschen würde. Schließlich wurde auch ein Proband, der Sprache nachweislich auf der rechten Hemisphäre verarbeitet von den Analysen ausgeschlossen, da anzunehmen ist, dass bei einem Großteil der CI-Patienten die Sprachverarbeitung in der linken Hemisphäre stattfindet.

Name	Ursache der CI-Versorgung	CI-Seite	Implantat-Firma	SP-Modell
CI01	Morbus Menière	rechts	Med-EI	Sonnet
CI02	Revision der Rundfenstermembran	rechts	Cochlear	Kanso
CI03	Hörsturz	links	Med-EI	Sonnet
CI04	progredient	links	Med-EI	Sonnet
CI05	Hörsturz	links	Cochlear	Kanso
CI06	Hörsturz	rechts	Med-EI	Rondo 2
CI07	Hörsturz	links	Cochlear	CP910
CI08	progrediente Hörstürze	rechts	Cochlear	CP1000
CI09	Hörsturz bei Morbus Menière	links	Med-EI	Sonnet
CI10	Hörsturz	links	Med-EI	Sonnet
CI11	Hörsturz	rechts	Cochlear	Kanso
CI12	Revision einer Rundfenstermembranruptur	rechts	Cochlear	CP910
CI13	seit Hörsturz progredient	rechts	Med-EI	Sonnet
CI14	Verschluss einer arteriovenösen Fistel im Bereich des Sinus cavernosus mit vestibulochochleärer Störung	links	Med-EI	Opus2

Tabelle 01: Ursachen und Modellbezeichnungen der Cochleaimplantat-Versorgung

Name	CI-Seite	CI-Tragezeit	Ertaubungszeit vor CI-Implantation
CI01	rechts	2 Jahre, 6 Monate	progredient über 15 Jahre
CI02	rechts	2 Jahre, 2 Monate	3 Monate
CI03	links	1 Jahr, 6 Monate	5 Jahre
CI04	links	2 Jahre, 9 Monate	progredient über 8 Jahre
CI05	links	1 Jahr, 6 Monate	progredient über 21 Jahre
CI06	rechts	1 Jahr, 3 Monate	1 Jahr, 4 Monate
CI07	links	4 Jahre	progredient über 9 Jahre
CI08	rechts	6 Monate	progredient über 5 Jahre
CI09	links	6 Monate	3 Jahre, 10 Monate
CI10	links	3 Jahre, 2 Monate	1 Jahr, 5 Monate
CI11	rechts	5 Monate	5 Jahre, 10 Monate
CI12	rechts	3 Jahre, 6 Monate	11 Monate
CI13	rechts	1 Jahr, 5 Monate	13 Jahre, 9 Monate
CI14	links	5 Jahre, 3 Monate	5 Monate

Tabelle 02: CI-Tragezeit zum Zeitpunkt des Experimentes und Ertaubungszeit vor CI-Implantation der CI-Träger

2.2 Hördiagnostik

Normalhörende Probanden

Bei jedem normalhörenden Probanden wurde im Leibniz Institut für Neurobiologie in Magdeburg eine Tonschwellenaudiometrie mittels Schall- und Knochenleitung per Kopfhörer in einer schalldichten Kammer durchgeführt. Am Oldenburger Satztest (OLSA) nahmen 8 der 13 normalhörenden Probanden teil. Bei diesem Sprachtest mussten 20 kurze Sätze aus fünf Wörtern verstanden werden, die zum Teil semantisch sinnfrei sind (Bsp.: „Peter hat sieben nasse Schuhe.“) (Wagener et al., 1999). Dabei erreichten die Normalhörenden eine Sprachverständlichkeit von 98-100 % bei 65 dB ohne Störgeräusch, weshalb davon ausgegangen wurde, dass dieses Ergebnis repräsentativ für die gesamte Gruppe ist.

Des Weiteren erfolgte für die Normalhörenden ein Sprachlateralisierungstest mithilfe von funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) nach Fernández et al. (Fernández et al., 2001). Hierdurch wurde anhand von visuell dargebotenen Buchstabenketten und Wörtern ermittelt, auf welcher Seite des Gehirns und mit welchen Arealen die Probanden Sprache vorrangig verarbeiten. Es handelt sich hierbei um einen visuellen Test, bei dem die Probanden zum einen bedeutungslose Wortketten und zum anderen die Bedeutung von Wörtern (z.B. Opa – Großvater) auf Gleichheit miteinander vergleichen sollten. Die eingeschlossenen normalhörenden Probanden der hier vorliegenden Studie zeigten dabei im Test eine Verarbeitung von Sprache vorrangig in der linken Hirnhemisphäre.

SSD-CI-Probanden

Die Gruppen der CI-Probanden erhielten eine Tonschwellenaudiometrie des normalhörenden Ohres und eine Aufblähkurve des CI-Ohres unter audiologischen Standardbedingungen bei einem ihrer regulären Termine zur CI-Sprechstunde in der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Sie absolvierten den Freiburger Zahlen- und Einsilbertest im Freifeld nach Hahlbrock (Hahlbrock, 1953). Beim Zahlentest wurden dem Hörer Zahlenblöcke mit jeweils 10 Zahlen mit blockweise abfallender Lautheit angeboten. Hierbei wird ermittelt, bei welcher Lautstärke der Hörer ein 50%iges Zahlenverstehen hat. Beim Einsilbertest wurden dem Hörer 20 einsilbige Substantive bei 65 dB dargeboten. So wurde gemessen, wie viel Prozent der dargebotenen Wörter richtig verstanden wurden. Beide Ohren wurden jeweils seitengetreunt voneinander im Freifeld untersucht. Dafür wurde bei der Messung des normalhörenden Ohres das CI abgelegt und bei der Messung des CI-Ohres das normalhörende Ohr durch ein Breitbandrauschen per Kopfhörer vertäubt. Durch diese Tests konnte die Sprachverständlichkeit der Probanden ermittelt werden.

Danach folgte der Oldenburger Satztest unter Ruhebedingungen mit dem CI-Ohr. Wenn 80% der Sätze bei 65 dB richtig wiedergegeben werden konnten, wurde der Test im Störgeräusch wiederholt. Dabei werden die Sätze kombiniert mit einem OLSA-Rauschen als Störsignal präsentiert. Dadurch war es nach Döge et al. möglich die Verständlichkeit von Sprache im Störgeräusch zu testen (Döge et al., 2017). Wurde hierbei ein ausreichend gutes Ergebnis der Signal-to-Noise Ratio (S/N, Signal-Rausch-Verhältnis) erzielt, das besser als 2,5 dB S/N war, konnten die Patienten an dieser Studie teilnehmen. Die Ergebnisse der jeweiligen Tests sind in Tabelle 03 ersichtlich.

Insgesamt 7 CI-Probanden absolvierten vor ihrer CI-Implantation den gleichen Sprachlateralisierungstest im fMRT wie die Normalhörenden. Es zeigte sich, dass sie Sprache vorrangig in der linken Hirnhemisphäre verarbeiten.

Name	CI-Seite	OLSA	Freiburger-Einsilbertest	
			CI-Ohr	Normalhören des Ohr
CI01	rechts	1.7 dB S/N	40%	85%
CI02	rechts	-1.7 dB S/N	98%	100%
CI03	links	-3.0 dB S/N	60%	100%
CI04	links	-0.8 dB S/N	80%	85%
CI05	links	-0.5 dB S/N	65%	100%
CI06	rechts	-0.9 dB S/N	70%	100%
CI07	links	1.3 dB S/N	65%	100%
CI08	rechts	2.1 dB S/N	75%	100%
CI09	links	0.7 dB S/N	65%	100%
CI10	links	0.9 dB S/N	50%	100%
CI11	rechts	-1.5 dB S/N	60%	75%
CI12	rechts	1.6 dB S/N	75%	100%
CI13	rechts	-3.1 dB S/N	85%	85%
CI14	links	-1.8 dB S/N	60%	100%

Tabelle 03: Sprachtestergebnisse der Cochleaimplantat-Träger vom OLSA-Test und Freiburger-Einsilbertest bei 65 dB

2.3 Die N100-Komponente der Elektroenzephalografie

Für die frühe auditorische Verarbeitung im Gehirn ist die N100 eine Komponente, die mithilfe der Elektroenzephalografie (EEG) sichtbar gemacht werden kann (Manca & Grimaldi, 2016). Die N100 ist ein negativer Ausschlag eines ereigniskorrelierten Potenzials (ERP), der sich im Detail aus 3 verschiedenen Komponenten zusammensetzt. Zuerst zeigt sich hierbei eine frontozentrale Negativierung im superioren Teil des Temporallappens, gefolgt von einem T-Komplex aus einer positiven Wellenform um 100 ms und einer negativen Welle bei ca. 150 ms im superioren temporalen Gyrus. Der letzte Anteil besteht aus einer Negativierung mit einer Latenz von etwa 100 ms, die mit einer insgesamt breiten Lokalisation etwas posterior zur ersten Komponente gelegen ist (Näätänen & Picton, 1987). Das Signal entstammt somit von postsynaptischen Potentialen kortikaler Pyramidenzellen und deren apikale Dendriten, die in der Nähe des primären auditorischen Kortex und im Temporallappen gelegen sind. Hervorgerufen werden kann die N100 durch verschiedene Veränderungen in der auditorischen Umgebung, wie akustischen Klicks, Tönen, Geräuschen und komplexer Sprache, weshalb sie als Untersuchungsgegenstand der hiesigen Arbeit gewählt wurde (Hyde, 1997). Es wurde sich für eine Latenz von 70 bis 125 ms für die N100 entschieden, da ein weitergefasster Zeitrahmen bei manchen Probanden bereits nachfolgende EEG-Komponenten wie die P200 umfasst hätte. Die Wellenform des EEG-Signals, die anhand von Amplituden und Latenzen beschrieben wird, variiert innerhalb und zwischen Probanden.

2.4 Ablauf der Experimente

2.4.1 Normalhörende Probanden

Zu Beginn jeden Experimentes, welches von der Probandin selbst durchgeführt wurde, erhielten die Probanden eine schriftliche Instruktion, die sie mit dem Ablauf des Versuchs vertraut machen sollte (Anhang 01). Bei zusätzlichen Fragen wurde des Weiteren mündlich darüber aufgeklärt.

Eine EEG-Haube der Firma „Brain Products GmbH“ wurde aufgesetzt und die aktiven Elektroden mit einem elektrolythaltigen Gel befüllt bis ein guter Hautkontakt hergestellt war (Abbildung 01). Dann setzten sich die Probanden in eine schallarme Kammer. Die Widerstände der 128 aktiven Elektroden wurden überprüft und gegebenenfalls erneut mit Gel befüllt. Es wurde darauf geachtet, dass alle Steckdosen ausgeschaltet wurden und das Licht gedimmt über eine Neonleiste eingependelt wurde. Zu Beginn und am Ende jeden Experimentes wurde eine Ruhe-EEG aufgezeichnet, bei der die Probanden für jeweils 3 Minuten erst mit geöffneten, dann mit geschlossenen Augen die Gedanken schweifen lassen sollten.

Die Teilnehmer saßen etwa 70 cm von einem 23 Zoll Bildschirm (Samsung Syncmaster T23A750) entfernt, auf dem die visuellen Stimuli präsentiert wurden und wo sie während der auditorischen Versuchsabschnitte auf ein Fixationskreuz schauen sollten. Über eine Kamera konnten die Versuchspersonen während des Experimentes beobachtet werden und mithilfe eines Lautsprechers mit dem Versuchsleiter kommunizieren. So war es möglich, den Teilnehmern vor jedem Versuchsabschnitt zu erklären, was die nächste Aufgabe war. Die Reihenfolge des Experimentes wurde dabei zufällig gewählt. Jeweils ab einer Sekunde nach Beginn eines präsentierten Stimulus war es möglich, die linke oder rechte Maustaste zum Beantworten des Reizes zu drücken. Welche Taste für welche Bedingung betätigt werden sollte, variierte unter den Probanden, um eventuell seitenabhängige Effekte zu vermeiden. Nach jedem Tastendruck erschien das nächste Wort oder Kontrollsymbol in einer zeitlichen Spanne von 1-1,3 Sekunden.

Die insgesamt 6 Teilversuche (Tabelle 04) enthielten jeweils 100 Stimuli aus Kontroll- oder Sprachbedingungen. Die Sprachbedingung setzt sich aus präsentierten Wörtern und Pseudowörtern zusammen. Pseudowörter sind Buchstabenketten, die nach phonotaktischen Regeln einer Sprache erfunden wurden (z.B. dalpe, zallo) (Wendt & Scheich, 2002).



Abbildung 01: Verwendete EEG-Haube „actiCAP 128Ch Standard-2“, Brain Products GmbH

Randomisiert wurde entweder mit der visuellen oder mit der auditorischen Aufgabenstellung (rechte oder linke Seite) begonnen und dabei zufällig gewählt, ob die Probanden mit der Unterscheidung der Wörter und Pseudowörter oder der Kontrollaufgaben beginnen. Die Wörter und Pseudowörter der Sprachbedingung wurden aus dem „WaSeP“³ entnommen und waren jeweils zu 50 % pro Teilversuch vertreten (Wendt & Scheich, 2002). Jedes Wort bzw. Pseudowort kam während eines Versuchsabschnittes nur einmal vor. Ähnlich verfahren auch Hofmann et al. und Selpien et al., die in ihren Experimenten den Einfluss der Sprachverarbeitung anhand von Wörtern und sogenannten Nichtwörtern („Nonwords“) untersuchten (Hofmann et al., 2008; Selpien et al., 2015).

CAL	Kontrollbedingung auditorisch links
CAR	Kontrollbedingung auditorisch rechts
SAL	Sprachbedingung auditorisch links
SAR	Sprachbedingung auditorisch rechts
CV	Kontrollbedingung visuell
SV	Sprachbedingung visuell

Tabelle 04: Abkürzungen der einzelnen Versuchsabschnitte des Experimentes

Auditorische Aufgaben

Für die auditorischen Aufgaben erhielten die Probanden Schlauchkopfhörer der Firma „Etymotic“ (Ear Tone 3A In-Ear Kopfhörer von Etymotic, Elk Grove Village, USA). Während des Versuchs wurde immer nur eine Seite stimuliert und die Probanden gebeten, auf das abgebildete Fixationskreuz auf dem Monitor zu schauen. Die Stimuli wurden nacheinander auf dem zu testenden Ohr präsentiert.

Wörter und Pseudowörter wurden in randomisierter Reihenfolge zu 50 % entweder von einer Frauen- oder Männerstimme mit einer Lautstärke gesprochen, die angenehm hörbar für den Probanden war. Die Länge der Wörter bzw. Pseudowörter variierte zwischen 567 und 828 ms (Mittelwert: 694 ± 58 ms).

Die auditorische Kontrolle erfolgte durch einen 700 ms langen Sinuston, bei dem die Probanden zwischen einem tiefen 1 kHz und einem hohen 4 kHz Ton unterscheiden mussten. Auch diese Stimuli kamen in randomisierter Reihenfolge.

³ gesprochenes Wortkorpus für Untersuchungen zur auditiven Verarbeitung von Sprache und emotionaler Prosodie

Visuelle Aufgaben

Bei dem visuellen Teil des Experimentes sahen die Probanden auf einen Bildschirm mit grauem Hintergrund und schwarzer Schrift. Sie wurden dazu angehalten, während des gesamten Versuches auf ein Fixationskreuz zu schauen, das mittig abgebildet wurde.

Die Wörter und Pseudowörter erschienen in randomisierter Reihenfolge zentral auf dem Monitor anstelle des Fixationskreuzes für eine Dauer von einer Sekunde. Sie hatten eine Schriftgröße von 25 Pt. in der Schriftart Arial.

Die visuelle Kontrolle bestand in der Unterscheidung einer hoch- oder tiefgestellten, gestrichelten Linie jeweils in Bezug zu dem Fixationskreuz, das während der Kontrolle auf dem Bildschirm abgebildet blieb.

2.4.2 SSD-CI-Probanden

Der Ablauf des Experimentes erfolgte bei den CI-Trägern zum Großteil entsprechend der Vorgehensweise der Normalhörenden. Entsprechende Unterschiede werden im Folgenden aufgelistet.

Vor Beginn des Experimentes wurde bei den CI-Trägern, wie auch bei Poloneko et al., die Lautstärke des Versuchs so eingestellt, dass sie angenehm und auf dem normalhörenden und dem CI-Ohr gleich laut wahrgenommen wurde (Polonenko et al., 2018). Dazu wurde eine Beispieldatei mit den im Experiment verwendeten Tönen sowie ähnlich klingende Wörter vorgespielt.

Beim Aufzeichnen der Ruhe-EEG zu Beginn und am Ende des Experimentes wurde der CI-Prozessor einmal an- beziehungsweise ausgeschaltet, um vergleichen zu können, welche Auswirkungen das Gerät auf die EEG hat.

Zudem sollten die CI-Probanden während des Experimentes nach jedem Versuchsabschnitt ihre subjektive Höranstrengung entsprechend der Skala von Krüger et al. einschätzen (Krüger, 2015). Die verwendete Skala reichte von 1 für „müheles“ bis 14 für „nur Störgeräusche“ wahrgenommen (Anhang 02). Dadurch war es möglich einen Überblick zu bekommen, wie sich die Höranstrengung bei den verschiedenen Testdurchläufen verändert. Zum Schluss wurden die Probanden gebeten, anhand eines Bewertungsbogens einzuschätzen, wie schwer und anstrengend das Experiment insgesamt für sie war (Anhang 03). Dabei sollte zudem der jeweils leichteste und schwierigste Versuchsabschnitt mit einer vergleichbaren Alltagssituation beschrieben werden (z.B. telefonieren, normales Gespräch in ruhiger Umgebung).

Beim Abspielen der auditorischen Versuche bekamen die CI-Probanden für das normalhörende Ohr entsprechende Schlauchkopfhörer, wie sie bei den Normalhörenden verwendet wurden. Wurde die normalhörende Seite getestet, wurde der Prozessor vom Implantat ausgeschaltet, damit die CI-Träger lediglich über das jeweilige zu testende Ohr hörten. Auf der Seite des Implantats wurde ein Studienprozessor des SP-Modells CP910 der Firma Cochlear®

beziehungsweise des SP-Modells Sonnet von MED-EL für alle Probanden gleich verwendet. Dieser wurde mit der individuellen Map der CI-Träger bespielt und sie erhielten darüber eine direkte Stimulation des Prozessors per Audiokabel. Auf diese Weise verfahren auch Polonenko et al. in ihrer Arbeit über kortikale Plastizität der Hörverarbeitung bei Kindern mit SSD (Polonenko et al., 2019).

2.5 EEG-Ableitung

2.5.1 EEG-Aufzeichnung

Normalhörende Probanden

Die Messung der Gehirnaktivität erfolgte mithilfe einer 128-kanaligen Ableitung (Brainamp recording system, Brain Products GmbH, München, Deutschland). Um die Spannungen erfassen zu können, wurden wie in Szalárdy et al. und Timm et al. aktive Elektroden aus Silber/Silber-Chlorid durch eine spezielle Haube an definierten Stellen positioniert (Abbildung 02) (Szalárdy et al., 2018; Timm et al., 2012). Die Besonderheit der aktiven Elektroden besteht darin, dass jede einzelne Elektrode ihren eigenen Verstärker besitzt. Die Leitfähigkeit zwischen den Elektroden und der Kopfhaut wurde durch ein elektrolythaltiges Gel verbessert und so die Impedanz im Mittel unter 20 k Ω gehalten.

Die Referenzelektrode wurde zwischen den Elektroden Fz und Cz und die Erdungselektrode zwischen Fz und Fpz in der Mittellinie platziert. Um die Augenbewegung zu registrieren, wurde eine Elektrode unter das linke Auge geklebt (VEOG-Elektrode). Für die Aufzeichnung eines Elektrokardiogramms wurden Elektroden auf das linke und rechte Schlüsselbein gesetzt (ECG und ECG2-Elektrode).

Die Reizstimulation während des Versuchs erfolgte über die Software MATLAB® R2014a (The MathWorks, Natick, MA, USA) mit der Psychtoolbox 3 (<http://psychtoolbox.org/>). Aufgezeichnet wurden die EEG-Daten vom ActiCap-System mit Brainamp von Brainproducts (Gilching, Deutschland). Die Daten der normalhörenden Probanden wurden mit einer Samplingrate von 2500 Hz aufgenommen.

Damit bei jedem Probanden die genaue Elektrodenposition und Kopfform digitalisiert werden konnte, wurde nach dem Versuch die MATLAB®-basierte Software Brainstorm zur Datenverarbeitung und Visualisierung verwendet. Dabei wurde zuerst die Position von Nasion, linkem und rechtem Sulcus helicotragicus ermittelt und als nächstes die ersten 32 Elektroden detektiert. Mit deren Hilfe wurden später die restlichen 96 Elektrodenpositionen errechnet.

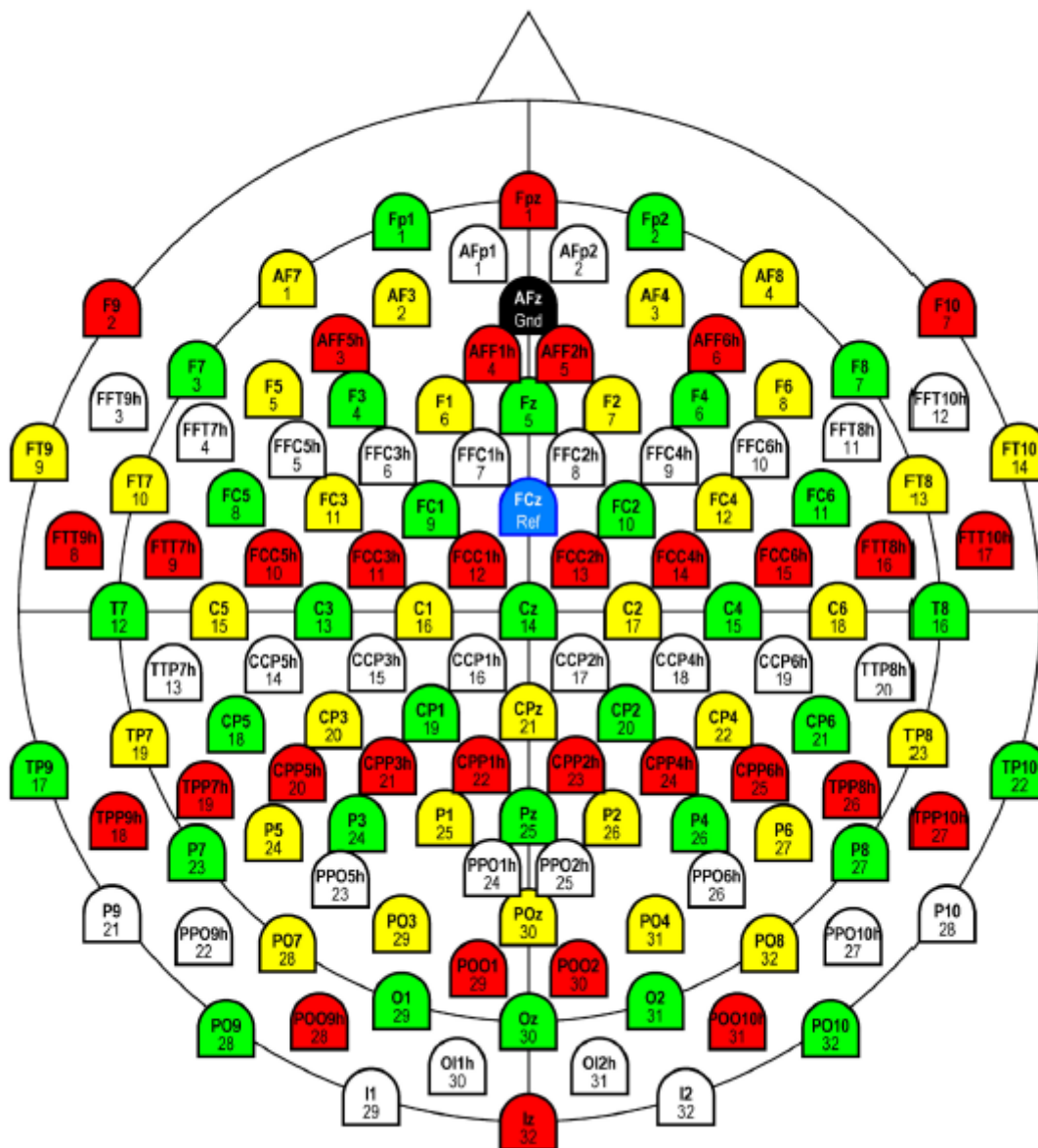


Abbildung 02: Elektrodenanordnung der EEG-Haube „actiCAP 128Ch Standard-2“,

aus: Brain Products GmbH. actiCAP-128-channel-Standard-2,

https://www.brainproducts.com/filedownload.php?path=downloads/actiCAP-128-channel-Standard-2_1201.pdf

(Brain Products GmbH)

SSD-CI-Probanden

Die EEG-Aufzeichnung erfolgte bei den CI-Probanden wie bei den Normalhörenden. Zu beachten ist jedoch, dass bei den Probanden mit CI jeweils 3 bis 6 Elektroden, die auf der Stelle der magnetischen Sendespule am Kopf saßen, individuell entfernt werden mussten. Die fehlenden Elektroden wurden durch spätere Bearbeitungsschritte interpoliert. Der Studienprozessor wurde mithilfe eines langen Spulenkabels auf die Schulter verlagert, sodass hinter dem Ohr keine weiteren Elektroden eliminiert werden mussten.

