

Aus dem Institut für Klinische Neurowissenschaften und Medizinische
Psychologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Prof. Dr. med. A. Schnitzler

Auditorische Aktivierung beim Lesen von Wörtern

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Julia Gelenar Marae

(2024)

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachterin: Prof. Dr. rer. nat. Katja Biermann-Ruben

Zweitgutachterin: Prof. Dr. med. Charlotte von Gall

Meinen Eltern in Liebe.

Hinweis: Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

Zusammenfassung (deutsch)

Die Theorie der *Grounded Cognition* postuliert, dass Sprache und Konzepte nicht nur über semantische Schaltkreise im Gehirn, sondern auch durch das sensomotorische Nervensystem verarbeitet werden. Es gibt bereits Evidenz für die Beteiligung des auditorischen Systems bei der Verarbeitung visuell präsentierter Wörter, die mit akustischen Merkmalen assoziiert sind, insbesondere im posterioren (pSTG) und mittleren temporalen Gyrus (MTG).

Die vorliegende Studie quantifiziert zunächst in einem Tonparadigma die Aktivierung des auditorischen Kortex beim Hören von lauten und leisen Tönen (1) mithilfe der N100m-Komponente des ereigniskorrelierten Feldes. In einem zweiten Schritt gilt es zu untersuchen, ob die Responsivität des auditorischen Kortex auf einen wiederholten Standardton durch das vorherige Lesen von „lauten“ (z.B. „schreien“) versus „leisen“ (z.B. „flüstern“) Verben (2) differenziert moduliert wird, und, ob diese Verben, die unterschiedliche Lautstärken bei der Ausführung der jeweiligen Tätigkeit implizieren, auch eine korrespondierende unterschiedliche Aktivierung in den auditorischen kortikalen Arealen hervorrufen (3).

Bei 20 gesunden Versuchspersonen wurde mittels Magnetenzephalographie die Aktivierung beim Hören von lauten und leisen 440-Hz-Standardtönen gemessen. Dies diente als Lokalizier für den auditorischen Kortex. Im Wortparadigma verarbeiteten die Versuchspersonen visuell präsentierte deutsche Verben, die unterschiedliche Lautstärken bei der Ausführung der jeweiligen Tätigkeit implizieren. Den Verben folgte jeweils ein kurzer 440-Hz-Standardton.

Die N100m-Komponente des ereigniskorrelierten Feldes wurde im Rahmen der Stromdipol-Quellen-Analyse modelliert und diente der Quantifizierung der auditorischen Aktivierung unter den Bedingungen: (2) Töne nach Wortpräsentation und (3) mögliche Aktivierung beim Lesen von akustisch assoziierten Verben unterschiedlicher impliziter Lautstärke.

Im Tonparadigma resultierte eine bilaterale signifikant stärkere Aktivierung der N100-Quellen nach lauten im Vergleich zu leisen Tönen (1).

Im Sprachparadigma ergab sich eine linkslateralisierte signifikant reduzierte auditorische Antwort auf einen Ton, dem ein implizit lautes im Vergleich zu einem implizit leisen Verb vorausging (2). In der rechten Hemisphäre ließ sich ein solches Ergebnis nicht beobachten. Verben mit implizit hoher Lautstärke selbst riefen im Vergleich zu Verben, die niedrige Lautstärke implizieren, eine signifikant stärkere Aktivierung des linken N100-Dipols hervor (3). Die Ergebnisse weisen auf eine spezifische und linkslateralisierte Beteiligung des auditorischen Kortex bei der Verarbeitung von akustisch assoziierten Wörtern hin und stehen im Einklang mit der Theorie der *Grounded Cognition*.

Zusammenfassung (englisch)

The theory of grounded cognition postulates that language and concepts are processed not only by semantic brain circuits, but also by neural sensory and motor systems. As for the auditory system, there is some evidence for its engagement during the visual processing of words referring to sounds or acoustic features especially in the posterior temporal gyrus (pSTG) and middle temporal gyrus (MTG). The present study measures in a localizer task the activation of the auditory cortex while listening to loud compared to quiet tones (1) by detecting the N100 event-related component of the magnetic field. In a second step, the study further examines whether auditory cortex responsiveness to a same acoustic stimulus is differentially modulated by earlier processing of “loud” (e.g., to shout) as compared with “quiet” (e.g., to whisper) action verbs (2) and whether processing of visually presented words characterized by different levels of associated loudness differentially activate the auditory cortex themselves (3).