Zudem unterscheidet sich die Samplingrate der CI-Träger mit 5000 Hz von der Vorgehensweise der Normalhörenden. Der Grund für die höhere Samplingrate der CI-Probanden bestand darin, eventuelle CI-Artefakte besser korrigieren zu können.

2.5.2 EEG-Datenanalyse

Normalhörende Probanden

Die Datenbearbeitung erfolgte mithilfe der Software BrainVision Analyzer 2.1 (Brain Products GmbH, München, Deutschland) und MATLAB® R2014b. Zuerst wurden die Rohdaten in Brain Vision Analyzer mit einem Tiefpassfilter von 1 Hz und einem Hochpassfilter von 30 Hz bearbeitet. Anschließend folgte eine semiautomatische Inspektion der Daten auf den VEOG-Kanal, um Artefakte durch Lidschlussbewegungen des Auges zu detektieren. Dieser Bearbeitungsschritt wurde nochmals per Hand durchgesehen und eventuell nicht erkannte Bewegungen wie Blinzeln oder Augenrollen gekennzeichnet. Im Anschluss folgte eine allgemeine Dateninspektion auf generelle Artefakte. Dabei war eine maximale Spannungsdifferenz von 50 $\mu\text{V}/\text{ms}$, eine minimale bzw. maximale Amplitude von -200 μV und 200 μV sowie eine geringste Aktivität von 0,5 μV erlaubt. Alles, was außerhalb dieses Bereiches lag, wurde als Artefakt gedeutet.

Wenn es nötig war, wurden Kanäle, die mehr als 1 % Artefakte aufwiesen, interpoliert. Das heißt, dass bei Elektroden mit schlechtem Signal, dieses anhand der Mittelung umliegender Kanäle erzeugt wurde. Danach wurde eine neue Referenz für alle Elektroden bestimmt, die sich nicht mehr auf die Referenzelektrode bezog, sondern auf eine Mittelung aller Elektroden (Fabbri-Destro et al., 2015). Dadurch konnte vermieden werden, dass Kanäle, die nah zur Referenzelektrode gelegen sind, zu kleine Signale anzeigen, da die Spannungsdifferenz aufgrund der geringen Entfernung zueinander geringer ist. Ausgenommen hiervon wurden die Hautelektroden VEOG, ECG und ECG2.

Die Daten wurden zuerst in die 6 Versuchsabschnitte gegliedert und dann anhand der Stimuli segmentiert, wobei bei den Sprachbedingungen in Substantive, Pseudowörter und beide Kategorien zusammen unterschieden wurde. Ein Segment hatte jeweils eine Länge von 600ms (100ms vor und 500ms nach dem Stimulusbeginn).

Die weitere Bearbeitung und Auswertung erfolgte über MATLAB®. Dazu wurden die segmentierten Daten von BrainVision Analyzer nach MATLAB® exportiert. Es folgte eine Baseline-Korrektur in der Zeit von 100 ms bis zum Stimulus und die Mittelung des jeweiligen Versuchsabschnittes über alle Trials („Averaging“). Hierdurch ergaben sich die Event-related Potentials (ERP) der Probanden. Dabei entstanden optimalerweise bei den Kontrollbedingungen je 100 Trials und bei den Sprachbedingungen jeweils 50 Substantive und 50 Pseudowörter. Bei einigen Teilversuchen war dies beispielsweise aufgrund zu hoher Lidschlussaktivität des Probanden nicht möglich, wodurch weniger Trials erhalten blieben.

Aus den ERP's wurden CSD-Signale (CSD: Current Source Density) erstellt. Hierbei handelt es sich um die zweite räumliche Ableitung der Spannungsverteilung auf der Kopfoberfläche. Anhand der CSD-Signale der Teilversuche folgte die Identifizierung von markanten Peaks im Zeitfenster der N100 von 70 bis 125 ms mithilfe der Global Field Power (GFP). Diese ist die Standardabweichung der CSD und eine räumliche Signalleistung, um die mit der N100-Dipolstruktur verbundenen Spannungsmuster auf der Kopfoberfläche zu detektieren (Murray et al., 2008). Die so ermittelten lokalen Maxima bildeten die Grundlage der statistischen Analyse. Ähnlich verfahren auch Daliri et al, die die Veränderung der auditorischen Antwort auf Sprach- beziehungsweise Nichtsprachstimuli („Nonspeech Stimuli“) in einem Zeitfenster von 70 bis 130 ms nach dem Stimulus untersuchten (Daliri & Max, 2016).

SSD-CI-Probanden

Die EEG-Datenanalyse der CI-Probanden entsprach den Kriterien der Normalhörenden. Hinzu kam, dass bei den CI-Trägern die Elektroden, die über der Sendespule saßen und deshalb herausgenommen werden mussten, zusätzlich durch Interpolation bearbeitet wurden.

Bei 3 der 14 CI-Trägern war es zudem nötig, vor der Datensegmentierung eine Korrektur von Pulsartefakten durchzuführen, was mithilfe des Algorithmus „CB Correction“ von Brain-Vision Analyzer gelang.

Nach der Datenübertragung zu MATLAB® wurde zuerst die Samplingrate der CI-Träger von 5000 Hz auf 2500 Hz herabgesetzt und somit den Daten der Normalhörenden angeglichen. Weitere Schritte folgten anschließend entsprechend der Vorgehensweise der Normalhörenden.

2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe des Programmes IBM® SPSS® Statistics 21. Das Signifikanzniveau lag bei allen Auswertungen bei $\alpha = 0,05$. Dieser Wert wurde nicht auf multiples Testen korrigiert, da die Arbeit als explorativ zu betrachten ist. Mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurde auf Normalverteilung getestet.

Die Werte des Reaktions- und Antwortverhaltens waren nicht normalverteilt und wurden mittels nicht-parametrischer Tests analysiert. Aus diesem Grund wurde der Median für die Vergleiche herangezogen. Für Tests zwischen den Gruppen wurde dabei der Mann-Whitney-U-Test und bei Vergleichen innerhalb der Gruppe der Wilcoxon-Test angewandt. Die Kontrollaufgaben wurden entsprechend unserer Aufgabenstellung statistisch zweiseitig getestet, die Sprachbedingungen einseitig.

Die gewonnenen Amplituden und Latenzen der GFP-Peaks zeigten eine Normalverteilung, weshalb hier jeweils die Mittelwerte als Vergleiche dienten. Über eine ANOVA erfolgte

eine zweifaktorielle Varianzanalyse anhand der Faktoren ‚Gruppe‘ und ‚Stimulationsseite‘ getrennt nach Kontroll- und Sprachbedingungen. Als Post-hoc-Test wurde der paarweise Vergleichstest nach Gabriel verwendet. Bei Untersuchungen zwischen den Gruppen ‚Normalhörend‘, ‚CIL‘ und ‚CIR‘ wurde der T-Test für unabhängige Stichproben, bei Analysen innerhalb der jeweiligen Gruppen der T-Test für gepaarte Stichproben verwendet.

Die Ergebnisse der Tests werden im Folgenden als Boxplots dargestellt. Der Strich in der Box kennzeichnet jeweils den Median. Punkte außerhalb der Box markieren Ausreißer, die oberhalb des 3. Quartils (bzw. unterhalb des 1. Quartils) und zusätzlich größer als der 1,5-fache Interquartilsabstand sind. Sterne außerhalb der Box sind Ausreißer, die oberhalb des 3. Quartils (bzw. unterhalb des 1. Quartils) und zusätzlich größer als der 3-fache Interquartilsabstand sind. Die Skalierung der y-Achse wurde in manchen Fällen aus Gründen der besseren Sichtbarkeit angepasst. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) werden anhand von schwarzen Linien mit 3 Kreuzen, Trends in den Ergebnissen ($0,05 \leq p \leq 0,1$) mit schwarzen Linien und einem Kreuz über den jeweiligen Bedingungen oder Gruppen dargestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Auswertung der Sprachtests der CI-Probanden und der Höranstren- gung während des Experimentes

Beide CI-Gruppen absolvierten im Vorfeld des Experimentes den Freiburger Zahlen- und Einsilbertest im Freifeld seitengetreunt mit dem normalhörenden und mit dem CI-Ohr. Anschließend folgte zusätzlich der Oldenburger Satztest unter Ruhebedingungen und im Störgeräusch mit dem CI-Ohr. Bei allen Versuchen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen der links- und rechtsseitigen CI-Träger (Abbildung 03).

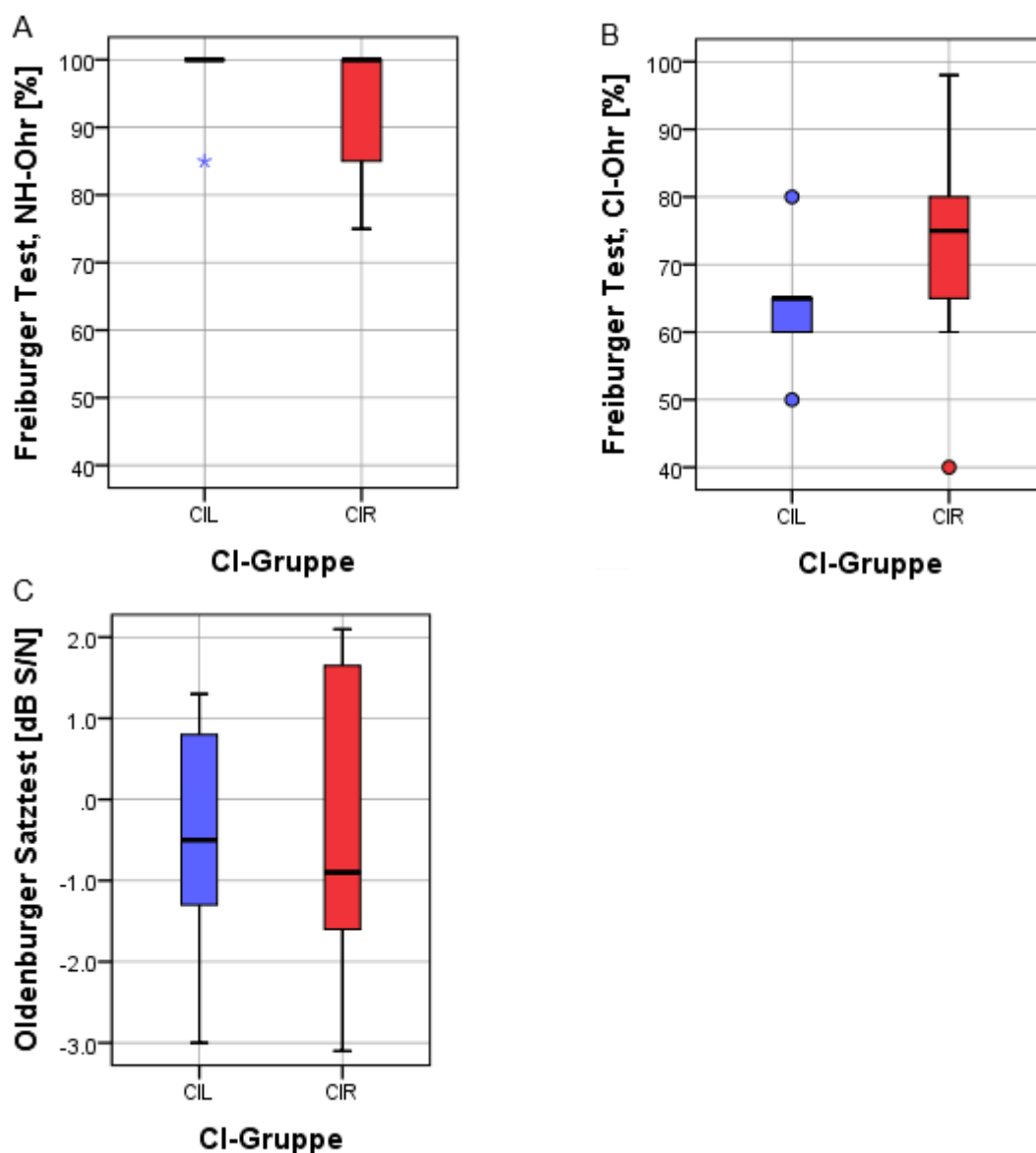


Abbildung 03: Ergebnisse der CI-Probanden vom Freiburger Zahlen- und Einsilbertest mit dem normalhörenden und dem CI-Ohr sowie vom Oldenburger Satztest mit dem CI-Ohr im Störgeräusch

Die subjektiven Einschätzungen der Höranstrengung jedes CI-Probanden nach jedem Teilversuch sind in Tabelle 05 dargestellt.

Zwischen **beiden CI-Gruppen** zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der Höranstrengung der auditorischen Kontrollen und den visuellen Bedingungen. Die subjektive Einschätzung liegt in beiden Gruppen bei diesen Versuchen durchschnittlich etwa bei einem Wert von 3, der für „sehr wenig anstrengend“ steht. Bei den auditorischen Sprachbedingungen gibt es hingegen Unterschiede zwischen den links- und rechtsseitigen CI-Trägern. So antworten die Gruppen bei der Bedingung SAR signifikant verschieden ($p < 0,001$), wobei die CIL-Gruppe die Höranstrengung mit einem Wert von etwa 3 und die CIR-Gruppe mit 9 („deutlich anstrengend“) einschätzt. Ein Trend zeigt sich bei der Bedingung SAL ($p = 0,059$), die von linksseitigen CI-Trägern mit einem Wert von etwa 8 eingeschätzt wird, von der CIR-Gruppe hingegen mit einem Wert von 4.

Innerhalb der **CIL-Träger** gibt es jeweils keine signifikant verschiedene Einschätzung der Höranstrengung zwischen den beiden auditorischen Kontrollen sowie den beiden visuellen Bedingungen. Die Bewertung der auditorischen Sprachbedingungen zeigt jedoch eine signifikant unterschiedliche Einschätzung ($p = 0,012$). So geben die Probanden bei dem Teilversuch SAL eine Anstrengung von einem Wert von 8 an, bei SAR nur von etwa 3.

Ähnlich wie bei den CIL-Trägern zeigt sich auch die Einschätzung der **CIR-Gruppe**. Zwischen den beiden auditorischen Kontrollen sowie beiden visuellen Versuchen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede, anders als bei den auditorischen Sprachbedingungen ($p = 0,003$). Hierbei wird der Teilversuch SAR von den CIR-Trägern mit einem Wert von etwa 9 in der Höranstrengung bewertet, der Abschnitt SAL nur mit einem Wert von 4.

Name	CI-Seite	Höranstrengung bei den Versuchsabschnitten					
		CAL	CAR	SAL	SAR	CV	SV
CI01	rechts	3	3	7	8	5	5
CI02	rechts	1	7	3	7	1	1
CI03	links	1	1	8	1	1	1
CI04	links	5	5	5	5	5	5
CI05	links	5	5	8	5	5	5
CI06	rechts	1	5	9	11	7	7
CI07	links	1	1	9	1	1	1
CI08	rechts	1	7	4	9	1	1
CI09	links	1	1	11	1	1	1
CI10	links	1	1	2	1	2	2
CI11	rechts	1	1	1	7	1	1
CI12	rechts	1	1	5	13	1	3
CI13	rechts	3	1	1	7	3	1
CI14	links	5	5	13	6	5	5

Tabelle 05: Bewertung der Höranstrengung der einzelnen Versuchsabschnitte durch die CI-Probanden, CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

3.2 Analyse des Reaktions- und Antwortverhaltens

3.2.1 Trefferquote

Die Trefferquote beschreibt den Anteil der richtig beantworteten Aufgaben jedes Versuchsabschnittes. Tabelle 06 zeigt die durchschnittlichen Mediane der Trefferquoten der verschiedenen Gruppen. In den Abbildungen 04 bis 07 sind die Trefferquoten der einzelnen Gruppen und ihre Ergebnisse im Vergleich zueinander dargestellt.

Bedingung \ Gruppe	Gruppe		
	Normalhörende	linksseitige CI-Träger	rechtsseitige CI-Träger
CAL	100,0 %	99,0 %	100,0 %
CAR	100,0 %	98,0 %	100,0 %
SAL	99,5 %	79,0 %	99,0 %
SAR	99,0 %	97,0 %	86,0 %
CV	100,0 %	99,0 %	100,0 %
SV	99,5 %	99,0 %	98,0 %

Tabelle 06: Mediane der Trefferquoten pro Gruppe und Bedingung,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

Vergleiche innerhalb der Gruppen

Die Trefferquote in der **normalhörenden Gruppe** liegt, wie man aus der Tabelle 06 entnehmen kann, im Mittel bei ca. 100 %. Demnach ergeben sich innerhalb der Gruppe keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedingungen.

Die **CIL-Träger** beantworten einen Großteil der Experimentabschnitte (CAL, CAR, SAR, CV, SV) im Mittel zu ca. 98 % richtig. In einem Teilversuch schneidet die Gruppe jedoch signifikant schlechter ab. Wie in Abbildung 05 zu sehen ist, handelt es sich dabei um die auditive Sprachbedingung der linken Seite (SAL), die nur zu ca. 79 % von den Probanden richtig beantwortet wurde. Daraus ergibt sich ein signifikanter Unterschied gegenüber der Kontrollbedingung derselben Seite (CAL, $p = 0,016$) und im Vergleich zur andersseitigen Sprachbedingung (SAR, $p = 0,008$). Im Hinblick auf die anderen Versuchsabschnitte ergeben sich innerhalb der Gruppe keine weiteren signifikanten Unterschiede.

Ein ähnliches Verhalten wie in der CIL-Gruppe zeigt sich ebenfalls in der Gruppe der **rechtsseitigen CI-Träger**. Diese Probanden beantworten die Aufgaben CAL, CAR, SAL, CV, SV im Durchschnitt zu ca. 99 % richtig, mit Ausnahme des Teilversuches SAR, bei dem der Median der Gruppe bei 86 % liegt. Verglichen zur Kontrollaufgabe der gleichen Stimulationsseite (CAR) ergibt sich dabei ein signifikanter Unterschied ($p = 0,031$), genauso wie im Vergleich zur Sprachbedingung SAL ($p = 0,008$).

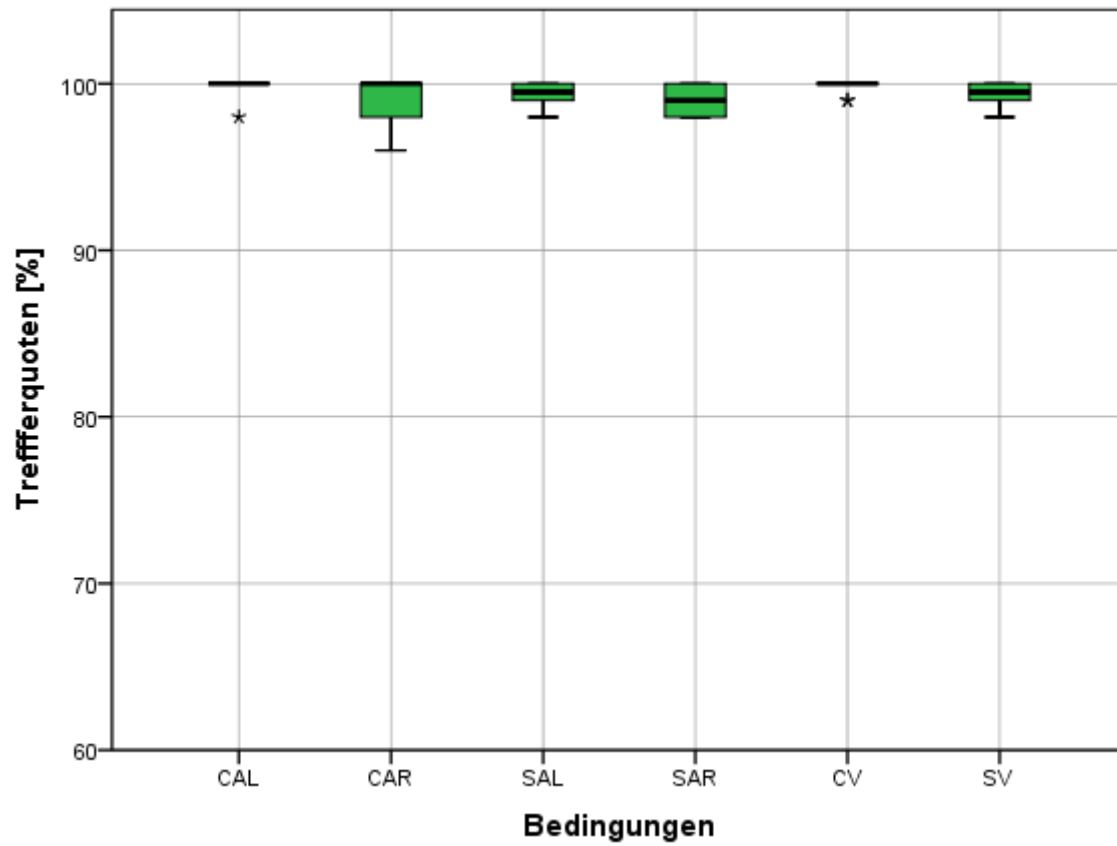


Abbildung 04: Boxplots der Trefferquoten der normalhörenden Gruppe pro Bedingung, CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

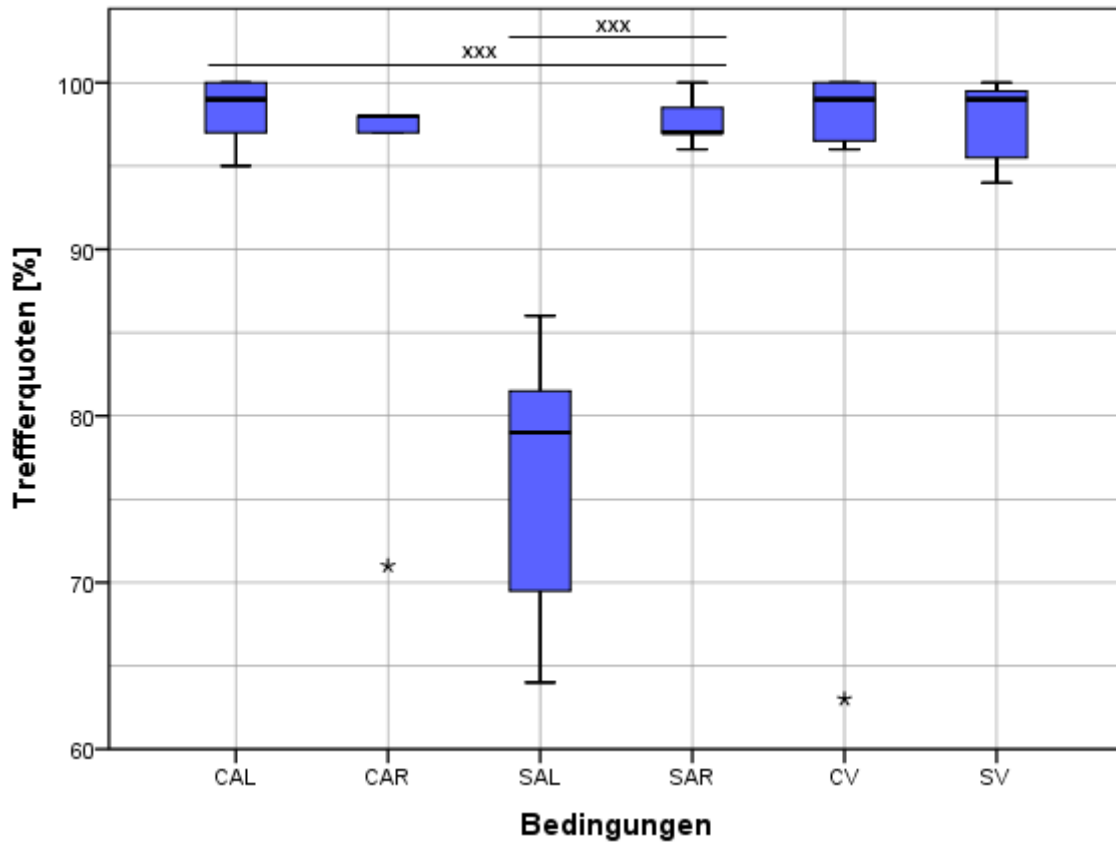


Abbildung 05: Boxplots der Trefferquoten der linksseitigen CI-Träger pro Bedingung,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

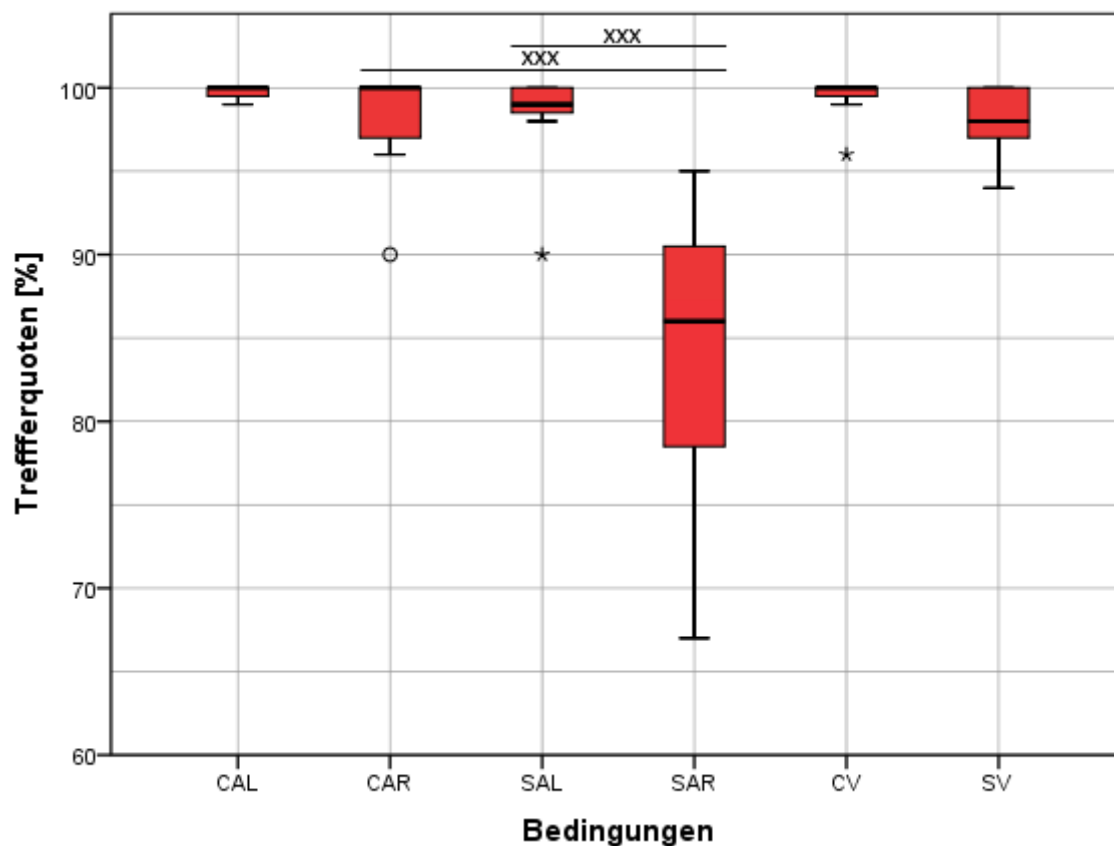


Abbildung 06: Boxplots der Trefferquoten der rechtsseitigen CI-Träger pro Bedingung,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

Vergleiche zwischen den Gruppen

Anhand der Abbildung 07 sieht man, dass die Trefferquoten der **CIL-Gruppe** gegenüber den **Normalhörenden** im Durchschnitt etwas geringer sind. In den folgenden Versuchsabschnitten ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen: CAR ($p = 0,014$), SAL ($p < 0,001$) und SAR ($p = 0,021$). Hierbei ist vor allem die Differenz in der linksseitigen Sprachbedingung (SAL) mit etwa 20 % am größten (Tabelle 06). Im Trend deutet sich ein Unterschied in der visuellen Kontrollbedingung ($p = 0,06$) an, in der die CI-Träger ebenfalls eine etwas geringere Trefferquote als die Normalhörenden aufzeigen.