Twenty healthy participants were measured with magnetoencephalography (MEG) while listening to loud and quiet 440-Hz tones serving as a functional localizer task for the auditory cortex. The word paradigm required participants to semantically process visually presented German verbs describing human actions typically producing loud or quiet sounds. Verbs were followed by a short 440 Hz tone of stable sound pressure level.

We performed dipole source modeling of the N100 event-related component in the localizer task (1), which served as a proxy for auditory activation in the other conditions under consideration: (2) tones following word presentation and (3) putative auditory activation during silent reading of inflected verbs associated with different levels of loudness.

In line with previous study results the localizer study showed a statistically significant larger peak amplitude of the auditory N100-sources induced by loud tones as compared to quiet (1) tones bilaterally. In the word paradigm, the left hemispheric N100-peak evoked by an identical tone (2) was significantly lower following “loud” actions versus following “quiet” actions. No difference emerged in the right hemisphere. During visual word processing (3) the area-under-the-curve related to the N100-source in the time window of 100-215 ms after visual word onset showed a significantly stronger involvement of the N100-dipole while reading “loud” compared to “quiet” verbs in the left but not in the right hemisphere. The current results suggest specific and left-lateralized contribution of the auditory cortex to the processing of sound-related action words, thus supporting the theory of grounded cognition.

Abkürzungsverzeichnis

EEG	Elektroenzephalographie/ -gramm
EMG	Elektromyographie/ -gramm
EOG	Elektrookulographie/ -gramm
ERP	event-related potential
ERF	event-related field
fMRT	funktionelle/s Magnetresonanztomographie/ -gramm
ISI	Interstimulusintervall
M	Mittelung
MEG	Magnetenzephalographie/ -gramm
MRT	Magnetresonanztomographie/ -gramm
MTG	mittlerer temporaler Gyrus
n	Anzahl
N100	neuronale Antwort um 100 ms nach akustischer Stimulation
PET	Positronen-Emissions-Tomographie/ -gramm
PNS	Peripheres Nervensystem
pSTG	posteriorer superiorer temporalen Gyrus
SD	Standardabweichung
SPECT	Single-Photon-Emission-Computer-Tomographie/ -gramm
STS	superiorer temporaler sulcus
ZNS	Zentrales Nervensystem

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Zentrales Nervensystem und Neokortex	1
1.2 Auditorisches System.....	1
1.2.1 Auditorischer Kortex	2
1.2.2 Verarbeitung im auditorischen Kortex	3
1.3 Lautstärke.....	3
1.4 MEG.....	4
1.4.1 Dipol-Quellen-Analyse.....	7
1.5 Evozierte Aktivität und N100	8
1.5.1 Lautstärkeeffekt	10
1.5.2 Repetitionseffekt.....	11
1.6 Kognition	13
1.7 Sprache	14
1.8 Grounded Cognition	15
1.8.1 Prozessierung von Wortbedeutung.....	17
1.9 Lateralisierung	19
1.10 Hypothesen	20
2 Material und Methoden	21
2.1 Allgemeine Informationen zur Durchführung der MEG-Studie.....	21
2.2 Probanden.....	21
2.3 Stimulusmaterial und Versuchsaufbau.....	22
2.3.1 Tonparadigma.....	23
2.3.2 Sprachparadigma	24
2.4 MEG-Datenerhebung	26
2.5 Datenanalyse.....	26
2.5.1 Mittelung	26
2.5.2 Ausrichtung des MRTs (MRT-MEG-Integration).....	29
2.5.3 Erstellung der Sphäre	29
2.5.4 Quellenmodellierung	30
2.5.5 Amplitudenmaxima und <i>Area under the curve</i>	32
2.6 Statistische Analyse.....	34
3 Ergebnisse	35
3.1 Tonparadigma.....	35
3.1.1 Verhaltensdaten	35
3.1.2 Evozierte Aktivität.....	35

3.1.3 Modellierung auditorischer Dipole und Quellenaktivierung	38
3.1.5 Statistische Analyse	42
3.2 Sprachparadigma: Ton nach „lauten“ und „leisen“ Wörtern.....	42
3.2.1 Verhaltensdaten aus dem Sprachparadigma	42
3.2.2 Evozierte Aktivität.....	43
3.2.3 Quellenaktivierung	44
3.2.4 Statistische Analyse.....	46
3.3 Sprachparadigma: „Laute“ und „leise“ Wörter.....	47
3.3.1 Evozierte Aktivität.....	47
3.3.2 Quellenaktivierung	48
3.3.3 Statistische Analyse.....	50
4 Diskussion.....	50
4.1 Tonparadigma.....	51
4.1.1 Lokalisation auditorischer Quellen.....	51
4.1.2 Aktivierung auditorischer Quellen: laute und leise Töne (Hypothese 1)	52
4.2 Sprachparadigma.....	53
4.2.1 Aktivierung auditorischer Quellen: Ton nach „lauten“ und „leisen“ Wörtern (Hypothese 2)	55
4.2.2 Aktivierung auditorischer Quellen: „laute“ und „leise“ Wörter (Hypothese 3)	64
4.3 Lateralisierung.....	72
4.4 Grounded Cognition	74
4.5 Zusammenfassung und Ausblick.....	75
5 Literaturverzeichnis	77
6 Anhang.....	91