Vergleicht man die **NH- und CIR-Gruppe** miteinander, weichen die Ergebnisse der Trefferquoten nicht wesentlich voneinander ab. Eine Ausnahme hiervon bildet die Bedingung SAR, bei der die CI-Träger im Mittel bis zu 13 % signifikant schlechtere Werte zeigen. ($p < 0,001$). Zwischen den weiteren Versuchsteilen gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

Stellt man die Ergebnisse der Trefferquoten **beider CI-Gruppen** gegenüber, ergeben sich bis auf die auditorischen Sprachbedingungen keine wesentlichen Unterschiede. Im Versuchsabschnitt SAL weisen die CIL-Träger ($p < 0,001$) und im Abschnitt SAR die CIR-Träger ($p < 0,001$), eine signifikant geringere Ergebnisquote auf als die jeweils andere Probanden-
gruppe.

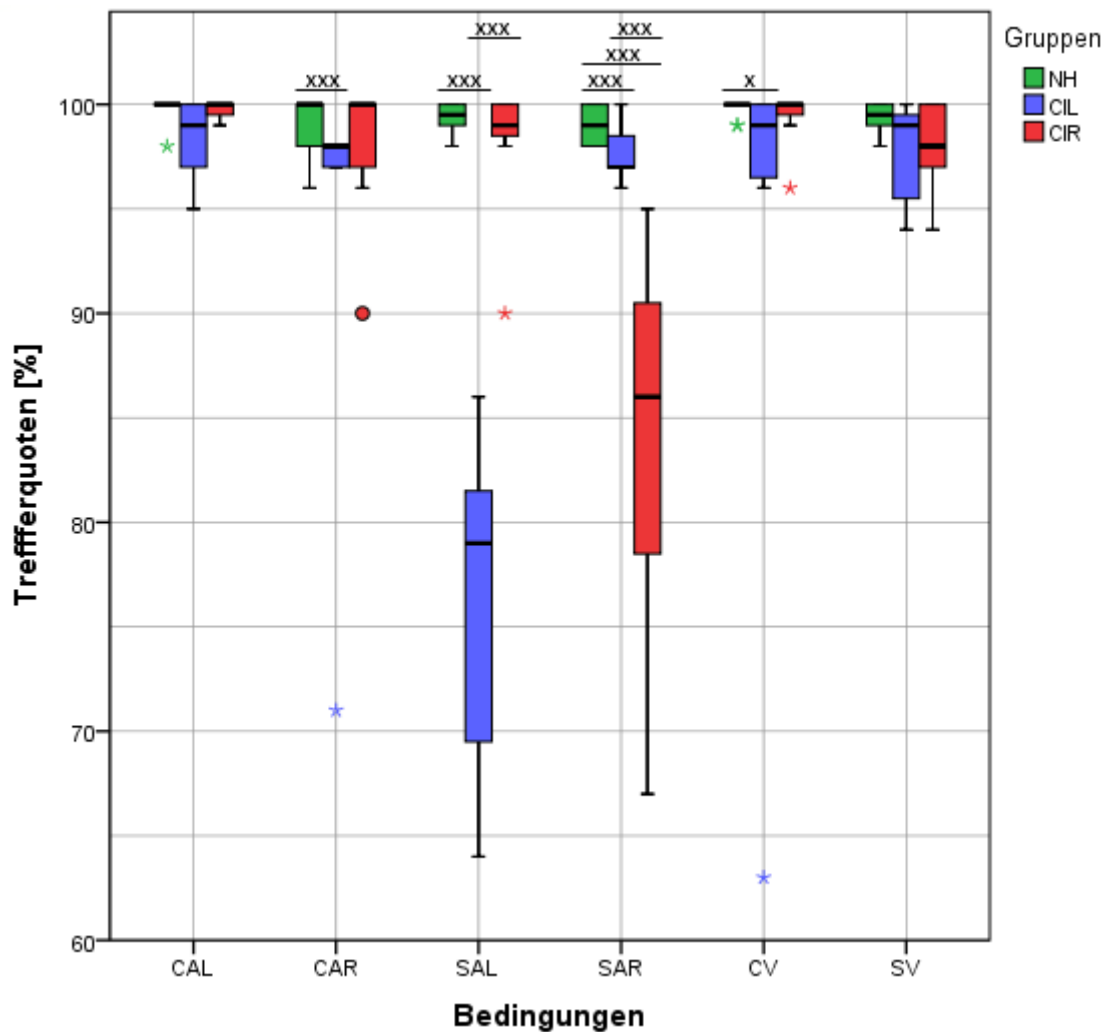


Abbildung 07: Boxplots der Trefferquoten der 3 Gruppen pro Bedingung,

NH: normalhörende Gruppe, CIL: linksseitige CI-Träger, CIR: rechtsseitige CI-Träger,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

3.2.2 Reaktionszeit

Die Grenzen für die Reaktionszeiten wurden aus dem jeweiligen Mittelwert und ihrer doppelten Standardabweichung für jeden Probanden individuell berechnet. Zeiten, die über diesem Maß lagen, wurden als Ausreißer definiert und blieben in der Analyse unberücksichtigt. So wurden Ausreißer einzelner Antworten jedes Probanden eliminiert. Das bedeutet, dass einzelne Probanden weiterhin ein stark abweichendes Verhalten im Vergleich zur Gesamtgruppe zeigen können, sodass Ausreißer über alle Probanden hinweg existieren, was in den folgenden Abbildungen zu sehen ist.

Tabelle 07 zeigt die durchschnittlichen Mediane der Reaktionszeiten der verschiedenen Gruppen. In den Abbildungen 08 bis 11 sind die Reaktionszeiten der einzelnen Gruppen und ihre Ergebnisse im Vergleich zueinander dargestellt.

Gruppe / Bedingung	Normalhörende	linksseitige CI-Träger	rechtsseitige CI-Träger
CAL	1.120 ms	1.040 ms	1.070 ms
CAR	1.110 ms	1.100 ms	1.080 ms
SAL	1.150 ms	1.390 ms	1.080 ms
SAR	1.170 ms	1.130 ms	1.290 ms
CV	1.180 ms	1.420 ms	1.380 ms
SV	1.440 ms	1.370 ms	1.440 ms

Tabelle 07: Mediane der Reaktionszeiten pro Gruppe und Bedingung,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

Vergleiche innerhalb der Gruppen

Die **normalhörende Gruppe** reagiert im Mittel innerhalb von ca. 1.200 ms auf den Stimulus (Tabelle 07). Von diesem Wert weicht die Reaktionszeit der visuellen Sprachbedingung mit 1.440 ms ab, was sich als signifikanter Unterschied gegenüber der visuellen Kontrollbedingung widerspiegelt ($p = 0,027$). Solch ein Antwortverhalten zeigt sich innerhalb der auditorischen Versuchsabschnitte zwischen Kontroll- und Sprachbedingungen nicht. Des Weiteren zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Reaktionszeiten bezogen auf die Stimulationsseiten bei den auditorischen Versuchen.

Abbildung 09 zeigt, dass die **linksseitigen CI-Träger** im Mittel längere Reaktionszeiten für die visuellen als für die auditorischen Aufgaben benötigen. Der Unterschied liegt hierbei im Schnitt bei ca. 23 ms. Mit einer Reaktionszeit von durchschnittlich 1.390 ms antwortet die Gruppe für die Bedingung SAL bedeutend langsamer als für andere auditorische Bedingungen. Gegenüber der rechtsseitigen Sprachbedingung zeigt sich hierbei ein signifikanter Unterschied ($p = 0,008$).

Auch die **CIR-Probanden** zeigen im Mittel um ca. 28 ms längere Reaktionszeiten für die visuellen Abschnitte im Vergleich zu den auditorischen Versuchen. Des Weiteren sieht man in Abbildung 10, dass die Gruppe längere Reaktionszeiten für die Bedingung SAR benötigt. Im Vergleich zur Kontrollaufgabe der gleichen Seite (CAR, $p = 0,039$) und zur linksseitigen Sprachbedingung (SAL, $p = 0,016$) liegen dabei erkennbar signifikante Unterschiede vor.

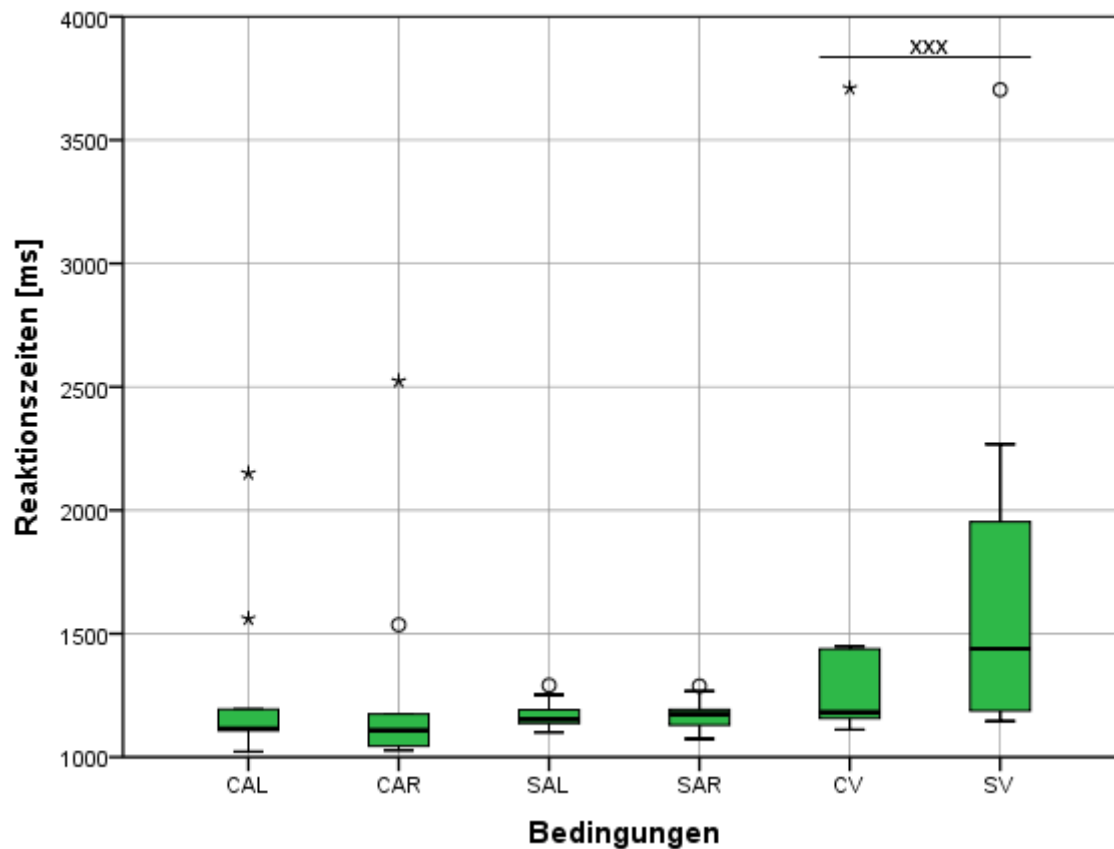


Abbildung 08: Boxplots der Reaktionszeiten der normalhörenden Gruppe pro Bedingung,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

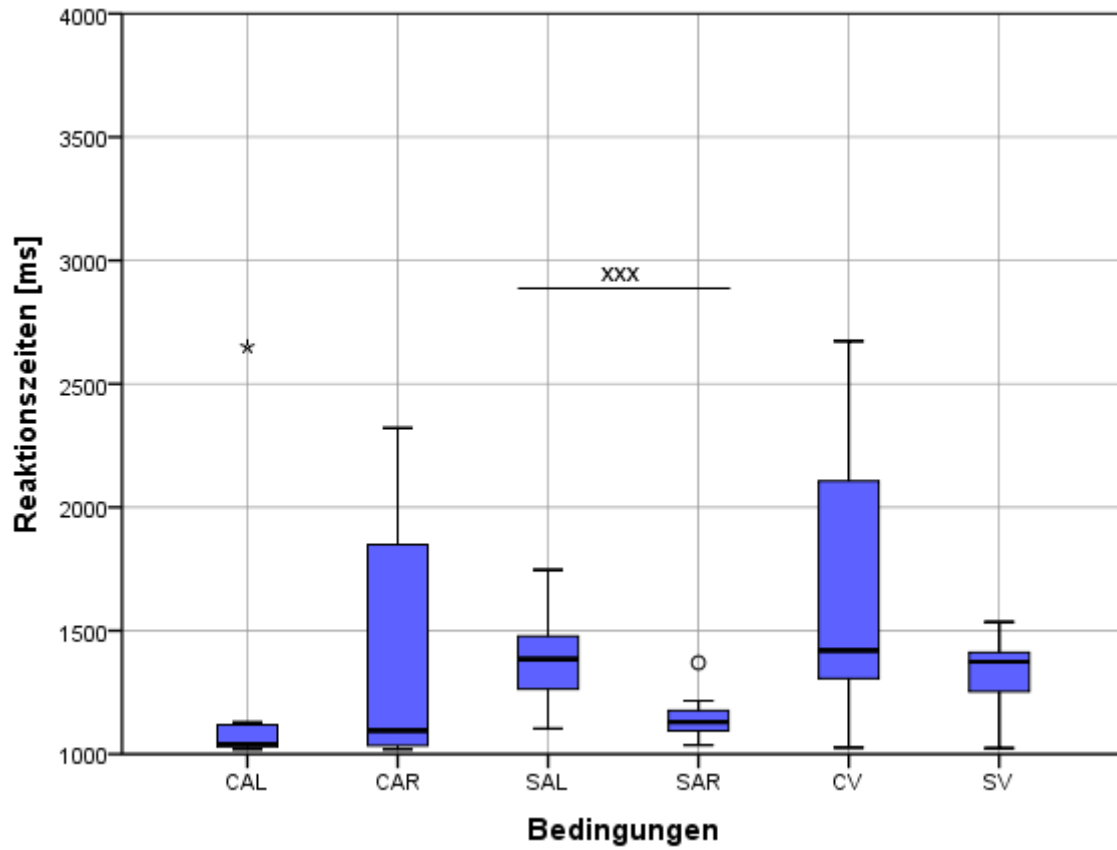


Abbildung 09: Boxplots der Reaktionszeiten der linksseitigen CI-Träger pro Bedingung,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

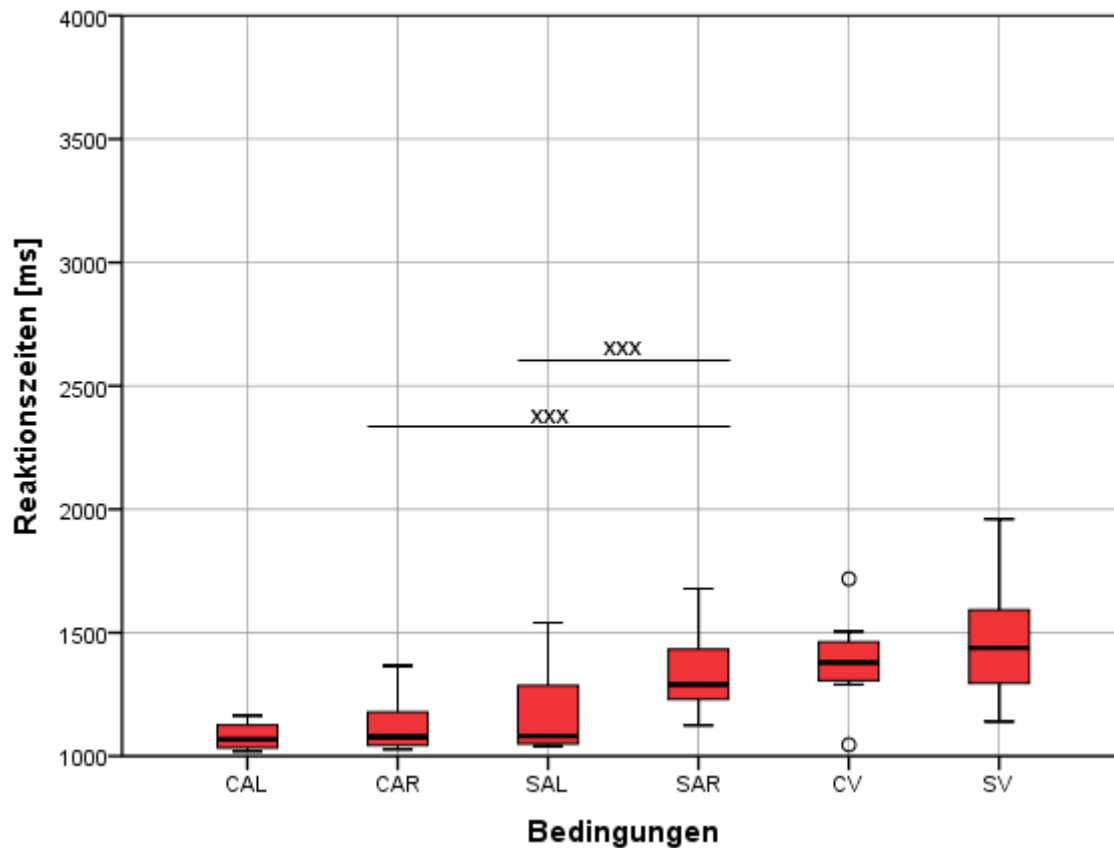


Abbildung 10: Boxplots der Reaktionszeiten der rechtsseitigen CI-Träger pro Bedingung.

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

Vergleiche zwischen den Gruppen

Aus der Tabelle 07 kann man entnehmen, dass die Reaktionszeiten der **Normalhörenden und CIL-Gruppe** im Mittel ähnliche Werte zeigen. Ein signifikanter Unterschied zeigt sich jedoch in der linksseitigen Sprachbedingung (SAL), bei der die CI-Träger ca. 24 ms länger Zeit benötigen als die Normalhörenden ($p = 0,009$). Weitere wesentliche Unterschiede bestehen nicht zwischen den beiden Gruppen.

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten der verschiedenen Bedingungen der **NH- und CIR-Gruppe** liegen etwa im gleichen Zeitraum. Ausgenommen hiervon ist der Versuchsabschnitt SAR, für den die CI-Träger mit ca. 1.290 ms signifikant mehr Zeit zum Antworten benötigen als die Normalhörenden mit 1.170 ms ($p = 0,018$).

Beim Vergleich der **beiden CI-Gruppen** miteinander verzeichnen sich entsprechend der Abbildung 10 ähnliche Reaktionszeiten für die visuellen Aufgaben und die auditorischen Kontrollbedingungen. In den auditorischen Sprachabschnitten zeigen sich hingegen Unterschiede auf. Dabei benötigt die CIL-Gruppe im Trend eine etwa 21 ms längere Reaktionszeit für den Versuchsabschnitt SAL als die rechtsseitigen CI-Träger ($p = 0,064$). In der Bedingung

SAR verzeichnen hingegen die CIR-Probanden im Mittel eine um ca. 16 ms signifikant längere Reaktionszeit als die andere CI-Gruppe ($p = 0,019$).

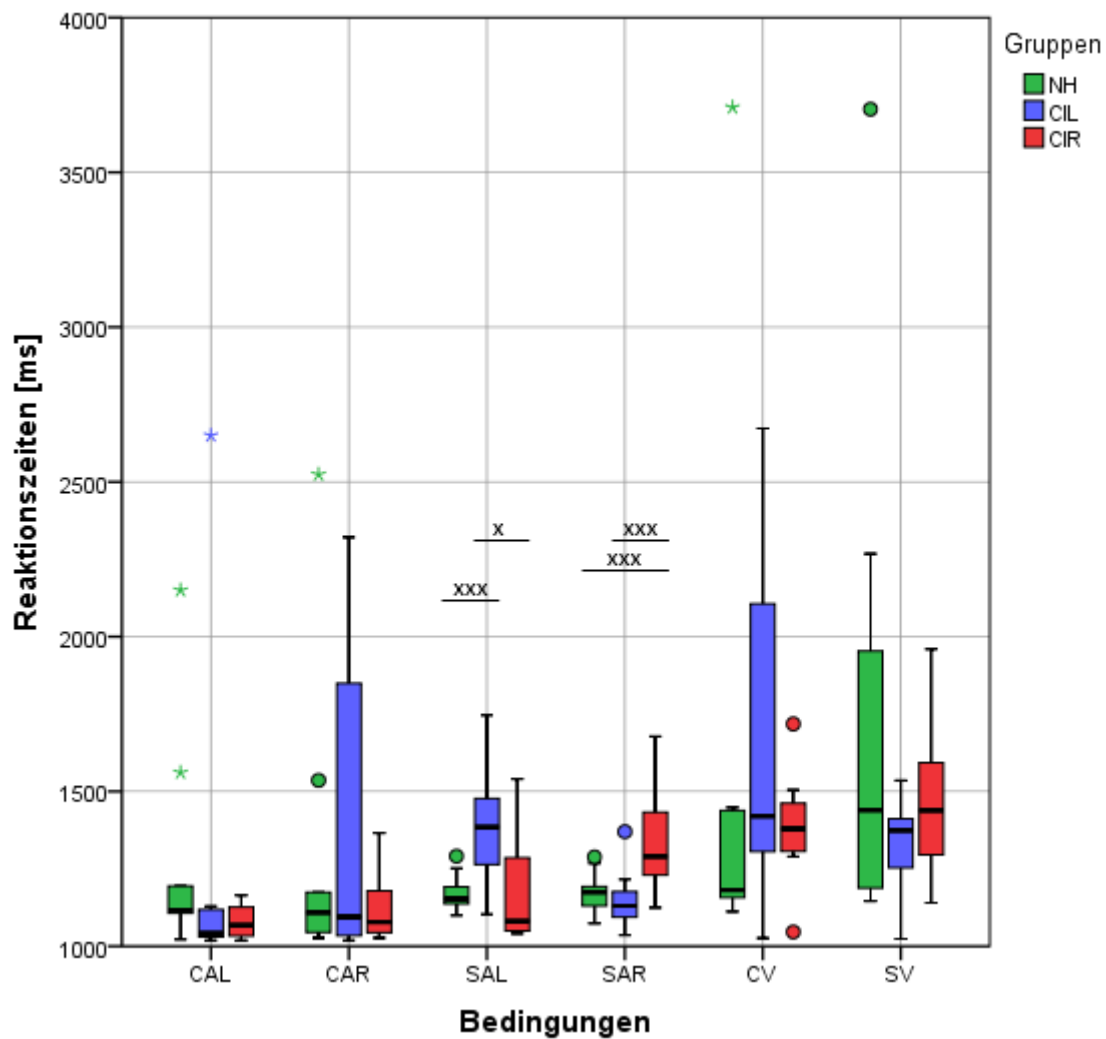


Abbildung 11: Boxplots der Reaktionszeiten der 3 Gruppen pro Bedingung,

NH: normalhörende Gruppe, CIL: linksseitige CI-Träger, CIR: rechtsseitige CI-Träger,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts, CV: Kontrollbedingung visuell, SV: Sprachbedingung visuell

3.3 Analyse der N100

Bei der Analyse der N100 wird jeweils die EEG-Reaktion der Probanden bestehend aus Amplitude und Latenz in Hinsicht auf Kontroll- und Sprachbedingungen und bezüglich der Stimulationsseite verglichen.

3.3.1 Überblick der N100

Die Abbildungen 12 bis 14 zeigen das CSD-Signal aller einzelnen Kanäle als Butterfly-Plot innerhalb eines Zeitfensters von 600 ms. Schwarz hervorgehoben ist der Kanal ‚Fz‘, der als zentrale Elektrode auf der Kopfoberfläche ein anschauliches Abbild des Signalverlaufes zeigt. Bei den CI-Trägern wird der CI-Artefakt im Zeitfenster von ca. 0 ms bis 20 ms sichtbar. Dieser wurde der Einfachheit halber in nachfolgenden Abbildungen eliminiert, da man anhand der Plots erkennen kann, dass das folgende Signal durch die Artefakte nicht grob beeinträchtigt wird, wenn man es mit dem Signal des normalhörenden Ohres vergleicht.

Die Abbildung 15 zeigt die Mittelwerte der GFP-Signale der Gruppen und jeweils deren Standardabweichungen. Bereits hierbei werden erste Unterschiede zwischen den Gruppen in der Amplitude und Latenz grafisch sichtbar. So zeigen sich in allen Gruppen im allgemeinen höhere Amplituden für die Kontroll- als für die Sprachbedingungen. Dabei zeigt sich in allen Versuchsabschnitten, dass die normalhörenden Probanden stets die größten Amplituden, die CIR-Träger hingegen die niedrigsten Amplituden aufweisen. Die Latenzen zeigen innerhalb der Kontrollaufgaben annähernd gleiche Werte bei allen Gruppen. Sie nehmen in den Sprachaufgaben jedoch an Variabilität zu, vor allem in Hinsicht auf längere Latenzen bei den CI-Trägern gegenüber den Normalhörenden.

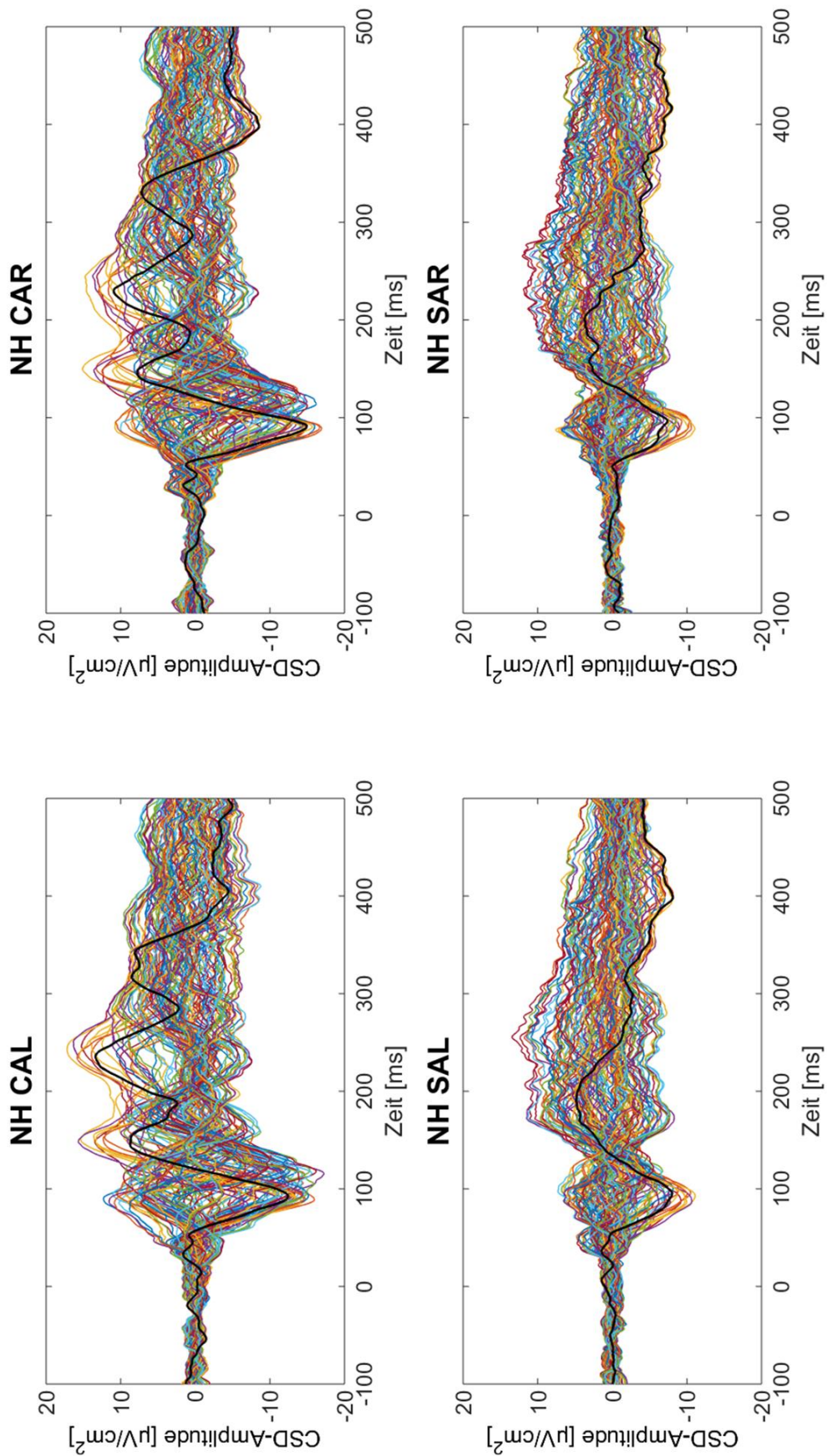


Abbildung 12: Butterflyplots der CSD-Signale aller EEG-Kanäle der normalhörenden Gruppe (NH), CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

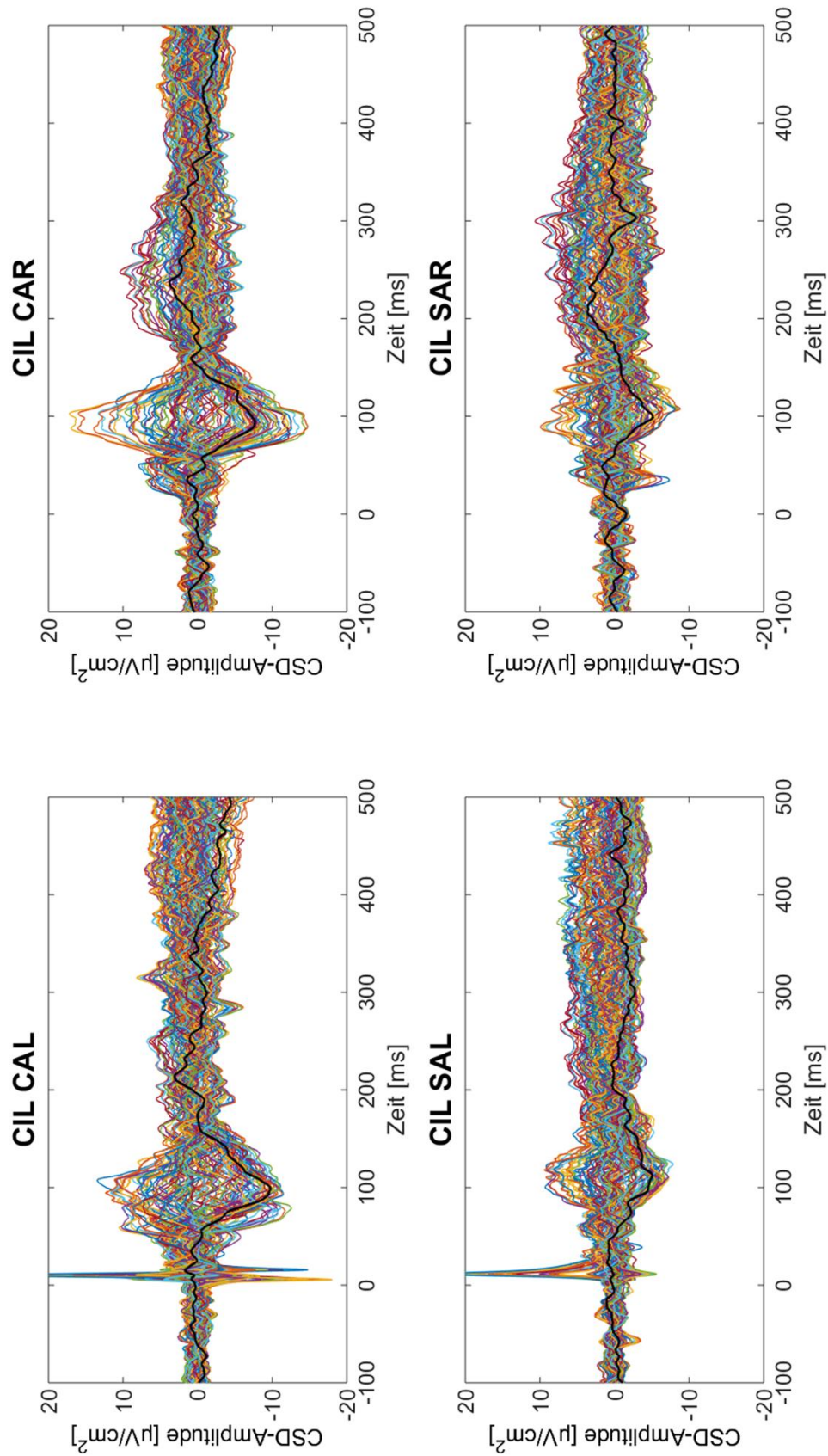


Abbildung 13: Butterflyplots der CSD-Signale aller EEG-Kanäle der linksseitigen CI-Träger (CIL), CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

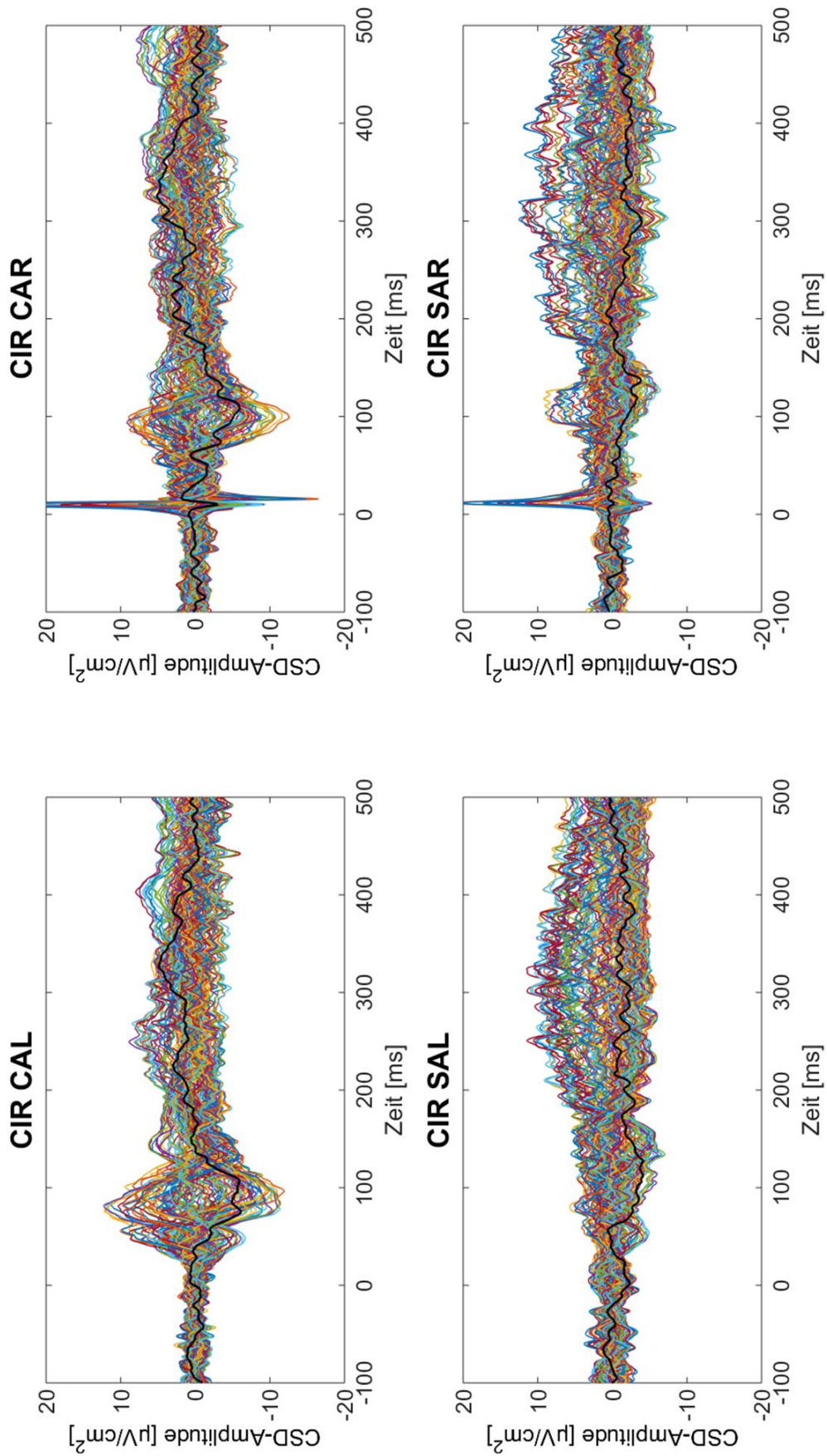


Abbildung 14: Butterflyplots der CSD-Signale aller EEG-Kanäle der rechtsseitigen CI-Träger (CIR), CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

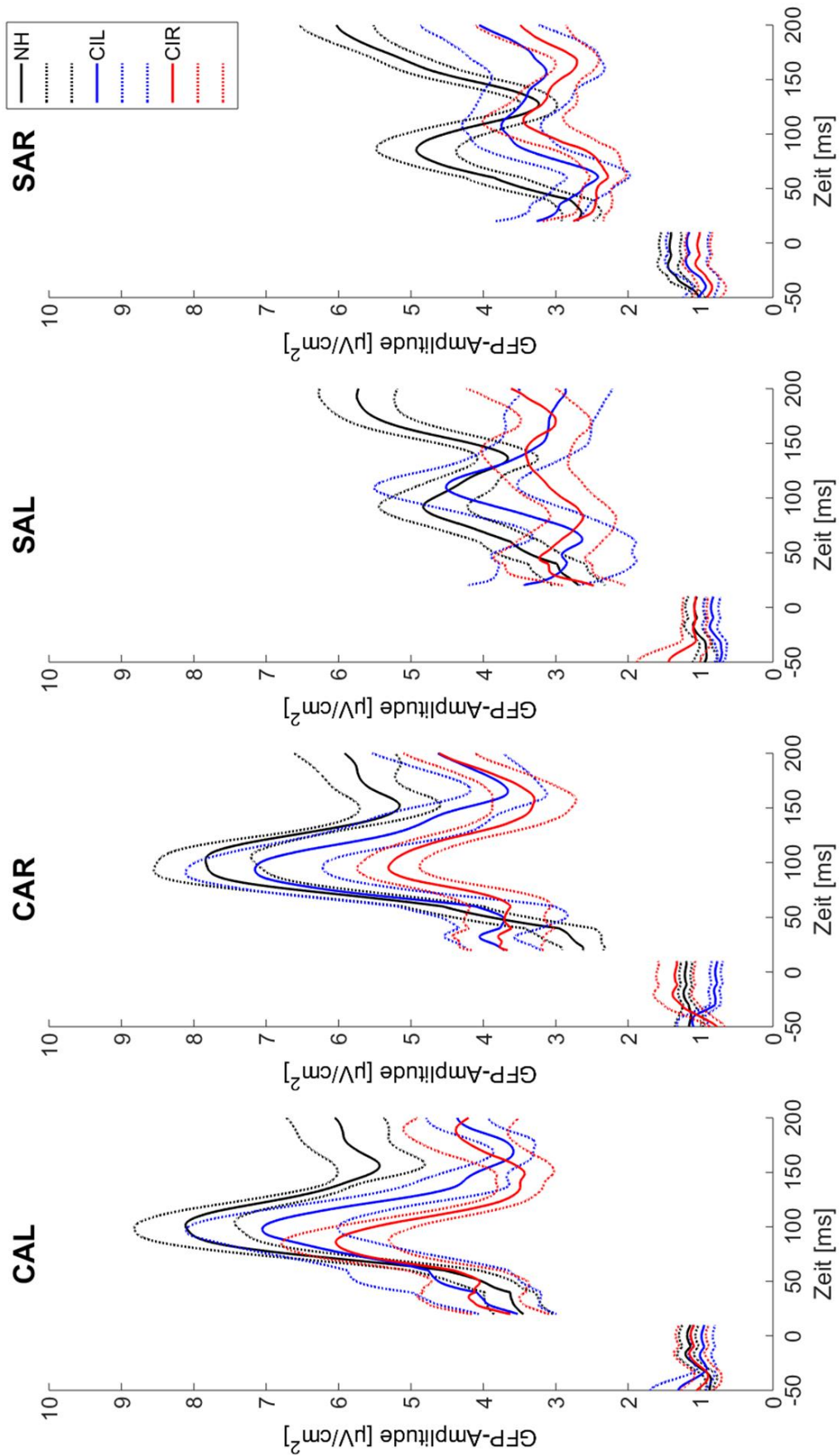


Abbildung 15: Grand-Averages der Global Field Power-Signale (GFP) der Gruppen pro Bedingung, CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

Die Abbildungen 16 bis 18 zeigen die verschiedenen GFP-Signale der einzelnen Probanden innerhalb ihrer Gruppen. Dabei ist zu sehen, dass entsprechend der Kriterien zur Peak-Bestimmung nicht bei allen Teilnehmern ein Maximum im definierten Zeitfenster von 70 ms bis 125 ms gefunden werden konnte. Anhand der Abbildungen lassen sich individuelle Amplituden und Latenzen ablesen. Die schwarze Linie markiert den Grand-Average der Gruppe.

In Abbildung 16 erkennt man, dass in der **normalhörenden Gruppe** 9 von 10 GFP-Peaks in 3 Bedingungen (CAL, CAR, SAR) gefunden werden. Im Versuchsabschnitt SAL kann von allen 10 Probanden ein Maximum bestimmt werden.

Abbildung 17 zeigt die GFP's der **linksseitigen CI-Träger**. Hierbei können im Abschnitt CAL 5, in der Bedingung SAR 6 und bei den Versuchen CAR und SAL je 7 Peaks identifiziert werden.

Die GFP-Kurven der **CIR-Gruppe** sind in Abbildung 18 dargestellt. Bei rechtsseitiger Stimulation (CAR und SAR) werden jeweils 7 Maxima gefunden, in der Bedingung CAL sind es 6. Im Versuchsabschnitt SAL können lediglich 4 Peaks entsprechend der Kriterien zugeordnet werden. Dies liegt daran, dass die Wellenform bei dieser Bedingung 2 Gipfel im Zeitfenster der N100 aufweist. Ein früher Peak liegt etwa bei 20-70 ms und ein später Peak bei 120-150 ms.

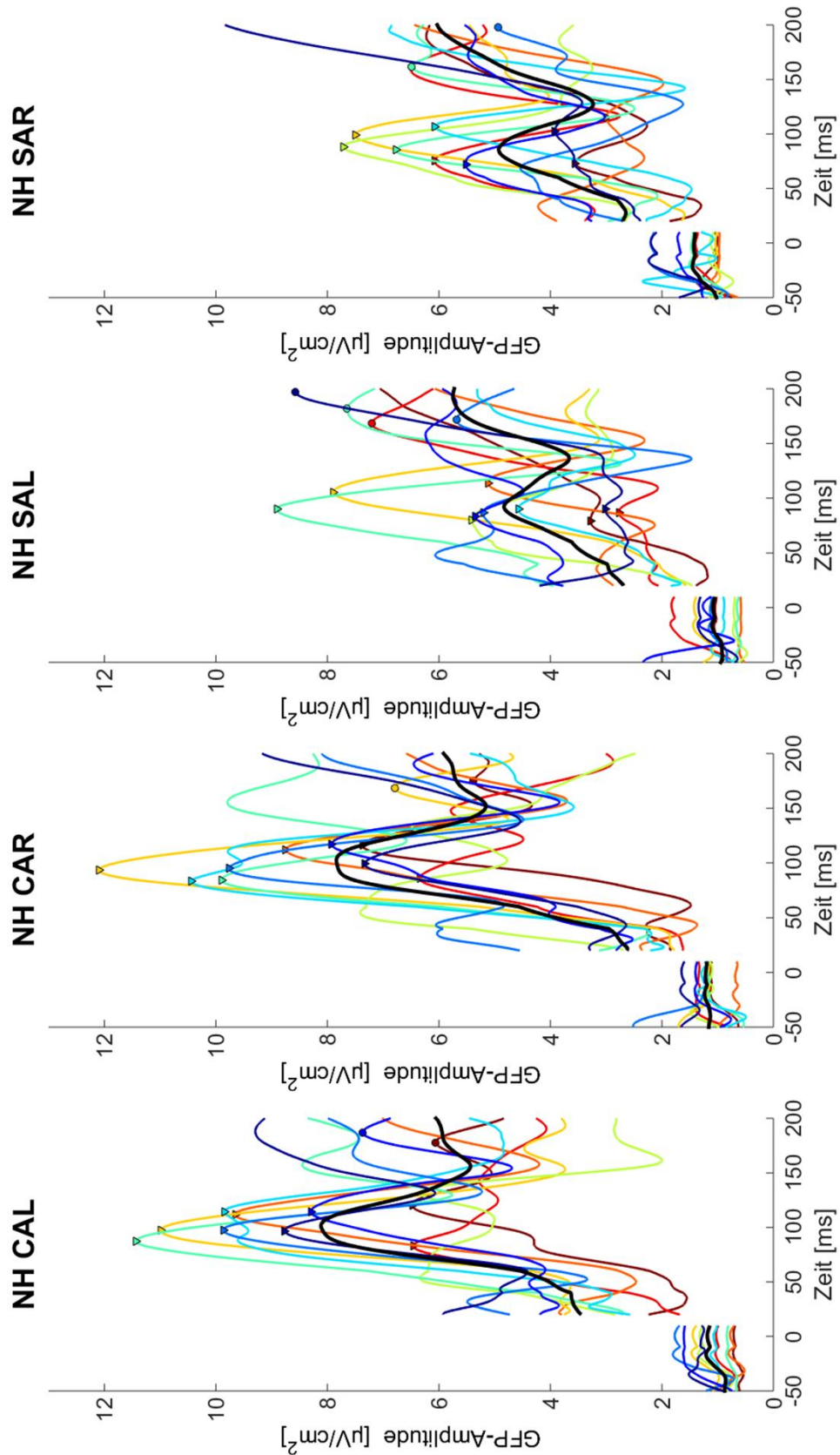


Abbildung 16: Einzelne N100-Peaks der Global Field Power (GFP) der normalhörenden Probanden, Die Maxima der Peaks werden durch Dreiecke dargestellt. Als schwarze Linie ist der Mittelwert der gesamten Gruppe dargestellt.