1 Einleitung

1.1 Zentrales Nervensystem und Neokortex

Die Wahrnehmung von Reizen und Prozessen innerhalb und außerhalb des Organismus geschieht über das Nervensystem. Das Nervensystem lässt sich in das zentrale (ZNS) und periphere Nervensystem (PNS) unterteilen.

Das zentrale Nervensystem umfasst Gehirn und Rückenmark, die eine funktionelle Einheit darstellen. Diesen entspringen Nerven (Hirnnerven und Spinalnerven), die das periphere Nervensystem bilden und der Kommunikation des ZNS mit dem Körper dienen. Mithilfe von Sinnesorganen ist der Mensch in der Lage Empfindungsreize unterschiedlicher Natur wahrzunehmen. Sinneswahrnehmungen werden durch Hirnnerven an das Gehirn weitergeleitet. Die Weiterverarbeitung erfolgt in anatomisch unterschiedlich lokalisierten primären und sekundären Hirnarealen (Schünke, 2009). Der Kortex gliedert sich in den phylogenetisch jüngeren Neokortex, auch Isokortex genannt, und den Allokokortex, der den Paläokortex und den Archikortex umfasst. Der Neokortex kann in Menschen bis zu 80% des Gehirns einnehmen (Kaas, 2013) und besteht aus 6 Schichten, die in ihrer Ausprägung regional variieren (Amunts und Zilles, 2013). Im Neokortex werden die Sinnessysteme, mit Ausnahme des olfaktorischen Systems, und die Ursprungsgebiete der motorischen Bahnen repräsentiert. Zudem befinden sich hier Regionen sekundärer und tertiärer modalitätsspezifischer Verarbeitung. Die Wahrnehmung in ihrer Gesamtheit basiert letztlich auf multimodalen Assoziationsgebieten, in denen verschiedene Modalitäten zusammengeführt werden (Amunts und Zilles, 2013).

1.2 Auditorisches System

Das auditorische Sinnessystem ermöglicht die Wahrnehmung und Verarbeitung von akustischen Reizen. Dabei stellen Schalldruckschwankungen den adäquaten Reiz des Gehörorgans dar. Sie gehen von einer Schallquelle in Form von Schallwellen aus und werden durch ein Medium, meist Luft, an das Ohr herangetragen (Zenner, 2011).

Akustische Reize werden über die inneren Haarzellen im Corti-Organ des Ohres wahrgenommen (Abbildung 1). Über die mechanische Verbiegung der Zellen durch die Schallwelle, wird eine Signalkaskade ausgelöst. Die Reizweiterleitung erfolgt über den Nervus cochlearis in entsprechende Kerngebiete, die im Hirnstamm liegen. In diesen

Kerngebieten erfolgt die Umschaltung auf ein 2. Neuron, wodurch die Schallinformation schließlich über vier bis sechs weitere Kerngebiete in den primären auditorischen Kortex weitergeleitet wird. Hier wird die akustische Information dem Menschen bewusst. Efferente Fasern, das heißt Nervenfasern, die zum Innenohr ziehen, dienen der Schallvorverarbeitung und der Schallprotektion (Meyer, 2013, Schünke, 2009).

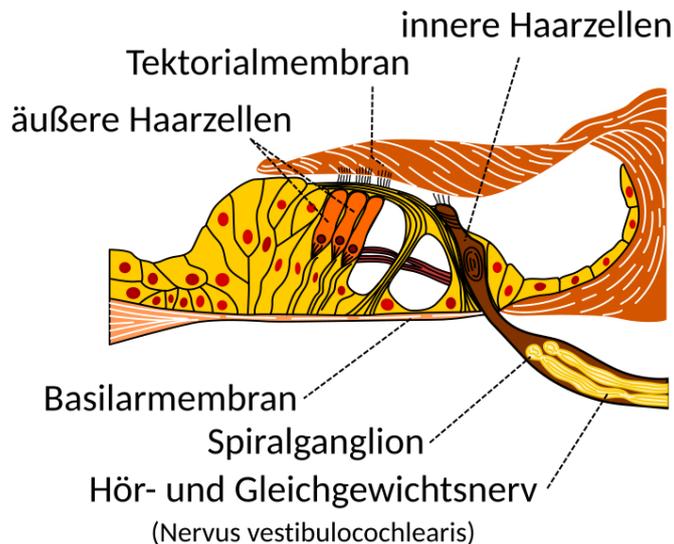


Abb. 1: Querschnitt durch das Corti-Organ. (Quelle: Wikimedia Commons, Madhero88 (2009), Lizenz: CC BY-SA 3.0. (Madhero88, 2009)