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

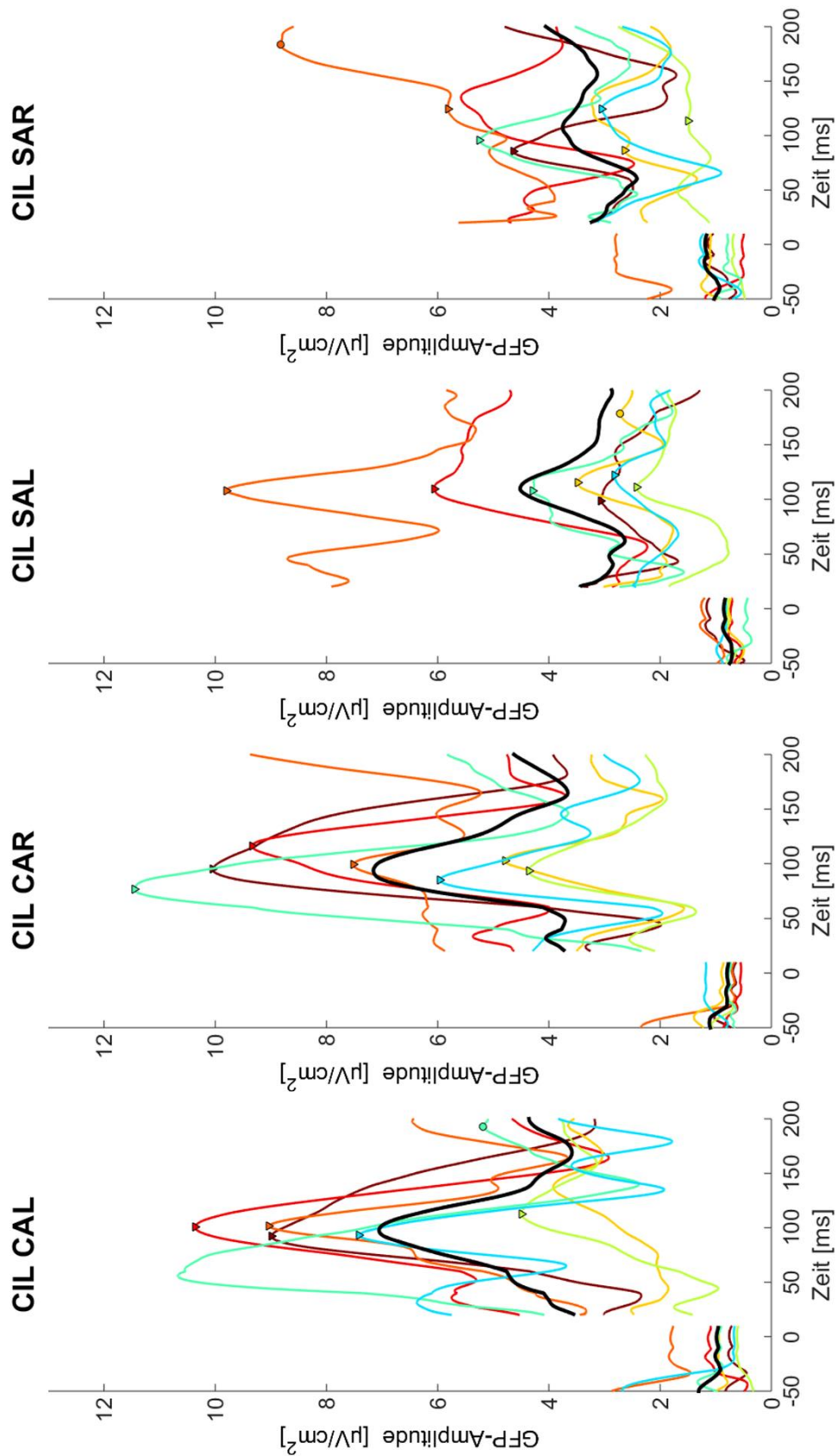
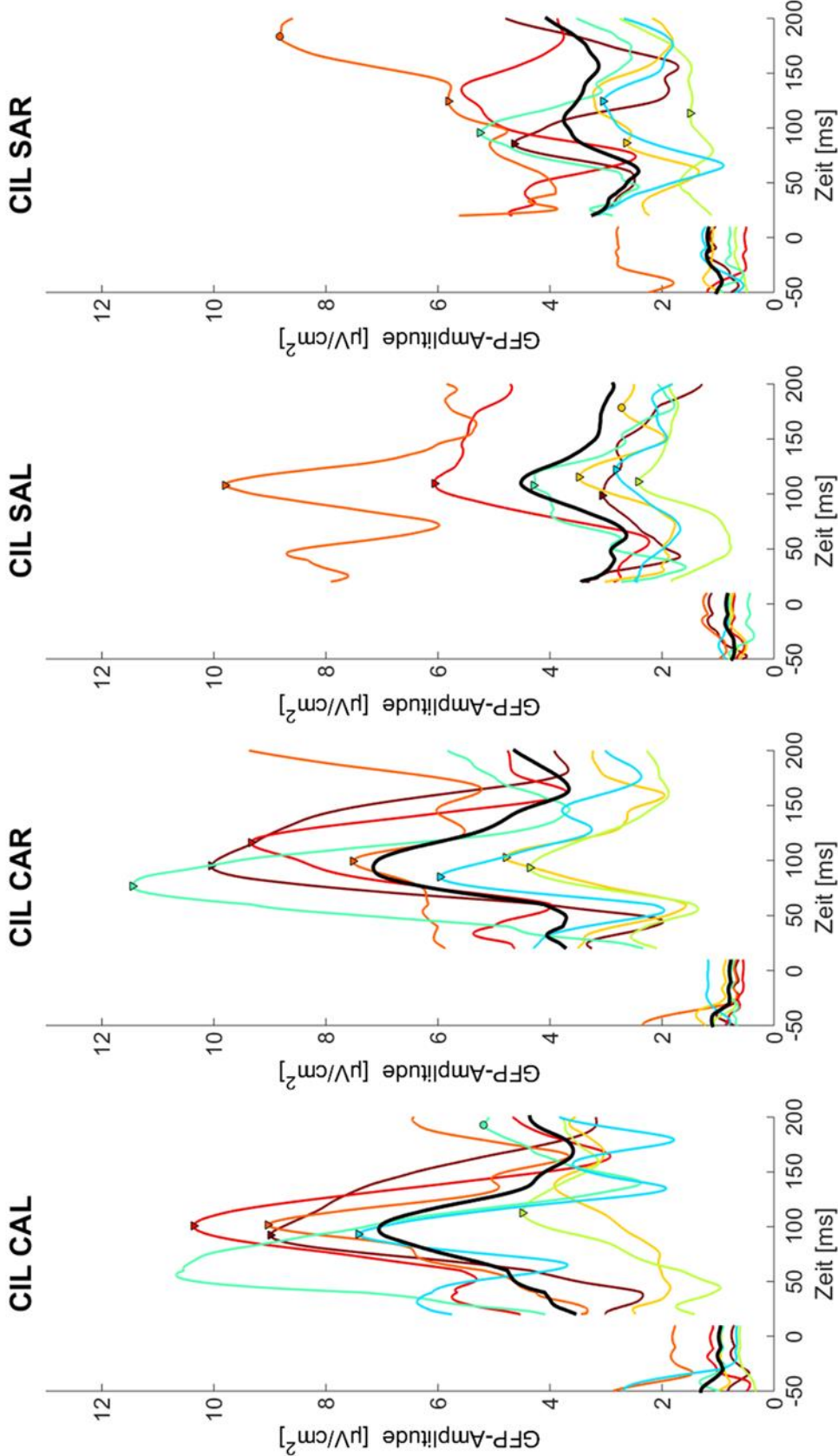


Abbildung 17: Einzelne N100-Peaks der Global Field Power (GFP) der linksseitigen CI-Träger, Die Maxima der Peaks werden durch Dreiecke dargestellt. Als schwarze Linie ist der Mittelwert der gesamten Gruppe dargestellt.

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts



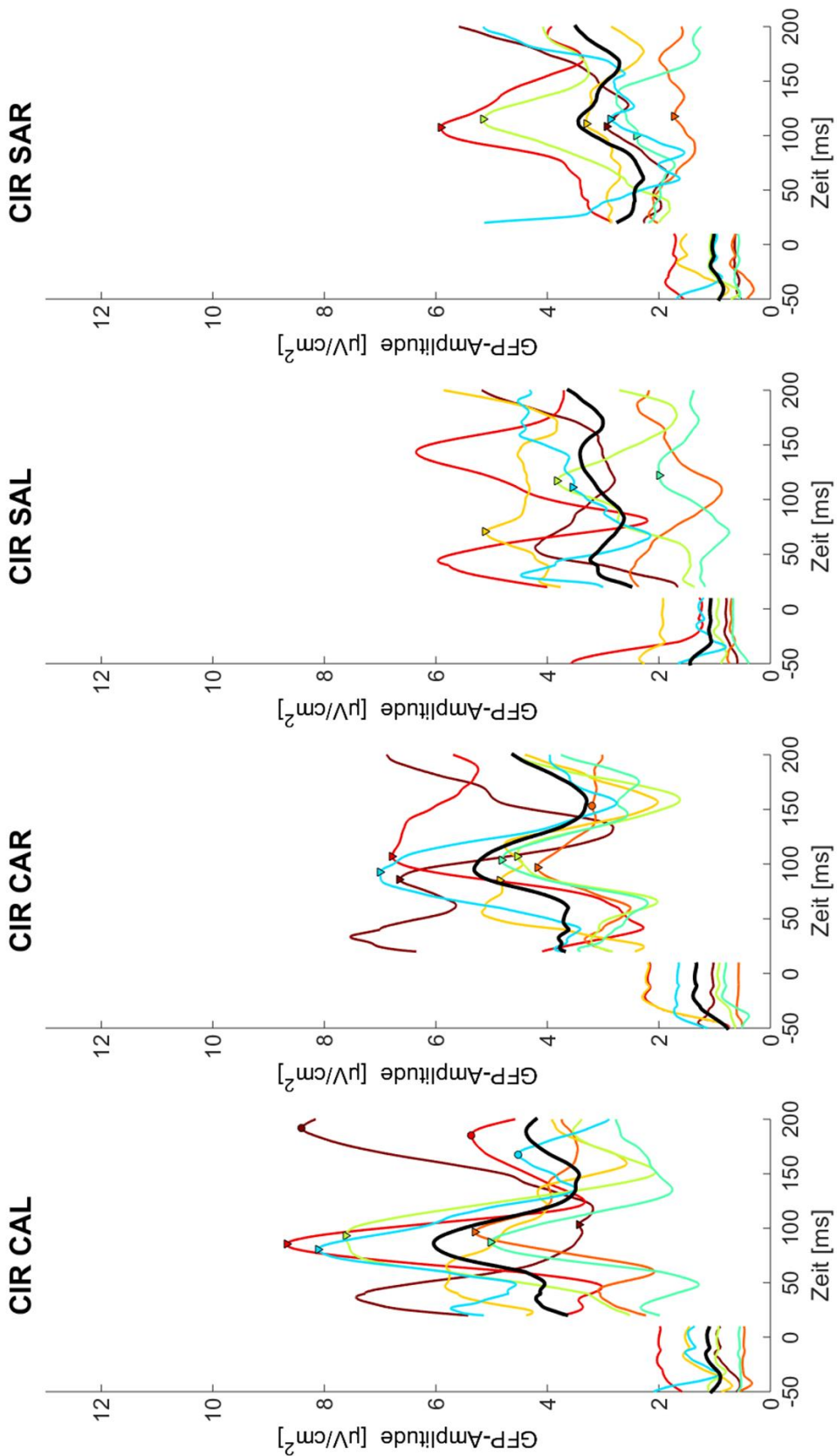


Abbildung 18: Einzelne N100-Peaks der Global Field Power (GFP) der rechtsseitigen CI-Träger, Die Maxima der Peaks werden durch Dreiecke dargestellt. Als schwarze Linie ist der Mittelwert der gesamten Gruppe dargestellt.

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

In den Abbildungen 19 bis 21 sind die CSD-Amplituden der EEG-Signale der Probandengruppen im Zeitfenster der N100 topografisch auf einer Kopfoberfläche dargestellt. Man blickt hierbei von oben auf den Kopf. Es zeigen sich verschiedene Dipolstrukturen, die in Annäherung die Lokalisation der größten Aktivität im Gehirn in der Zeit von 70 ms bis 125 ms nach Stimuluspräsentation zeigen. Sie ändern sich abhängig von der Gruppe und der Bedingung. Dabei kann der Unterschied der Stimulationsseite in der Verschiebung des Dipols kontralateral zur Stimulationsseite festgestellt werden.

Die Topografien der **normalhörenden Gruppe** sind in Abbildung 19 zu sehen. Bei den Kontrollbedingungen entstehen 2 laterale Dipole, jeweils etwa symmetrisch einer pro Hirnhemisphäre. Die Sprachbedingungen ergeben hingegen eher zentral gelegene Dipole, die abhängig von der Stimulationsseite ihre Ausdehnung nach links oder rechts lateral ändern.

Ähnlich zur NH-Gruppe verhalten sich insgesamt auch die Topografien der **linksseitigen CI-Träger**, wobei sich bei der Sprachbedingung SAL ein langgestreckter zentraler Dipol zeigt, der sich ansatzweise in 2 verschiedene Dipole teilt, ähnlich wie bei den Kontrollbedingungen (Abbildung 20).

Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, stellen sich die Topografien der **CIR-Probanden** etwas verschoben und weniger symmetrisch im Vergleich zu den beiden vorhergehenden Gruppen dar. Die Dipole der Kontrollbedingungen sind zum Teil mehr nach zentral verschoben. Dabei zeigt sich bei der Bedingung CAR verhältnismäßig weniger Aktivität ipsilateral zur Stimulationsseite. Bei den Sprachbedingungen sind die zentralen Dipole etwas nach frontal verlagert, bei der Bedingung SAR bilden sich zusätzlich 2 Dipole aus.

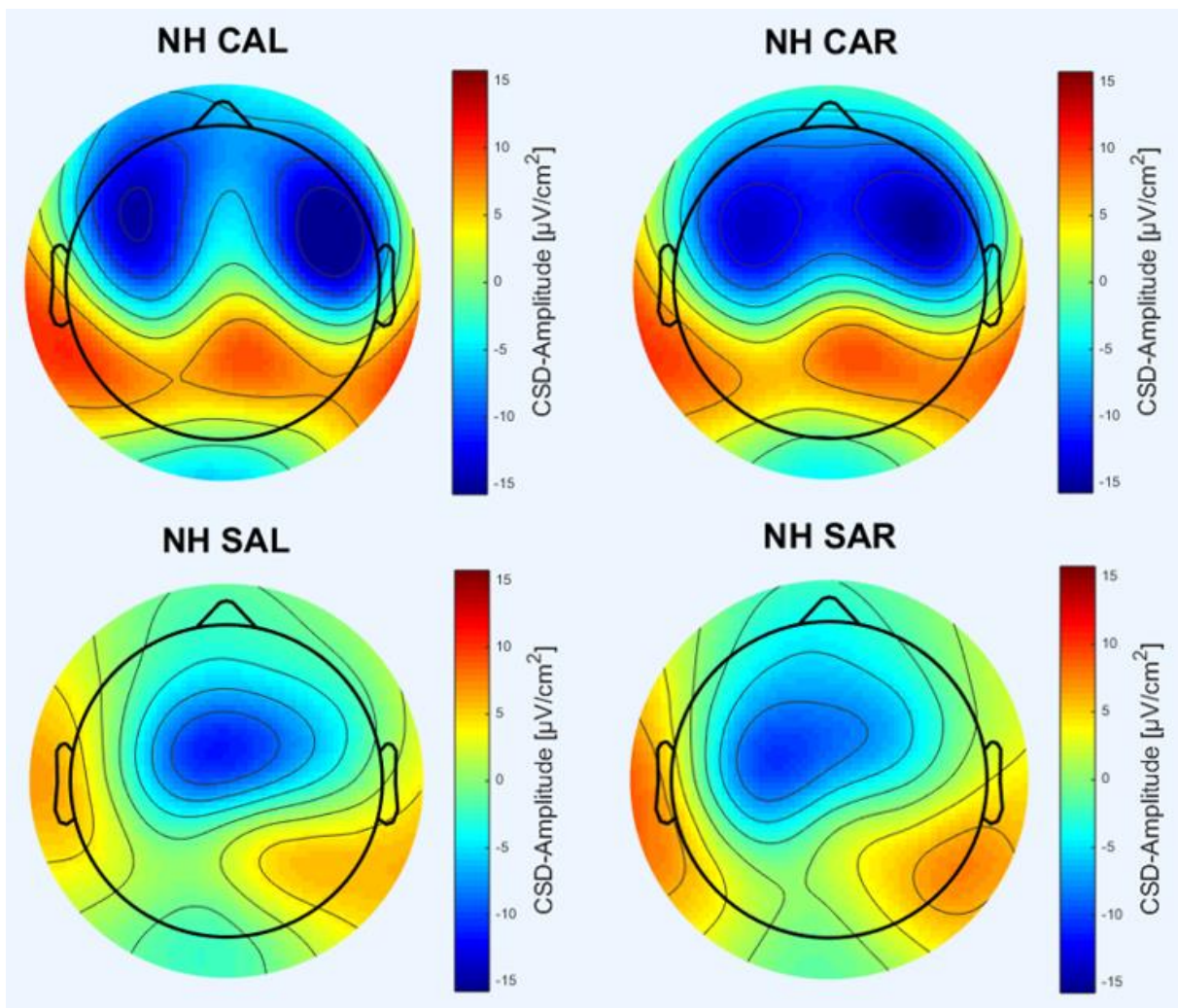


Abbildung 19: Topografien der CSD-Amplituden der EEG-Signale der normalhörenden Gruppe im Zeitfenster der N100,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

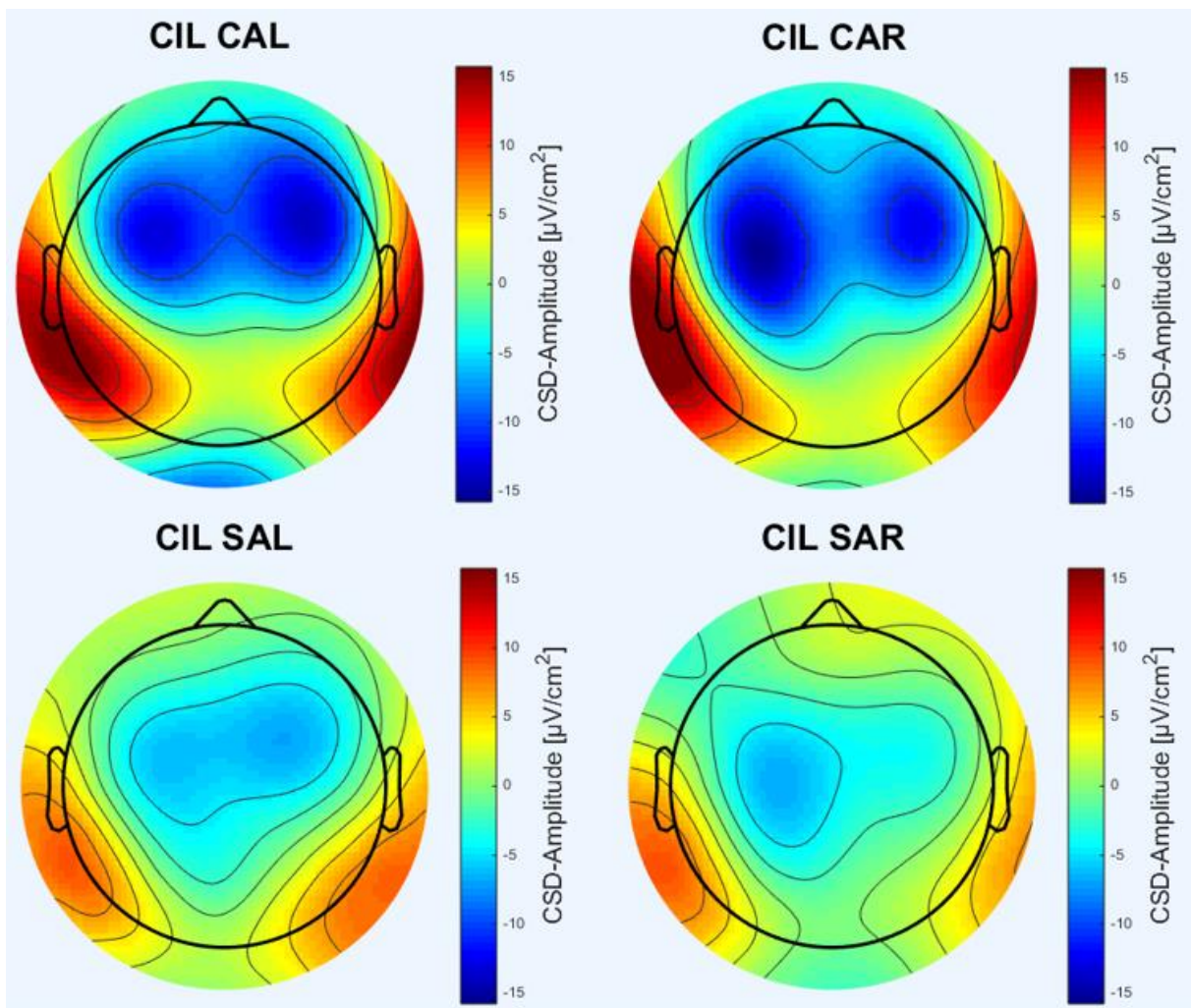


Abbildung 20: Topografien der CSD-Amplituden der EEG-Signale der linksseitigen CI-Träger im Zeitfenster der N100,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

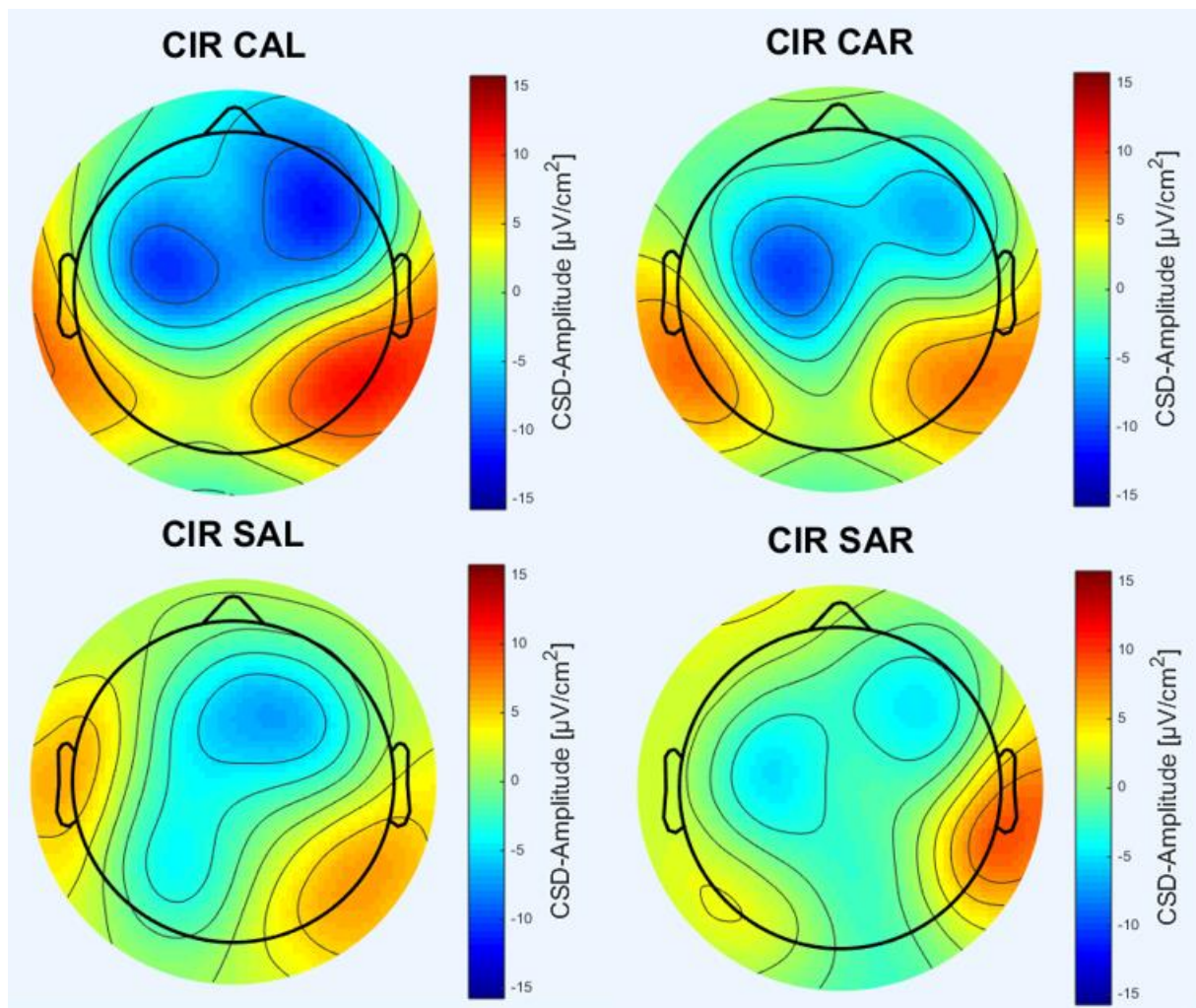


Abbildung 21: Topografien der CSD-Amplituden der EEG-Signale der rechtsseitigen CI-Träger im Zeitfenster der N100,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

3.3.2 N100-Amplitude

Tabelle 08 zeigt die durchschnittlichen Mittelwerte der Amplituden und ihre Standardabweichungen der verschiedenen Gruppen für die auditorischen Bedingungen.

Gruppe \ Bedingung	CAL		CAR		SAL		SAR	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Normalhörende	9,09 mA	1,77 mA	8,88 mA	1,82 mA	5,16 mA	1,99 mA	5,57 mA	1,72 mA
linksseitige CI-Träger	8,06 mA	2,25 mA	7,64 mA	2,73 mA	4,56 mA	2,61 mA	3,81 mA	1,68 mA
rechtsseitige CI-Träger	6,36 mA	2,07 mA	5,55 mA	1,21 mA	3,62 mA	1,28 mA	3,47 mA	1,51 mA

Tabelle 08: Mittelwerte und Standardabweichungen der N100-Amplituden,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

ANOVA der N100-Amplitude

Mithilfe einer zweifaktoriellen ANOVA wurde überprüft, inwiefern die Faktoren ‚Gruppe‘ und ‚Stimulationsseite‘ Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Dabei wurden die Resultate getrennt nach Kontroll- und Sprachbedingungen analysiert, um Unterschiede zwischen einfachen und komplexen auditorischen Stimuli betrachten zu können.

Es zeigt sich, dass die Interaktion der beiden Faktoren ‚Gruppe‘ und ‚Stimulationsseite‘ sowohl bei den Kontroll- als auch bei den Sprachbedingungen nicht signifikant ist. Dies bedeutet, dass das Zusammenwirken der beiden Faktoren keinen Einfluss auf die Ergebnisse der N100-Amplitude hat. Betrachtet man diese Parameter einzeln, ergibt auch der Faktor ‚Stimulationsseite‘ keinen signifikanten Einfluss, wohingegen die ‚Gruppe‘ ein signifikantes Ergebnis bei beiden Stimulusarten zeigt (Kontrollbedingungen: $p = 0,001$; Sprachbedingungen: $p = 0,044$).

Der Post-hoc-Test nach Gabriel ergibt bei den **Kontrollbedingungen** keine Signifikanz zwischen der normalhörenden und CIL-Gruppe. Im Vergleich zwischen NH- und CIR-Gruppe zeigt sich hingegen ein signifikanter Unterschied in der N100-Amplitude ($p < 0,001$), der sich im Trend auch zwischen den beiden CI-Gruppen ($p = 0,066$) widerspiegelt.

Der paarweise Vergleich nach Gabriel bei den **Sprachbedingungen** erbringt ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen der NH- und CIR-Gruppe ($p = 0,042$), jedoch nicht zwischen Normalhörenden und CIL-Trägern oder zwischen den beiden CI-Gruppen.

Vergleiche innerhalb der Gruppen

Innerhalb der **normalhörenden Gruppe** zeigt sich dargestellt in Tabelle 08 und Abbildung 22, dass die Kontrollbedingungen im Mittel eine um ca. 4 mA größere Amplitude aufweisen als die Sprachbedingungen. Hierbei ist die N100-Amplitude sowohl bei links- als auch bei rechtsseitiger Stimulation für die Kontrollaufgabe signifikant größer als für die Sprachaufgabe (CAL/SAL: $p = 0,0$; CAR/SAR: $p = 0,001$).

Bei den **linksseitigen CI-Trägern** zeigt sich eine vergleichbare Tendenz im Hinblick auf die Stimulationsart. Bei Reizpräsentation auf dem rechten Ohr zeigt sich bei der Bedingung CAR eine signifikant größere Amplitude als bei SAR (CAR/SAR: $p = 0,005$). Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, deutet sich auch bei linksseitiger Präsentation dieses Verhalten an, was bei dieser Probandengruppe jedoch nur einen Trend zeigt (CAL/SAL: $p = 0,052$).

Die Probanden mit dem **CI im rechten Ohr** weisen das gleiche Antwortverhalten wie die normalhörende Gruppe auf. Sowohl bei linker als auch bei rechter Stimulation zeigt sich in den Kontrollbedingungen eine signifikant größere Amplitude als bei den Sprachaufgaben (CAL/SAL: $p = 0,013$; CAR/SAR: $p = 0,015$). Die Amplitudendifferenz ist hierbei mit ca. 2-3 mA jedoch jeweils geringer (Tabelle 08).

Insgesamt lässt sich sagen, dass wenn es signifikante Ergebnisse gibt, diese sich in allen Gruppen zwischen den Kontroll- und Sprachaufgaben widerspiegeln. In Abbildung 22 kann man dies in Form von größeren Amplituden für die Kontrollbedingungen erkennen. Die Ergebnisse sind nicht abhängig von der Stimulationsseite, da diese Vergleiche von CAL und CAR bzw. SAL und SAR stets ähnliche Amplituden aufweisen und nicht signifikant sind.

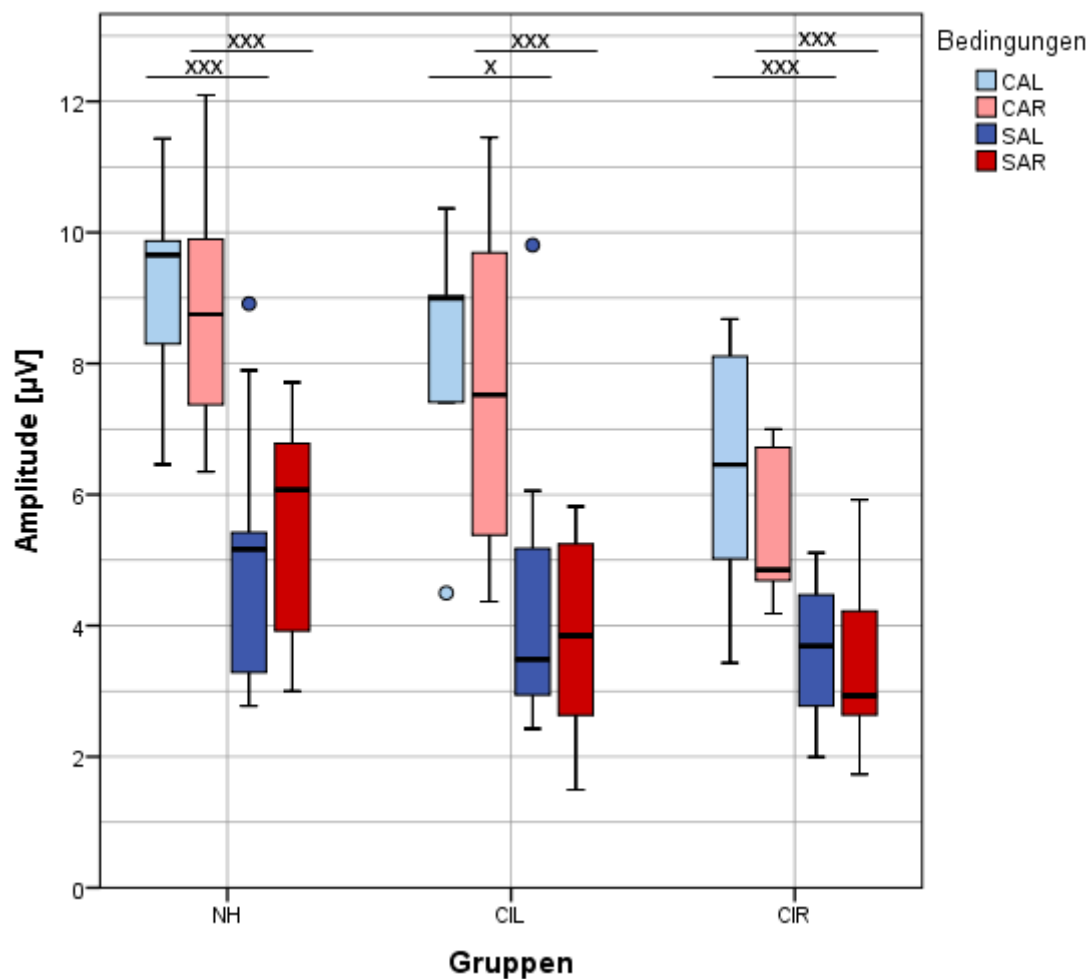


Abbildung 22: N100-Amplituden der Gruppen pro Bedingungen,

NH: normalhörende Gruppe, CIL: linksseitige CI-Träger, CIR: rechtsseitige CI-Träger,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

Vergleiche zwischen den Gruppen

Abbildung 23 zeigt die N100-Amplituden der Gruppen für jede auditorische Bedingung. Dabei zeigt sich, dass die Amplituden der Normalhörenden im Schnitt am größten sind, gefolgt von der CIL- und dann CIR-Gruppe.

Vergleicht man die **NH- und CIL-Gruppe** miteinander, ergeben sich hierbei jedoch keine signifikanten Unterschiede. In der rechtsseitigen Sprachbedingung (SAR) zeigt sich eine Abweichung, bei der die CI-Träger im Trend eine kleinere Amplitude aufweisen ($p = 0,072$).

Betrachtet man die Ergebnisse der **NH- und CIR-Gruppe**, ist der Amplitudenunterschied deutlich häufiger signifikant. So zeigt sich mit Ausnahme der linksseitigen Sprachstimulation in allen anderen auditorischen Bedingungen eine deutlich signifikant größere Amplitude bei der normalhörenden Gruppe im Vergleich zu den CI-Probanden (CAL: $p = 0,017$; CAR: $p = 0,001$; SAR: $p = 0,023$).

Stellt man die N100-Amplituden **beider CI-Gruppen** gegenüber, bestehen in den verschiedenen Bedingungen keine signifikanten Unterschiede zwischen den CI-Trägern. Man kann jedoch anhand der Tabelle 08 sehen, dass die CIL-Probanden vor allem in den beiden Kontrollbedingungen im Mittel eine größere Amplitude zeigen, was hingegen in den Sprachbedingungen nicht so deutlich ist.

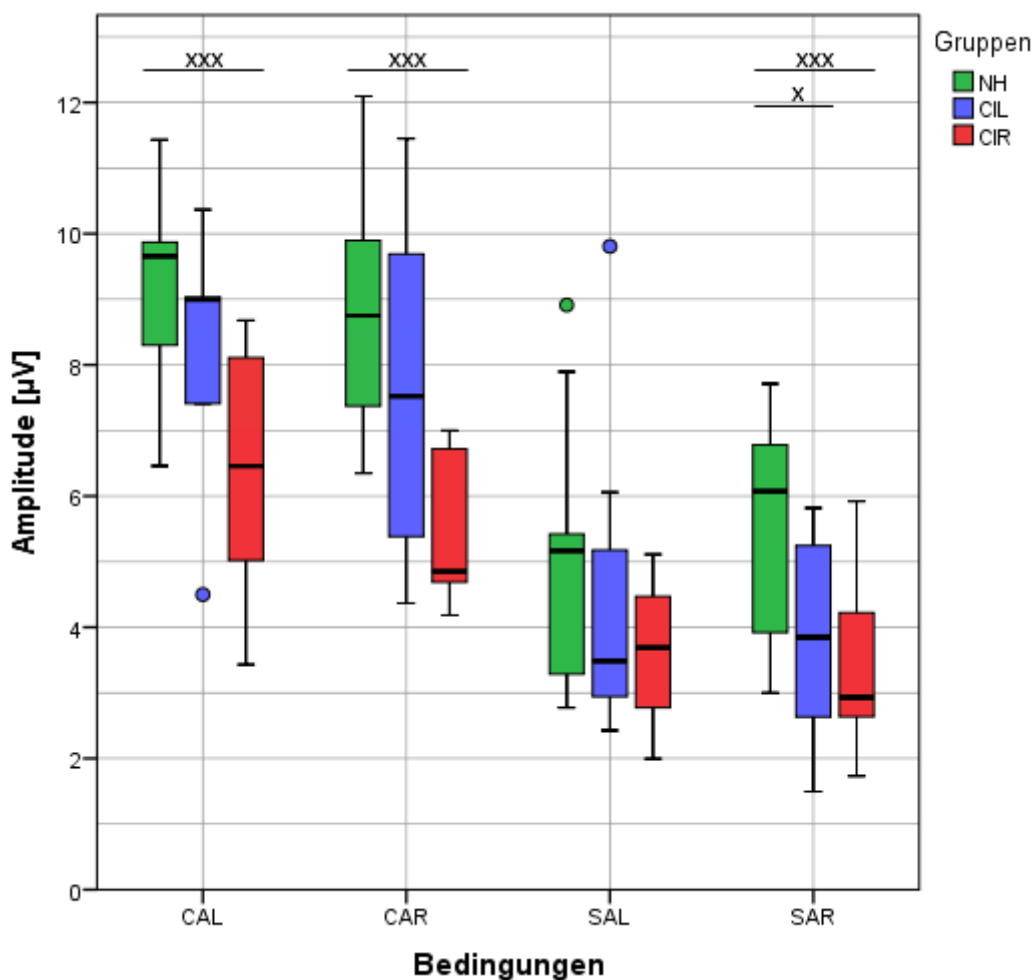


Abbildung 23: N100-Amplituden der Bedingungen pro Gruppen, NH: normalhörende Gruppe, CIL: linksseitige CI-Träger, CIR: rechtsseitige CI-Träger, CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

3.3.3 N100-Latenz

Tabelle 09 zeigt die durchschnittlichen Mittelwerte der Latenzen und ihre Standardabweichungen der verschiedenen Gruppen für die auditorischen Bedingungen.

Gruppe \ Bedingung	CAL		CAR		SAL		SAR	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Normalhörende	102,53 ms	13,23 ms	98,49 ms	13,53 ms	90,68 ms	11,01 ms	90,8 ms	15,79 ms
linksseitige CI-Träger	100,16 ms	8,24 ms	95,43 ms	12,73 ms	110,4 ms	7,23 ms	104,87 ms	18,09 ms
rechtsseitige CI-Träger	91,07 ms	8,15 ms	96,8 ms	9,39 ms	105,3 ms	23,71 ms	110,57 ms	6,23 ms

Tabelle 09: Mittelwerte und Standardabweichungen der N100-Latenzen,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

ANOVA der N100-Latenz

Mithilfe einer zweifaktoriellen ANOVA wurde überprüft, inwiefern die Faktoren ‚Gruppe‘ und ‚Stimulationsseite‘ Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Dabei wurden die Resultate getrennt nach Kontroll- und Sprachbedingungen analysiert, um Unterschiede zwischen einfachen und komplexen auditorischen Stimuli betrachten zu können.

Im Hinblick auf die präsentierten Töne der auditorischen Kontrollbedingung zeigt sich keine signifikante Interaktion zwischen den genannten Faktoren. Auch in der einfaktoriellen ANOVA nehmen die Faktoren ‚Gruppe‘ und ‚Stimulationsseite‘ keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Anders verhält es sich bei der Auswertung der auditorischen Sprachbedingungen. Zwar ergibt sich kein signifikantes Ergebnis beim Zusammenwirken beider Faktoren oder beim Betrachten der ‚Stimulationsseite‘ alleine, jedoch zeigt der Faktor ‚Gruppe‘ einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der N100-Latenz ($p = 0,001$). Der Post-hoc-Test nach Gabriel ergibt hierbei einen signifikanten Unterschied sowohl zwischen der normalhörenden und der CIL-Gruppe ($p = 0,004$) als auch zwischen der normalhörenden und der CIR-Gruppe ($p = 0,004$). Zwischen den beiden CI-Gruppen bestehen keine signifikanten Unterschiede.

Vergleiche innerhalb der Gruppen

Wie in Abbildung 24 zu sehen ist, zeigen die **normalhörenden Probanden** für die Kontrollbedingungen im Mittel eine längere N100-Latenz als für die Sprachaufgaben. Im Allgemeinen gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedingungen, sowohl bezüglich der Stimulationsseite als auch der Art der Stimuli.

Die **CIL-Gruppe** zeigt in der linksseitigen Sprachbedingung (SAL) im Durchschnitt mit $110,4 \pm 7,2$ ms die längste Latenz verglichen mit den anderen auditorischen Bedingungen. Insgesamt zeigen sich allerdings wie bei den Normalhörenden keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Gruppe.

Im Gegensatz zu den normalhörenden Probanden weisen die **rechtsseitigen CI-Träger** im Schnitt längere Latenzen für die Sprach- als für die Kontrollaufgaben auf (Tabelle 09). Dieser Unterschied ist für beide Stimulationsseiten signifikant (CAL/SAL: $p = 0,011$; CAR/SAR: $p = 0,024$). Innerhalb der Stimulationsarten (CAL/CAR und SAL/SAR) zeigen sich jeweils ähnliche Latenzen.

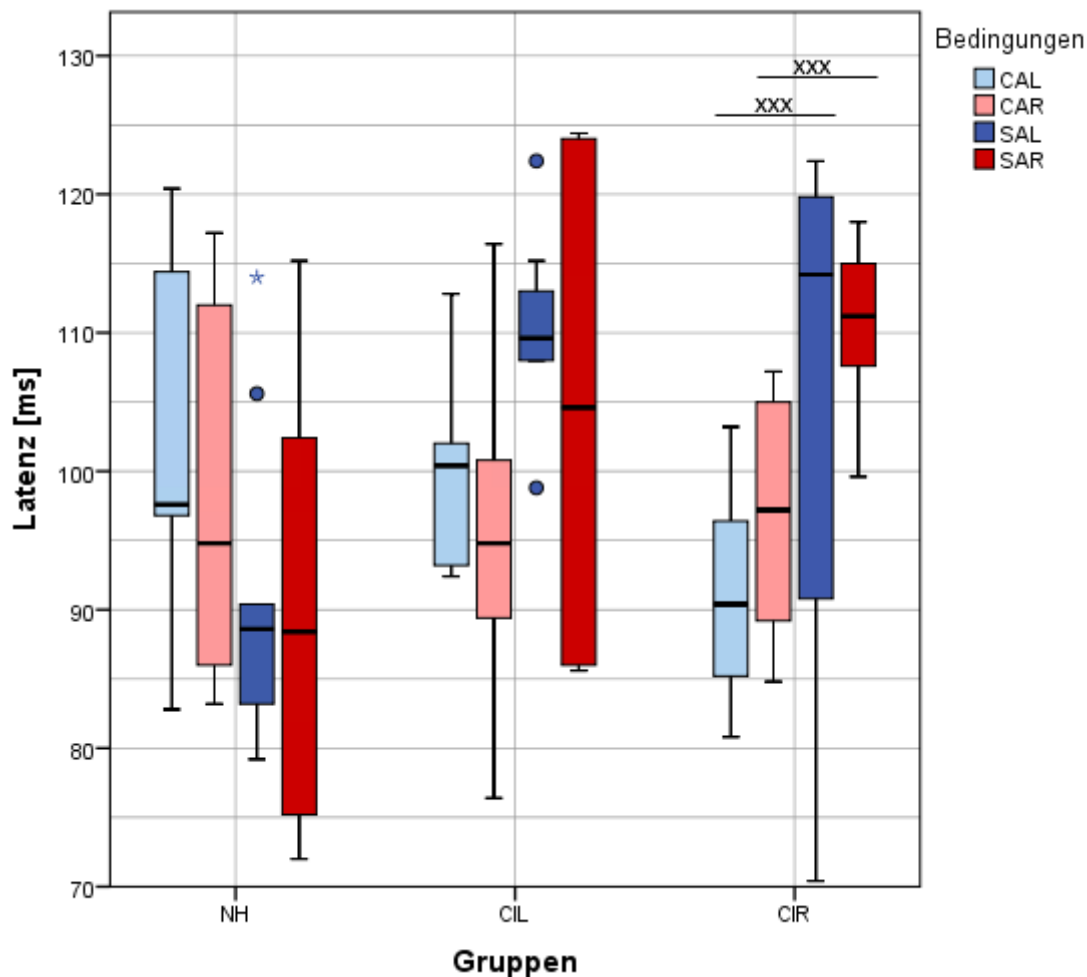


Abbildung 24: N100-Latenzen der Gruppen pro Bedingungen,

NH: normalhörende Gruppe, CIL: linksseitige CI-Träger, CIR: rechtsseitige CI-Träger,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

Vergleiche zwischen den Gruppen

Vergleicht man die **NH- und CIL-Gruppe** miteinander sieht man anhand von Tabelle 09 und Abbildung 25 im Mittel ähnliche Latenzen für die Kontrollbedingungen. Bei den Sprachbedingungen zeigen sich jedoch Unterschiede, da die CI-Probanden jeweils längere Latenzen aufweisen als die Normalhörenden. Auf der Seite, wo ihr CI stimuliert wurde (SAL), sind die Ergebnisse hierbei signifikant ($p = 0,001$) verschieden.

Die **NH- und die CIR-Gruppe** verzeichnen eine ähnliche Latenz in der rechtsseitigen Kontrollbedingung. Bei der Aufgabe CAL hingegen ist die N100-Latenz der CI-Träger im Trend kürzer als die der Vergleichsgruppe ($p = 0,082$). In den Sprachbedingungen verhält sich die Latenz wie im Vergleich der vorherigen Gruppe: Die CIR-Probanden haben im Mittel längere Latenzen als die Normalhörenden. Auch hier ist dieses Ergebnis für die Stimulationsseite des CIs signifikant (SAR: $p = 0,006$).

Betrachtet man **beide CI-Gruppen** ergeben sich im Durchschnitt ähnliche Latenzen (Tabelle 09). Am weitesten weichen diese im Trend in der Bedingung CAL voneinander ab, die die CIL-Gruppe im Mittel mit einer Latenz von $100,2 \pm 8,2$ ms und die CIR-Gruppe mit $91,1 \pm 8,1$ ms beantwortet ($p = 0,1$). Insgesamt gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden CI-Gruppen.

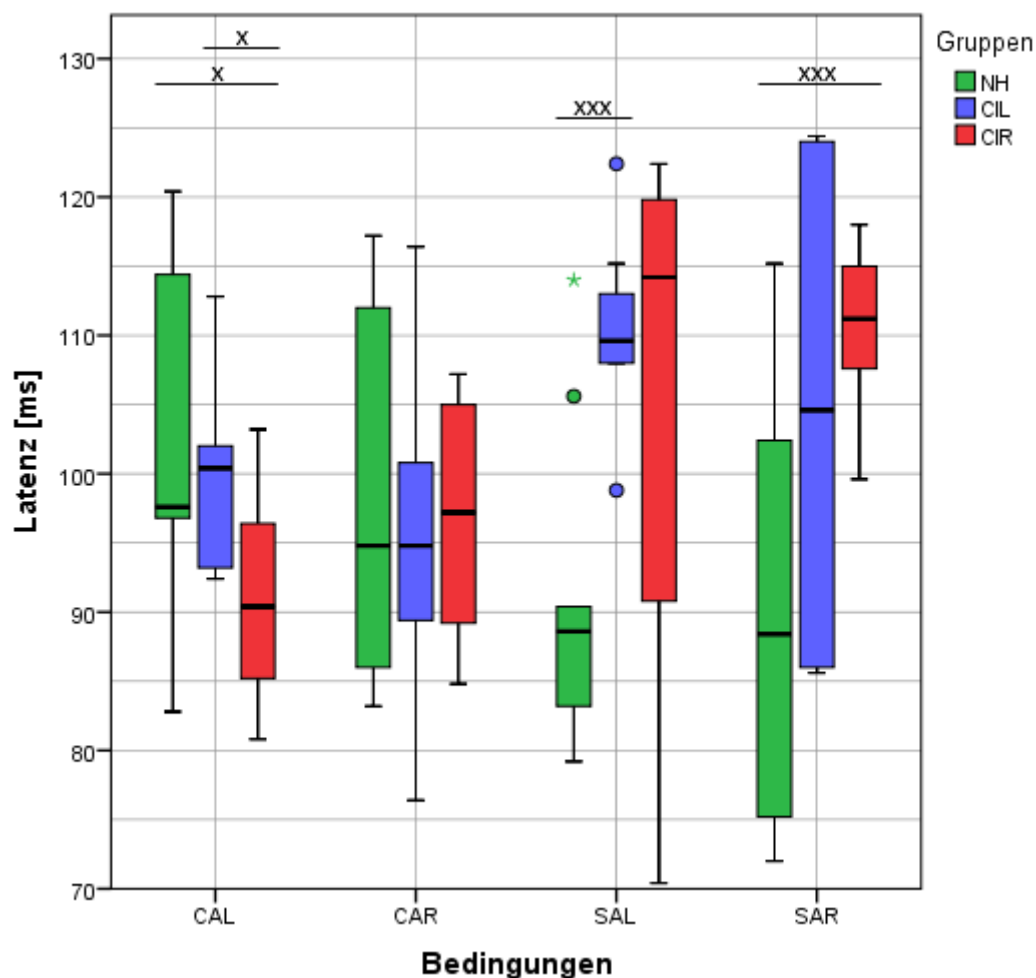


Abbildung 25: N100-Latenzen der Bedingungen pro Gruppen,

NH: normalhörende Gruppe, CIL: linksseitige CI-Träger, CIR: rechtsseitige CI-Träger,

CAL: Kontrollbedingung auditorisch links, CAR: Kontrollbedingung auditorisch rechts, SAL: Sprachbedingung auditorisch links, SAR: Sprachbedingung auditorisch rechts

4 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der CI-Implantationsseite bei einseitig ertaubten Probanden auf die frühe Verarbeitung akustischer Stimuli in der EEG untersucht. Hierbei wurde die Reaktion auf einfache Ton- und komplexe Sprachstimuli, bestehend aus Wörtern und Pseudowörtern, verglichen. Die Verarbeitung der monaural präsentierten Stimuli erfolgte anhand der Analyse des Antwortverhaltens der Probanden sowie der Auswertung der N100-Komponente in der EEG, welche eine frühe Antwort aus dem Hörkortex auf den auditorischen Reiz darstellt (Manca & Grimaldi, 2016). Diese Daten des Experimentes wurden innerhalb der CI-Träger zwischen linksseitig und rechtsseitig versorgten Probanden verglichen und jeweils in Bezug zu einer Gruppe beidseits normalhörender Probanden, die jedoch primär zum Evaluieren des Studiendesigns und nicht als direkte Vergleichsprobanden zu den CI-Trägern getestet wurden. Bisher gibt es in diesem Rahmen zahlreiche Studien zu beidseitig ertaubten Patienten, die mit einem CI auf einer Seite versorgt sind, aber nur wenige wie in dieser Arbeit, in der erwachsene SSD-Patienten untersucht werden. Der Unterschied zwischen ein- und beidseitig ertaubten besteht hierbei in dem Einfluss der sprachdominierenden Gehirnhälfte, welche entsprechend bisheriger Untersuchungen bevorzugt die linke Hemisphäre ist (Bethmann et al., 2007). Wohingegen beidseitig ertaubte Probanden aufgrund der kontralateralen Verarbeitung von Sprachreizen von einer rechtsseitigen Implantation des CIs profitieren, ist die Annahme dieser Arbeit, dass rechtsseitig versorgte CI-SSD-Probanden Defizite im Sprachverstehen im Vergleich zu linksseitigen CI-SSD-Trägern aufweisen.

4.1 Beurteilung der Verhaltensdaten

Trefferquoten

Innerhalb der normalhörenden Gruppe zeigen sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Trefferquoten der verschiedenen Bedingungen. Im Allgemeinen zeigen die beiden CI-Gruppen prozentual ähnliche Ergebnisse wie die Normalhörenden. Dies trifft vor allem auf die visuellen Bedingungen, die auditorischen Tonbedingungen und die auditorischen Sprachbedingungen des jeweilig normalhörenden Ohres zu. Dort sind keine Unterschiede zwischen den Gruppen vorhanden. Dies bedeutet, dass die CI-Träger, ungeachtet der Implantationsseite, gleich gute Resultate aufweisen wie Normalhörende, vor allem in Hinblick auf einfache akustische Stimuli wie Töne.

Entscheidende Defizite zeigen sich allerdings jeweils bei den Sprachbedingungen, wenn das CI-Ohr der CI-Träger stimuliert wird. Hierbei liegt der Anteil der richtig beantworteten Aufgaben mit durchschnittlich ca. 79 % bei der CIL-Gruppe und ca. 86 % bei der CIR-Gruppe deutlich unter denen der normalhörenden Probanden mit ca. 99 % und auch unter denen der

jeweils normalhörenden Ohren der CI-Träger (Tabelle 06). Die Unterscheidung der Wörter und Pseudowörter mit dem CI-Ohr ist für die SSD-Probanden eine deutlich herausfordernde Aufgabe, da das reduzierte CI-Signal mit bekannten Wörtern verglichen und so alles, was ähnlich klingt, als echtes Wort erkannt wird. Diese Schwierigkeit des Sprachverstehens mit dem CI spiegelt sich in den subjektiven Angaben zur Höranstrengung wider. Dies zeigt, dass CI-Patienten unabhängig von ihrer Implantationsseite trotz Rehabilitation und täglichem Training nachweislich Defizite bei komplexen akustischen Stimuli, wie beispielsweise Sprache, gegenüber Normalhörenden aufweisen. Inwiefern diese Tatsache sich im Alltag der CI-Patienten bemerkbar macht, kann man anhand dieser Studie nicht beantworten, da es im täglichen Leben stets ein Zusammenspiel beider Ohren (normalhörendes und CI-Ohr) ist, was die Interaktion mit der Umwelt ermöglicht. Dass sich bei SSD-CI-Patienten jedoch Einbußen beim Sprachverstehen ergeben, ist anhand der hier gewonnenen Erkenntnisse denkbar.

Zu ähnlichen Ergebnissen wie in der vorliegenden Arbeit kommen auch Finke et al. (Finke et al., 2016a; Finke et al., 2016b), die in ihren Arbeiten die Trefferquoten von sowohl ein- als auch beidseitig versorgte CI-Träger mit normalhörenden Probanden vergleichen. Dabei erreichen die CI-Träger im Vergleich zu Normalhörenden ebenfalls geringere Trefferquoten (Finke et al., 2016a). Zudem war die Anzahl der richtig beantworteten Aufgaben bei SSD-CI-Probanden für das CI-Ohr geringer als für das NH-Ohr (Finke et al., 2016b).

Die Arbeitsgruppe von Schierholz et al. untersuchte ebenfalls CI-Träger und normalhörende Probanden. Als auditorisch, visuell und kombiniert audio-visuell präsentierte Stimuli dienten einsilbige Wörter. In der Auswertung zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Trefferquoten zwischen den beiden Probandengruppen, was mit der vorliegenden Studie zumindest mit den Ergebnissen einiger Teilversuche übereinstimmt, nicht jedoch mit den auditorischen Sprachbedingungen bei CI-Stimulation (Schierholz et al., 2017).

In der vorliegenden Arbeit ist auffällig, dass sich im Vergleich der linksseitigen CI-Träger und der normalhörenden Gruppe signifikante Unterschiede in den Bedingungen CAR und SAR ergeben. Schaut man sich die durchschnittlichen Trefferquoten in diesen Bedingungen an, sieht man, dass die CI-Gruppe jeweils mit einer Differenz von nur 2 % schlechter abschneidet als die NH-Gruppe (Tabelle 06). Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl pro Gruppe können diese Effekte auf einzelne Probanden zurückgeführt werden, die das Gesamtergebnis der Gruppe beeinflussen. Aus diesem Grund sind diese Ergebnisse in Bezug auf die alltägliche Konsequenz als nebensächlich zu erachten. Zudem sollte man bedenken, dass die Normalhörenden nicht als direkte Vergleichsgruppe, sondern primär zur Validierung des Studiendesigns ausgewählt wurden.

Reaktionszeiten

In der hier vorliegenden Studie zeigen sich innerhalb und zwischen den Gruppen unterschiedliche Reaktionszeiten für die verschiedenen Bedingungen. Allgemein zeigen sich in allen Gruppen längere Reaktionszeiten für die visuellen Bedingungen als für die auditorischen (Tabelle 07). Zusätzlich benötigen die linksseitigen CI-Träger mit ca. 1.390 ms signifikant länger Zeit zum Beantworten der links präsentierten auditorischen Sprachaufgabe (SAL) im Vergleich zur rechts präsentierten (SAR) mit ca. 1.130 ms. Ähnliches zeigt sich ebenfalls bei den rechts versorgten CI-Probanden, bei denen die Reaktionszeit für SAR mit ca. 1.290 ms signifikant länger dauert als im Vergleich zu SAL (ca. 1.080 ms) und CAR (1.080 ms). Dass beide CI-Gruppen längere Reaktionszeiten für die auditorische Sprachbedingung bei CI-Stimulation benötigen, zeigt sich auch jeweils als Unterschied gegenüber der normalhörenden Gruppe (Abbildung 11), was mit den Ergebnissen von Finke et al. vergleichbar ist (Finke et al., 2016a; Finke et al., 2016b). Die längere Antwortzeit für die Sprachbedingung bei CI-Stimulation in beiden CI-Gruppen der hiesigen Arbeit korreliert zudem mit den Auffälligkeiten in den Trefferquoten. Es sind jeweils die gleichen Bedingungen, in denen sich Unterschiede zeigen. Hinzu kommt, dass die Probanden in den betroffenen Bedingungen im Durchschnitt eine größere subjektive Höranstrengung angeben als bei anderen Teilversuchen (Tabelle 05). Den Zusammenhang der Ergebnisse der Trefferquoten und der Reaktionszeiten bemerken auch Finke et al. in ihrer Arbeit und begründen dies damit, dass das verminderte CI-Signal mithilfe einer höher geordneten Verarbeitung des Gehirns rekonstruiert werde. Daraus ergebe sich eine größere Höranstrengung für CI-Probanden, was in einer längeren Verarbeitungszeit des Signals und somit einer längeren Reaktionszeit resultiere (Finke et al., 2016b). Zu gegenteiligen Erkenntnissen kommt hingegen die Studie von Schierholz et al., die keine wesentlichen Unterschiede in den Reaktionszeiten von CI-Trägern und Normalhörenden feststellen (Schierholz et al., 2017).

Eine von Lazard et al. veröffentlichte Studie zum Outcome der Sprachleistung von CI-Trägern zeigt, dass dieses von zahlreichen Faktoren wie der Dauer der CI-Erfahrung sowie der Dauer und das Alter zu Beginn des Hörverlustes beeinflusst wird (Lazard et al., 2012b). Die in Lazard et al. erwähnten Faktoren gilt es auch in der hier vorliegenden Studie nicht unbeachtet zu lassen. So kann es beispielsweise alleine aufgrund der unterschiedlichen CI-Erfahrung der Probanden mit einem Minimum von 5 Monaten bis zu über 5 Jahren regelmäßiger CI-Nutzung, zu Diskrepanzen in den ermittelten Ergebnissen kommen. Die Nutzungsdauer der CIL- und CIR-Träger unterscheidet sich dabei im Durchschnitt um etwa 1 Jahr, wobei die CIL-Probanden mit einer gemittelten CI-Tragezeit von etwa 2,6 Jahren seit der Implantation Vorteile im Hörverstehen gegenüber den CIR-Probanden mit etwa 1,7 Jahren haben könnten.

Des Weiteren unterscheiden sich die Studienteilnehmer anhand ihrer Länge der Ertaubungszeit vor der CI-Versorgung. Wie aus den Tabellen 01 und 02 zu entnehmen ist, sind die Ursachen der CI-Implantation vielseitig und reichen von verhältnismäßig kurzen Ertaubungszeiten, z.B. durch einen Hörsturz, bis hin zu langen Zeiten einer Hörminderung durch schleichende Prozesse im Rahmen einer stetigen Hörverschlechterung. Aufgrund dessen kann keine klare Aussage zu Unterschieden in der Ertaubungszeit zwischen den CI-Gruppen getroffen werden. Es ist möglich, dass bereits ein unterschiedlicher Grad an Reorganisation des Hörkortex stattgefunden hat, der nun das Hörverstehen der Probanden beeinflusst (Hanss et al., 2009).

4.2 Beurteilung der N100-Analyse

Die N100-Komponente der EEG kann durch viele verschiedene Reize, wie visuelle oder somatosensorische Stimuli, ausgelöst werden. In der hier vorliegenden Arbeit wurde die N100 als eine frühe Antwort des Hörkortex auf einen auditorischen Reiz ausgewertet. Die Amplitude des evozierten Potenzials hängt dabei stark von Parametern wie Lautstärke und Tonfrequenz ab, nicht aber von der Stimulationsart im Sinne einer monauralen oder binauralen Stimulation (Hyde, 1997). Die Fragestellung der hiesigen Studie bezieht sich darauf, wie sich die Amplituden und Latenzen der N100 bezüglich einfacher Ton- und komplexer Sprachstimuli zwischen links- und rechtsseitig versorgten SSD-CI-Probanden verändern.

N100-Amplitude

Betrachtet man die Ergebnisse der N100-Amplituden, sieht man, dass die Amplituden der auditorischen Tonbedingungen in allen Gruppen größer sind als für die Sprachbedingungen (Tabelle 08). Dies ist dabei nicht abhängig von der Stimulationsseite, sondern von der Stimulusart, was sich zum einen dadurch erklären lassen könnte, dass es sich bei den präsentierten Tönen um einfache Stimuli handelt, wohingegen Wörter und Pseudowörter komplexere Verarbeitungsprozesse verlangen. Zudem werden die Töne stets mit gleicher Lautstärke und Frequenz abgespielt, wohingegen Sprache in seinen Eigenschaften als Stimulus stark variiert. Anders als in der hier vorliegenden Studie ergibt die Arbeit von Daliri et al. hingegen größere N100-Amplituden für Silben als für Töne. Untersucht wurden dazu normalhörende Erwachsene. Sie bekamen Töne und Silben bilateral präsentiert, was sich von der hier durchgeführten Studie unterscheidet (Daliri & Max, 2016).

Des Weiteren kann man anhand der in Abbildung 15 dargestellten gemittelten GFP-Signalen aller Gruppen erkennen, dass die N100-Amplituden der Normalhörenden größer sind als die der CI-Träger, wobei die Amplituden der linksseitigen CI-Probanden größer sind als die der rechtsseitigen. Dies spiegelt sich statistisch darin wider, dass der Faktor ‚Gruppe‘ einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Kontroll- und Sprachbedingungen nimmt und

hierbei der entscheidende Unterschied zwischen der NH- und der CIR-Gruppe liegt. Diese Erkenntnisse sind entgegen der Erwartungen nach Schierholz et al., die in ihrer EEG-Studie keine Amplitudenunterschiede zwischen unilateralen CI-Trägern und Normalhörenden finden (Schierholz et al., 2017). Zwar sind in der hier vorliegenden Studie trotz der geringeren N100-Amplituden für die CIL-Gruppe im Vergleich zu den Normalhörenden keine signifikanten Ergebnisse zu finden, dafür unterscheidet sich die Gruppe der rechtsseitigen CI-Träger jedoch gegenüber der NH-Gruppe. Sowohl in den beiden Tonbedingungen, als auch in der CI-Sprachbedingung (SAR) weist die CIR-Gruppe signifikant geringere N100-Amplituden auf als die Normalhörenden (Abbildung 23). Legris et al. untersuchten in ihrer Arbeit das EEG-Signal von erwachsenen SSD-CI-Patienten, die die Silbe ‚ba‘ als Stimulus per Lautsprecher präsentiert bekamen. Dabei ergaben sich in der Auswertung der N100-Amplitude höhere Amplitudenwerte für linksseitig versorgte CI-Probanden im Vergleich zu rechtsseitig Versorgten (Legris et al., 2018). Diese Amplitudenunterschiede liegen in der hier vorliegenden Studie zwischen den beiden CI-Gruppen nicht vor.

Zusammenfassend ergibt sich daraus, dass linksseitige CI-Träger ähnliche N100-Amplituden aufweisen wie Normalhörende. Bei CIR-Probanden ergibt sich hingegen sowohl bei Ton- als auch bei Sprachreizen ein größerer Unterschied der N100-Amplitude im Vergleich zu Normalhörenden. Dies kann ein Indiz dafür sein, dass linksversorgte SSD-CI-Patienten ähnliche Kompetenzen im Hörverstehen zeigen wie Normalhörende, wohingegen rechtsversorgte Patienten ein Defizit aufweisen. Die Ursache hierfür kann darin liegen, dass bei rechtsseitigen SSD-Probanden aufgrund der stattfindenden Plastizität während der Dauer des Hörverlustes und einem veränderten Signal zur kontralateral gelegenen Sprachhemisphäre eine geringere bilaterale Aktivierung der auditorischen Kortexe erfolgt (Anderson et al., 2017). Hilfreich kann in diesem Fall nach Timm et al. musikalisches Training sein. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass bei CI-Trägern, die ein akustisches Training mit Instrumenten erhielten, ein prominenterer N100-Peak im Sinne eines Amplitudenanstiegs im Vergleich zu unmusikalischen CI-Probanden ausgebildet wird (Timm et al., 2012). Eine weitere mögliche Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der CI-Gruppen gegenüber den Normalhörenden kann die CI-Nutzungsdauer sein, die bei den CIL-Trägern durchschnittlich ein Jahr länger beträgt als bei den CIR-Trägern. Dies kann Auswirkungen auf die generelle Hörleistung und auch auf die N100-Amplitude haben (Blamey et al., 1996; Lazard et al., 2012b; Legris et al., 2018).

N100-Latenz

Finke et al. beschreiben in ihrer Arbeit einen Zusammenhang der N100-Latenz und verbalen Fähigkeiten. Untersucht wurden Normalhörende sowie ein- und beidseitig versorgte CI-Träger. Sie bekamen zweisilbige Wörter präsentiert, die verschiedenen Kategorien zugeordnet werden sollten. Dabei ergab sich, dass CI-Träger mit kürzeren N100-Latenzen im Durchschnitt

über bessere Fähigkeiten der Sprachwahrnehmung verfügten als solche mit längeren Latenzen (Finke et al., 2016a). Diese Korrelation kann durch Purdy et al. hingegen nicht bestätigt werden. In dieser Studie unterzogen sich postlingual ertaubte SSD-CI-Patienten zu definierten Zeitpunkten nach der CI-Implantation (in der Woche der CI-Implantation, nach 1, 3, 6 und 9 Monaten) verschiedenen Sprachwahrnehmungstests und EEG-Ableitungen. Während der Zeit nach der Implantation konnten dabei keine signifikanten Veränderungen der N100-Latenz und -Amplitude beobachtet werden. Zudem besteht zwischen den Ergebnissen der EEG-Auswertung und den Resultaten der Sprachwahrnehmungstests der CI-Probanden in dieser Studie kein Zusammenhang (Purdy & Kelly, 2016).

Die N100-Latenzen der hier vorliegenden Studie wurden in einem Zeitfenster von 70 ms bis 125 ms nach Stimulusbeginn beurteilt. Die Latenzen der auditorischen Kontrollbedingungen sind in allen 3 Gruppen ähnlich (Abbildung 15). Daraus kann man schließen, dass das frühe auditive Antwortverhalten auf einfache Tonstimuli bei einseitig versorgten CI-Trägern, unabhängig von der Implantationsseite, dem von Normalhörenden gleicht.

Hingegen wird bei den Sprachbedingungen eine Latenzverschiebung bei den CI-Trägern deutlich. Sie zeigen längere Latenzen für die N100-Komponente als die Normalhörenden, wobei die Latenzen der rechtsseitigen CI-Probanden noch einmal länger sind als die der linksseitigen. Dieser Unterschied ist in beiden CI-Gruppen gegenüber den Normalhörenden ausgeprägt. Anders als bei der N100-Amplitude deutet sich hier eine verlängerte Verarbeitungszeit für Sprache bei links und rechts versorgten SSD-CI-Patienten an, was die Komplexität von Worten gegenüber Tönen deutlich macht. Vergleichbare Erkenntnisse liefern dazu Schierholz et al. In ihrer Studie bekamen Normalhörende und CI-Probanden einsilbige Wörter in verschiedenen Bedingungen präsentiert. Dabei zeigen sich bei den auditorischen Stimuli längere N100-Latenzen für die CI-Träger verglichen mit den normalhörenden Probanden, was mit den Resultaten der Sprachbedingungen der hier vorliegenden Studie übereinstimmt (Schierholz et al., 2017).

Betrachtet man die Gruppe der normalhörenden Teilnehmer der hiesigen Arbeit, zeigen diese keine signifikanten Unterschiede der N100-Latenzen abhängig von der Stimulationsseite und des Stimulustyps, wobei die Latenzen der Tonaufgaben durchschnittlich etwa 10 ms länger sind als die der Sprachaufgaben (Tabelle 09). Probanden der Studie von Daliri et al., bei der normalhörende Erwachsene bilateral auditorische Stimuli präsentiert bekamen, reagierten hingegen mit längeren N100-Latenzen auf Silben verglichen mit Tönen (Daliri & Max, 2016).

Die linksseitigen CI-Träger zeigen im Mittel für die Sprachaufgaben eine längere N100-Latenz, was vor allem bei CI-Stimulation (SAL) einen signifikanten Unterschied zu Normalhörenden darstellt. Dies korreliert mit der Einschätzung der subjektiven Höranstrengung der CI-Träger, die bei der Bedingung SAL gegenüber den anderen Teilversuchen laut der Probanden deutlich erschwert war. Hinsichtlich der Töne ergeben sich somit keine Differenzen zu den

Ergebnissen der NH-Probanden, anders als bei der Sprache, wo es zu einer Verzögerung der N100-Latenz besonders bei CI-Stimulation kommt.

Bei den rechtsseitigen CI-Trägern zeigt sich eine längere Latenz der N100 für Sprach- als für Tonstimuli. Dieser Unterschied gilt unabhängig von der Stimulationsseite, also sowohl bei Reizpräsentation auf dem normalhörenden als auch auf dem CI-Ohr und ist für beide Seiten signifikant (Abbildung 24). Im Vergleich zur NH- und CIL-Gruppe weisen die CIR-Träger des Weiteren auffällig kürzere Latenzen für die Tonbedingung ‚CAL‘ auf, was mit den Ergebnissen von Legris et al. korreliert (Legris et al., 2018). Dies kann damit zusammenhängen, dass die Verarbeitung der Tonhöhe bevorzugt in der rechten Hirnhemisphäre erfolgt (Obrzut et al., 1989). Das normalhörende linke Ohr der CIR-Probanden ist kontralateral dazu gelegen und aufgrund des eingeschränkten rechtsseitigen CI-Signals möglicherweise stärker trainiert als es in den anderen beiden Gruppen der Fall ist. Im Gruppenvergleich ist zudem, ähnlich wie bei den linksseitigen CI-Trägern, die N100-Latenz der CI-Sprachstimulation der rechtsseitigen CI-Probanden (SAR) mit ca. 110,57 ms gegenüber den Normalhörenden mit ca. 90,8 ms signifikant verlängert. Dies bedeutet eine Latenzdifferenz bei Sprachstimulation des CIs, was ein Hinweis auf ein Defizit in der Sprachverarbeitung bedeuten kann. Zudem schätzten die CIR-Probanden, ebenso wie die linksseitigen CI-Träger, diesen Versuchsabschnitt subjektiv mit einer deutlich erhöhten Höranstrengung ein verglichen zu anderen Teilversuchen.

Laut der Studie von Legris et al. weisen linksseitige CI-SSD-Träger längere N100-Latenzen auf als rechtsseitige. Untersucht wurden hierbei die EEG-Signale von erwachsenen SSD-Patienten, die die Silbe ‚ba‘ als Stimulus per Lautsprecher präsentiert bekamen (Legris et al., 2018). Einen solchen Latenzunterschied zwischen der CIL- und CIR-Gruppe findet sich in der hier vorliegenden Arbeit hingegen nicht. Stattdessen weisen die rechtsseitigen CI-Träger der hiesigen Studie in der frühen Verarbeitung akustischer Stimuli eine andere Besonderheit im Vergleich zu Normalhörenden und linksseitig versorgten CI-Trägern auf. Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, zeigt das GFP-Signal und damit das zugrundeliegende ereigniskorrelierte Potential, ein verändertes Muster bei der Sprachstimulation des normalhörenden Ohres der CIR-Probanden (SAL). Im definierten Zeitrahmen von 70 ms bis 125 ms lassen sich anders als bei den anderen Bedingungen und Gruppen keine klaren GFP-Peaks zuordnen. Stattdessen gibt es einen frühen Ausschlag bei einer Latenz von ca. 50 ms und einen späteren um etwa 140 ms. Dabei ist anhand der Abbildung 18 und der Zusammenschau der EEG-Signale der gesamten Gruppe die Signalhebung um 140 ms als eigentliche „N100“ anzusehen. Diese Latenz liegt größtenteils außerhalb der in dieser Arbeit definierten Zeitspanne der N100, weshalb die Peakbestimmung in dieser Hinsicht als ungenau betrachtet werden muss. Eine Alternative wäre an dieser Stelle, die Bestimmung der N100 manuell vorzunehmen, was jedoch von der subjektiven Einschätzung des Untersuchers abhängig wäre. Die Ursache des abweichenden Latenzverhaltens könnte entsprechend der Arbeit von Vinogradov et al. darin liegen,

dass sich durch die Defizite in der zur Sprachhemisphäre kontralateral gelegenen Verarbeitung von Sprachreizen mit dem CI komplexe Veränderungen in höhergeordneten Zentren des Gehirns ausgebildet haben, die sich nach peripher fortsetzen und so auch schon in frühen Komponenten der EEG sichtbar werden (Vinogradov et al., 2012).

Im Gegensatz zu Studien über bilateral ertaubte Erwachsene, wie in der Arbeit von Liang et al., bei der rechtsseitig versorgte CI-Probanden ein besseres Outcome gegenüber linksseitig Versorgten aufweisen, deutet sich in der hier vorliegenden Studie das Gegenteil an (Liang et al., 2020). Beidseitig gehörlose Probanden können laut aktueller Forschung von einer CI-Implantation des rechten Ohres mehr profitieren, da die kontralaterale Verbindung zur linken sprachdominierenden Hemisphäre erhalten bleibt (Henkin et al., 2008; Liang et al., 2020; Chilosi et al., 2014). Diese Gegebenheit ist jedoch irrelevant, wenn Probanden nur einseitig ertauben und dabei das rechte Ohr betroffen ist. Hier ist demnach die natürliche kontralaterale Aktivierung gestört, sodass alternativ ipsilaterale Hirnareale oder Areale anderer Modalitäten zur Verarbeitung des akustischen Reizes hinzugezogen werden (Polonenko et al., 2019; Hanss et al., 2009; Zhou et al., 2018). Man darf zudem nicht außer Acht lassen, dass das Outcome von Probanden bei solchen Tests von vielen verschiedenen Faktoren abhängt. So beeinflussen Gegebenheiten wie das Implantationsalter und -verfahren, Stimulustypen und individuelle subjektive Faktoren die elektrophysikalischen Ergebnisse der EEG, die im Grunde lediglich ein Abbild von oberflächlichen Spannungsdifferenzen ist, welche durch viele gleichzeitig beanspruchte Regionen im Gehirn aktiviert werden (Firszt et al., 2006; Lazard et al., 2012a).

Abschließend sollen methodische Aspekte der hier vorliegenden Arbeit beleuchtet werden. Die verhältnismäßig geringe Probandenzahl von insgesamt 27 Teilnehmern begründet sich darin, dass der Versuch mit einem hohen Aufwand verzeichnet war und strenge Einschlusskriterien für die CI-Träger definiert wurden, sodass insgesamt für den angegebenen Zeitraum nicht mehr Probanden zur Verfügung standen. Zudem sollte anhand dieser Studie das Design für eventuell weitere Versuche gleichen Aufbaus getestet werden.

Allgemein lassen sich Unterschiede zwischen der normalhörenden und den CI-Gruppen feststellen, wobei festzuhalten ist, dass die NH-Gruppe keine direkte Vergleichsgruppe zu den CI-Trägern ist. So weisen die CI-Träger im Durchschnitt mit ca. 60 Jahren ein deutlich höheres Alter als die NH-Gruppe mit ca. 27 Jahren auf. Diese Gegebenheit kann bereits aufgrund der Altersspanne zu physiologisch veränderten Hör- und Verarbeitungsleistungen bei den älteren CI-Trägern führen. Dies könnte sich in der EEG widerspiegeln und beispielsweise mit verlängerten kortikalen Antwortlatenzen oder geringeren Amplituden des EEG-Signals einhergehen. Der Altersunterschied könnte einzelnen CI-Patienten zudem die generelle Absolvierung des Experimentes erschwert haben, da die Aufgaben am Computer zu beantworten

waren, was für manche sicher ungewohnt war und die Anforderungen somit subjektiv schwerer waren als für Probanden, die mit dieser Technik stärker vertraut sind.

Ein weiterer Umstand besteht darin, dass manche CI-Probanden bei Versuchsabschnitten, bei denen ihr Implantat ausgeschaltet wurde, einen Tinnitus angaben. Dieser kann als Störfaktor empfunden werden und die Konzentration der Probanden negativ beeinflussen, was wiederum für Veränderungen im EEG-Signal sorgen könnte. Zudem regt der Ton des Tinnitus selbst das Gehirn an und wird neben den präsentierten Stimuli zusätzlich verarbeitet.

Die unterschiedlich lange Nutzung des CIs ist ein weiterer Faktor, der die Ergebnisse beeinflusst haben könnte. Die kürzeste Erfahrungszeit mit dem Implantat lag bei Durchführung der Studie bei etwa 5 Monaten, wohingegen die längste Gebrauchsdauer bei ungefähr 5 Jahren lag. Anhand dieser Arbeit lässt sich nicht abschätzen, ob es innerhalb der angegebenen Zeitspanne zu kortikalen Veränderungen bei der Verarbeitung von auditorischen Reizen kommt. Jedoch verweisen wir in diesem Zusammenhang auf die Arbeit von Legris et al., die in ihrer Studie die kortikale Reorganisation und das Sprachverständnis bei einseitig ertaubten CI-Probanden vor sowie 6 und 12 Monate nach CI-Implantation analysierten. Hierbei zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Analysen der GFP-Signale zu den verschiedenen Zeitpunkten (Legris et al., 2018). Unabhängig davon gibt es in der hiesigen Studie außerdem Unterschiede in der CI-Versorgungsdauer zwischen den beiden CI-Gruppen. Die CIL-Träger weisen eine durchschnittliche Nutzungsdauer von etwa 2,6 Jahren und die CIR-Träger von etwa 1,7 Jahren auf. Diesbezüglich ist es denkbar, dass die CIL-Gruppe Vorteile im Umgang mit dem CI aufgrund einer längeren Erfahrungszeit haben könnte.

Ein weiterer Punkt, den es zu berücksichtigen gilt, ist der Einfluss des aktivierten CIs auf das EEG-Signal. Anhand der Abbildungen 13 und 14 kann man entnehmen, dass es deutlich sichtbare Artefakte in der EEG zu Beginn der Stimuluspräsentation gibt, die jeweils auf die Aktivierung der Implantate zurückzuführen sind. Vergleicht man jedoch das nachfolgende EEG-Signal mit den Ableitungen bei Stimulation der normalhörenden Ohren, ergibt sich kein Anhalt dafür, dass infolge der CI-Aktivierung das EEG-Signal grundlegend verändert wird. Um all die angesprochenen Aspekte näher zu überprüfen, ist es sicherlich erforderlich die Studie mit einer größeren Probandenanzahl auszuweiten. So beeinflussen abnorme Ergebnisse einzelner Probanden weniger stark die Datenauswertung, was robustere Erkenntnisse bedeuten würde.

5 Zusammenfassung

Einseitig hochgradiger Hörverlust, genannt Single-Sided Deafness, führt zu Einschränkungen in der Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt. Cochleaimplantate können dabei helfen, diese Defizite auszugleichen. Jedoch kann durch die Versorgung nicht bei allen betroffenen Personen mit einem gleichwertigen Ergebnis der Hörleistung, vor allem in Bezug auf Sprachverarbeitung, gerechnet werden, da unter anderem die Seite der Gehörlosigkeit entscheidend ist. Die Ursache hierfür liegt in der kortikalen Sprachverarbeitung, die aufgrund einer Spezialisierung der Hirnhemisphären bei der Mehrheit der Menschen vorwiegend in der linken Gehirnhälfte lokalisiert ist. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit der Frage, ob die Seite der CI-Implantation bei einseitiger Gehörlosigkeit durch die kontralaterale Verarbeitung von Sprache Auswirkungen auf das Hörverstehen hat. Hierzu wurden links- und rechtsseitig versorgten SSD-CI-Trägern unilateral Töne und Sprache (Wörter und Pseudowörter) als akustische Reize präsentiert. Im Anschluss wurden Verhaltensdaten der Probanden anhand von Trefferquoten und Reaktionszeiten ausgewertet und in Zusammenhang mit Ergebnissen aus durchgeführten Sprachtests dargestellt. Des Weiteren wurden Amplituden und Latenzen der N100-Komponente der EEG analysiert. Normalhörende Probanden testeten vorab das Studiendesign.

Die Ergebnisse zeigen, dass beide CI-Gruppen bei CI-Sprachstimulation abweichende Verhaltensdaten im Vergleich zu anderen Bedingungen zeigen. Sowohl links- als auch rechtsseitige SSD-CI-Träger beantworten die auditorische Sprachbedingung mit dem CI signifikant schlechter als die übrigen Versuche. Hinzu kommt eine in beiden Gruppen verlängerte Reaktionszeit für diese Bedingung verglichen mit der Sprachstimulation des jeweils normalhörenden Ohres. Hinsichtlich der EEG-Daten zeigen alle Gruppen höhere Amplituden für Ton- als für Sprachbedingungen, wobei das Amplitudenverhalten der CIL-Träger dem der Normalhörenden ähnelt. Hingegen weisen CIR-Träger im Durchschnitt geringere Amplituden als Normalhörende auf. Zwischen beiden CI-Gruppen zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der N100-Amplituden. Auffällig ist zudem eine Latenzverschiebung bei Sprachstimulation zwischen den Gruppen. Demnach haben CI-Träger bei CI-Sprachstimulation längere N100-Latenzen als Normalhörende. Unterschiede zwischen den beiden CI-Gruppen bestehen hierbei nicht. Die Daten der rechtsseitigen SSD-CI-Träger offenbaren noch eine Besonderheit: Bei Sprachstimulation ihres normalhörenden Ohres zeigt sich ein verändertes EEG-Muster, dass im festgelegten Zeitrahmen keinen klaren Peak der N100 definieren lässt. Zusammenfassend deuten die Ergebnisse auf einen möglichen Vorteil der links- verglichen mit rechtsseitigen SSD-CI-Trägern hinsichtlich dem Hörverstehen komplexer Sprachstimuli. Bezogen auf einfache Tonstimuli ergeben sich hingegen keine entscheidenden Unterschiede zwischen beiden CI-Gruppen.

6 Literaturverzeichnis

1. Anderson, C. A., Lazard, D. S., & Hartley, D. E. H. (2017). Plasticity in bilateral superior temporal cortex: Effects of deafness and cochlear implantation on auditory and visual speech processing. *Hearing Research*, 343, 138–149.
2. Bethmann, A., Tempelmann, C., Bleser, R. de, Scheich, H., & Brechmann, A. (2007). Determining language laterality by fMRI and dichotic listening. *Brain research*, 1133, 145–157.
3. Blamey P., Arndt P., Bergeron F., Bredberg G., Brimacombe J., Facer G. (1996). Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants. *Audiol Neurootol* 1(5):293-306.
4. Brain Products GmbH. actiCAP-128-channel-Standard-2. Unter https://www.brainproducts.com/filedownload.php?path=downloads/actiCAP-128-channel-Standard-2_1201.pdf (abgerufen am 21.08.2019).
5. Burton, H., Firszt, J. B., Holden, T., Agato, A., & Uchanski, R. M. (2012). Activation lateralization in human core, belt, and parabelt auditory fields with unilateral deafness compared to normal hearing. *Brain research*, 33–47.
6. Chilosi, A. M., Comparini, A., Cristofani, P., Turi, M., Berrettini, S., Forli, F., Orlandi, G., Chiti, A., Giannini, N., Cipriani, P., & Cioni, G. (2014). Cerebral lateralization for language in deaf children with cochlear implantation. *Brain and language*, 129, 1–6.
7. Daliri, A., & Max, L. (2016). Modulation of Auditory Responses to Speech vs. Nonspeech Stimuli during Speech Movement Planning. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 234.
8. Döge, J., Baumann, U., Weissgerber, T., & Rader, T. (2017). Single-Sided Deafness: Impact of Cochlear Implantation on Speech Perception in Complex Noise and on Auditory Localization Accuracy. *Otology & neurotology official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 38, e563-e569.
9. Easwar, V., Yamazaki, H., Deighton, M., Papsin, B., & Gordon, K. (2017). Simultaneous bilateral cochlear implants: Developmental advances do not yet achieve normal cortical processing. *Brain and behavior*, 7, 1-15.
10. Fabbri-Destro, M., Avanzini, P., Stefani, E. de, Innocenti, A., Campi, C., & Gentilucci, M. (2015). Interaction Between Words and Symbolic Gestures as Revealed By N400. *Brain topography*, 28, 591–605.
11. Fernández, G., Greiff, A. de, Oertzen, J. von, Reuber, M., Lun, S., Klaver, P., Ruhlmann, J., Reul, J., & Elger, C. E. (2001). Language Mapping in Less Than 15 Minutes: Real-Time Functional MRI during Routine Clinical Investigation. *NeuroImage*, 14, 585–594.
12. Finke, M., Bönitz, H., Lyxell, B., & Illg, A. (2017). Cochlear implant effectiveness in post-lingual single-sided deaf individuals: what's the point? *International journal of audiology*, 56, 417–423.
13. Finke, M., Büchner, A., Ruigendijk, E., Meyer, M., & Sandmann, P. (2016a). On the relationship between auditory cognition and speech intelligibility in cochlear implant users: An ERP study. *Neuropsychologia*, 87, 169–181.

14. Finke, M., Sandmann, P., Bönitz, H., Kral, A., & Büchner, A. (2016b). Consequences of Stimulus Type on Higher-Order Processing in Single-Sided Deaf Cochlear Implant Users. *Audiology & Neuro-Otology*, 21, 305–315.
15. Firszt, J. B., Ulmer, J. L., & Gaggl, W. (2006). Differential representation of speech sounds in the human cerebral hemispheres. *The anatomical record. Part A, Discoveries in molecular, cellular, and evolutionary biology*, 288, 345–357.
16. Hahlbrock, K. H. (1953). Sprachaudiometrie und neue Worttests. *Archiv für Ohren-, Nasen- und Kehlkopfheilkunde*, 162, 394–431.
17. Hanss, J., Veuillet, E., Adjout, K., Besle, J., Collet, L., & Thai-Van, H. (2009). The effect of long-term unilateral deafness on the activation pattern in the auditory cortices of French-native speakers: influence of deafness side. *BMC neuroscience*, 23.
18. Henkin, Y., Taitelbaum-Swead, R., Hildesheimer, M., Migirov, L., Kronenberg, J., & Kishon-Rabin, L. (2008). Is there a right cochlear implant advantage? *Otology & neurotology official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 29, 489–494.
19. Hofmann, M. J., Tamm, S., Braun, M. M., Dambacher, M., Hahne, A., & Jacobs, A. M. (2008). Conflict monitoring engages the mediofrontal cortex during nonword processing. *Neuroreport*, 19, 25–29.
20. Hugdahl, K., & Westerhausen, R. (2016). Speech processing asymmetry revealed by dichotic listening and functional brain imaging. *Neuropsychologia*, 93, 466–481.
21. Hyde, M. (1997). The N1 Response and Its Applications. *Audiology & Neuro-Otology* 1997; 2:281-307.
22. Jiwani, S., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2016). Early unilateral cochlear implantation promotes mature cortical asymmetries in adolescents who are deaf. *Human brain mapping*, 37, 135–152.
23. Kraaijenga, V. J. C., Derksen, T. C., Stegeman, I., & Smit, A. L. (2018). The effect of side of implantation on unilateral cochlear implant performance in patients with prelingual and postlingual sensorineural hearing loss: A systematic review. *Clinical otolaryngology official journal of ENT-UK ; official journal of Netherlands Society for Oto-Rhino-Laryngology & Cervico-Facial Surgery*, 43, 440–449.
24. Krüger, M. (2015). EUHA Förderpreis 2015: Entwicklung und Evaluation einer adaptiven Skalierungsmethode zur Ermittlung der subjektiven Höranstrengung. Europäische Union der Hörgeräteakustiker e.V.
25. Lazard, D. S., Giraud, A.-L., Gnansia, D., Meyer, B., & Sterkers, O. (2012a). Understanding the deafened brain: implications for cochlear implant rehabilitation. *European annals of otorhinolaryngology, head and neck diseases*, 129, 98–103.
26. Lazard, D. S., Vincent, C., Venail, F., van de Heyning, P., Truy, E., Sterkers, O., Skarzynski, P. H., Skarzynski, H., Schauwers, K., O'Leary, S., Mawman, D., Maat, B., Kleine-Punte, A., Huber, A. M., Green, K., Govaerts, P. J., Fraysse, B., Dowell, R., Dillier, N., Burke, E., Beynon, A., Bergeron, F., Başkent, D., Artières, F., & Blamey, P. J. (2012b). Pre-, per- and postoperative factors affecting performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants: a new conceptual model over time. *PLoS one*, 7, e48739.

27. Legris, E., Galvin, J., Roux, S., Gomot, M., Aoustin, J.-M., Marx, M., He, S., & Bakhos, D. (2018). Cortical reorganization after cochlear implantation for adults with single-sided deafness. *PloS one*, 13, e0204402.
28. Liang, C., Wenstrup, L. H., Samy, R. N., Xiang, J., & Zhang, F. (2020). The Effect of Side of Implantation on the Cortical Processing of Frequency Changes in Adult Cochlear Implant Users. *Frontiers in neuroscience*, 14, 368.
29. Manca, A. D., & Grimaldi, M. (2016). Vowels and Consonants in the Brain: Evidence from Magnetoencephalographic Studies on the N1m in Normal-Hearing Listeners. *Frontiers in psychology*, 7, 1413.
30. Moberly, A. C., Lowenstein, J. H., & Nittrouer, S. (2016). Word Recognition Variability With Cochlear Implants: "Perceptual Attention" Versus "Auditory Sensitivity". *Ear and Hearing*, 37, 14–26.
31. Morris, L. G., Mallur, P. S., Roland, J. T., Waltzman, S. B., & Lalwani, A. K. (2007). Implication of central asymmetry in speech processing on selecting the ear for cochlear implantation. *Otology & neurotology official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 28, 25–30.
32. Murray, M. M., Brunet, D., & Michel, C. M. (2008). Topographic ERP analyses: a step-by-step tutorial review. *Brain topography*, 20, 249–264.
33. Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 Wave of the Human Electric and Magnetic Response to Sound: A Review and an Analysis of the Component Structure. *Psychophysiology*, The Society for Psychological Research, Inc., Vol. 24, No. 4.
34. Obrzut, J. E., Conrad, P. F., & Boliek, C. A. (1989). Verbal and nonverbal auditory processing among left- and right-handed good readers and reading-disabled children. *Neuropsychologia*, Vol. 27, No. 11/12, 1357-1371.
35. Polonenko, M. J., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2018). Delayed access to bilateral input alters cortical organization in children with asymmetric hearing. *NeuroImage. Clinical*, 17, 415–425.
36. Polonenko, M. J., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2019). Cortical plasticity with bimodal hearing in children with asymmetric hearing loss. *Hearing Research*, 372, 88–98.
37. Purdy, S. C., & Kelly, A. S. (2016). Change in Speech Perception and Auditory Evoked Potentials over Time after Unilateral Cochlear Implantation in Postlingually Deaf Adults. *Seminars in Hearing*, 37, 62–73.
38. Schaarschmidt, M. (2013). Cochlea-Implantate: Wenn Hörgeräte nicht mehr helfen... Retrieved from <https://www.aerzteblatt.de/archiv/136885/Cochlea-Implantate-Wenn-Hoergeraete-nicht-mehr-helfen>. Accessed 08 February 2021.
39. Schierholz, I., Finke, M., Kral, A., Büchner, A., Rach, S., Lenarz, T., Dengler, R., & Sandmann, P. (2017). Auditory and audio-visual processing in patients with cochlear, auditory brainstem, and auditory midbrain implants: An EEG study. *Human brain mapping*, 38, 2206–2225.
40. Selpien, H., Siebert, C., Genc, E., Beste, C., Faustmann, P. M., Güntürkün, O., & Ocklenburg, S. (2015). Left dominance for language perception starts in the extrastriate cortex: An ERP and sLORETA study. *Behavioural brain research*, 291, 325–333.

41. Shiomi, Y., Naito, Y., Honjo, I., Fujiki, N., Kaneko, K., Takahashi, H., Yamashita, M., & Kawano, M. (1999). Cochlear implant in patients with residual hearing. *Auris, nasus, larynx*, 26, 369–374.
42. Stropahl, M., & Debener, S. (2017). Auditory cross-modal reorganization in cochlear implant users indicates audio-visual integration. *NeuroImage. Clinical*, 16, 514–523.
43. Szalárdy, O., Tóth, B., Farkas, D., Kovács, A., Urbán, G., Orosz, G., Szabó, B. T., Hunyadi, L., Hajdu, B., & Winkler, I. (2018). The effects of attention and task-relevance on the processing of syntactic violations during listening to two concurrent speech streams. *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, 18, 932–948.
44. Timm, L., Agrawal, D., C Viola, F., Sandmann, P., Debener, S., Büchner, A., Dengler, R., & Wittfoth, M. (2012). Temporal feature perception in cochlear implant users. *PLoS one*, 7, e45375.
45. Vinogradov, S., Fisher, M., & Villers-Sidani, E. de (2012). Cognitive training for impaired neural systems in neuropsychiatric illness. *Neuropsychopharmacology official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 37, 43–76.
46. Wagener, K., Brand, T., & Kollmeier, B. (1999). Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache Teil II: Optimierung des Oldenburger Satztests. *Z Audiol* 1999; 38 (2) 44-56.
47. Wedekind, A., Távora-Vieira, D., & Rajan, G. P. (2018). Cortical auditory evoked responses in cochlear implant users with early-onset single-sided deafness: indicators of the development of bilateral auditory pathways. *Neuroreport*, 29, 408–416.
48. Wendt, B., & Scheich, H. (2002). The “Magdeburger Prosodie-Korpus”. *Speech Prosody 2002, Internationale Konferenz; Aix-en-Provence, Frankreich, 11.-13. April 2002, ISCA-Archiv*.
49. Zhou, X., Seghouane, A.-K., Shah, A., Innes-Brown, H., Cross, W., Litovsky, R., & McKay, C. M. (2018). Cortical Speech Processing in Postlingually Deaf Adult Cochlear Implant Users, as Revealed by Functional Near-Infrared Spectroscopy. *Trends in hearing*, 22, 2331216518786850.

Teile der Arbeit sind in folgendem Artikel veröffentlicht:

Deliano, M., Seidel, P., Vorwerk, U., Stadler, B., Angenstein, N. (2022). Effect of cochlear implant side on early speech processing in adults with single-sided deafness. *Clinical Neurophysiology*, 14029-39. (accepted 4 May 2022, available online 20 May 2022)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.05.008>; PMID: 35671652

Danksagungen

Die Danksagung ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Ehrenerklärung

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

„Einfluss der CI-Implantationsseite bei SSD-Patienten auf die frühe Verarbeitung akustischer Stimuli in der Elektroenzephalografie“

in der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit Unterstützung durch Herrn Prof. Dr. Ulrich Vorwerk, Frau Dr. Beate Stadler, Frau Dr. Nicole Angenstein und Herrn Dr. Matthias Deliano ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Darstellung des Bildungsweges

Der Lebenslauf ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Anlagen

Anhang 01: Instruktionen für den Versuch

Instruktion für den Versuch

Das Experiment besteht darin, Substantive und sogenannte Pseudowörter voneinander zu unterscheiden. Pseudowörter klingen ähnlich wie Wörter, haben jedoch keine Bedeutung (z.B. Batsef, Kludong).

Der Versuch erfolgt in mehreren Etappen, wobei die jeweilige Aufgabe vor jedem Durchgang angesagt wird. Allgemein gibt es folgende Varianten:

1. Die Substantive und Pseudowörter werden von einer Frauen- oder Männerstimme vorgelesen und mit dem linken oder rechten Ohr gehört.
2. Die Substantive und Pseudowörter erscheinen auf dem Monitor und müssen selbst gelesen werden.
3. Es gibt einen akustischen Kontrollversuch, bei dem zwischen einem hohen und einem tiefen Ton unterschieden werden muss.
4. Es gibt einen visuellen Kontrollversuch, bei dem zwischen einer hochgestellten und einer tiefgestellten Linie auf dem Monitor unterschieden werden muss.

Im Versuch unterscheiden Sie Substantive und Pseudowörter, Töne oder Linien. Ihre jeweilige Entscheidung zeigen Sie durch einen Tastendruck an. Bitte warten Sie mit der Eingabe bis der Stimulus beendet ist. Das Experiment geht erst weiter, wenn eine Taste gedrückt wurde. Sollte der Versuch einmal nicht weiter gehen, drücken Sie bitte die jeweilige Maustaste nochmals.

- Während der gesamten Zeit schauen Sie bitte auf das Fixationskreuz bzw. auf die Mitte des Bildschirms, wenn Wörter, Linien und Töne präsentiert werden.
- Sitzen Sie möglichst bequem, entspannt und still auf dem Stuhl.

Die Lautstärke können Sie vor dem Experiment selber wählen, sodass Sie die Wörter gut hören können.

Danke für Ihre Teilnahme!

Anhang 02: Bewertung der subjektive Höranstrengung nach jedem Versuchsabschnitt entsprechend der Skala von Krüger et al. (Krüger, 2015)

Höranstrengung:

nur Störgeräusch
extrem anstrengend
===
sehr anstrengend
===
deutlich anstrengend
===
mittelgradig anstrengend
===
wenig anstrengend
===
sehr wenig anstrengend
===
mühelos

Anhang 03: Bewertung der Höranstrengung des gesamten Versuchs

Bewertung der Höranstrengung

Datum:

Name:

Alter:

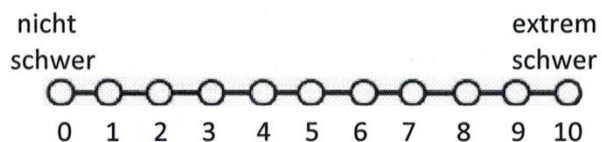
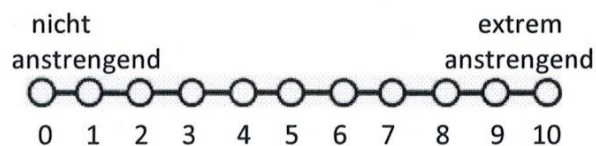
CI- Gerät:

CI- Seite:

Start:

Ende:

Wie lange tragen Sie Ihr CI schon? _____ Monate/ _____ Jahre

Wie **schwer** fanden Sie den Test?Wie **anstrengend** fanden Sie den Test?Welche Hörsituation war am **schwierigsten**? _____

Vergleichbar mit folgender Alltagssituation: _____

Welche Hörsituation war am **leichtesten**? _____

Vergleichbar mit folgender Alltagssituation: _____