1.2.1 Auditorischer Kortex

Der auditorische Kortex befindet sich bei Affen (Hackett und Kaas, 2004) und beim Menschen im Temporallappen auf dem supratemporalen Planum, und erstreckt sich entlang des unteren Randes der Sylvischen Fissur (lateralen Sulcus) und des lateralen Gyrus temporalis superior (Sweet et al., 2005). Man geht davon aus, dass der auditorische Kortex aus einer Kernregion besteht, die den primär auditorischen Kortex umfasst. Daran angrenzend befinden sich der sekundäre und tertiäre auditorische Kortex (sog. „belt“ und „parabelt“) (Pickles, 2012).

Der primäre auditorische Kortex liegt in den Gyri temporales transversi, die auch Heschl'sche Querwindungen genannt werden, und der Area 41 nach Brodmann entsprechen. Der sekundäre auditorische Kortex schließt sich kaudal im Heschl Sulcus an (Meyer, 2013). Hinsichtlich Form und Volumen des auditorischen Kortex kann eine erhebliche interindividuelle anatomische Varianz bestehen (Rademacher et al., 2001).

1.2.2 Verarbeitung im auditorischen Kortex

Der menschliche auditorische Kortex ist im Vergleich zu dem bei Primaten 5- bis 10-mal größer. Dies lässt sich durch die Rolle sprachlicher Funktionen erklären. In vielen Arbeiten wurde bereits die funktionelle Asymmetrie des auditorischen Kortex diskutiert, die der Optimierung des Verarbeitungsprozesses von sprachlichen, musikalischen und anderen akustischen Reizen dienen soll. Während sehr lange die linke Hemisphäre den sprachlichen Funktionen, und die rechte Hemisphäre der Verarbeitung von Musik zugeordnet wurde, gilt dieses Modell heute als zu vereinfacht (Meyer, 2008, Meyer et al., 2012). Im Rahmen der Sprachverarbeitung liegen unterschiedliche Befunde für eine funktionelle Asymmetrie im Cortex vor (s. Abschnitt Lateralisierung).

Einer Theorie von Zatorre and Belin (2001) zufolge sei der linke auditorische Kortex auf die Verarbeitung temporaler Parameter, die für das Sprachverstehen bedeutend sind, spezialisiert, während der rechte auditorische Kortex spektrale Muster dekodiert. Einen ähnlichen Ansatz macht Poeppel (2003). In dem Asymmetric sampling in time (AST)-Modell geht er von einer zeitlich getrennten Verarbeitung aus. Schnelle zeitliche Modulationen (ca. 40 Hz) werden bevorzugt durch den linken auditorischen Kortex verarbeitet, während langsame Modulationen kontralaterale Areale aktivieren.

1.3 Lautstärke

Die objektive Lautstärke eines Tons wird durch die Schalldruckamplitude bestimmt. Der Schalldruck wird in der handlicheren logarithmischen Maßeinheit, dem Schalldruckpegel, mit der Messgröße Dezibel (dB SPL) angegeben. Eine Verzehnfachung des Schalldrucks bedeutet eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 20 dB SPL (Formel: $L_p = 20 \times \lg(p/p_0)$; p = effektiver (wahrgenommener) Schalldruck, p_0 = Referenzwert des Schalldrucks) (Schmidt et al., 2011, S. 346). Eine geeignetere Größe für die objektive Lautstärke ist die Schallintensität. Sie ist definiert durch die Energie, die pro Zeiteinheit auf eine gewisse Fläche trifft und wird dementsprechend in Watt pro m^2 angegeben. Der Schallintensitätspegel wird logarithmiert in Dezibel angegeben (Formel: $L_I = 10 \times \lg(I/I_0)$; p = effektiver (wahrgenommener) Schalldruck, p_0 = Referenzwert des Schalldrucks) (Schmidt et al., 2011, S. 346).

Von der objektiven Lautstärke ist die subjektive Lautstärke zu unterscheiden. Diese ist vom subjektiven Hörvermögen sowie von der Frequenz abhängig und wird in der

Messgröße Phon angegeben. Bei einer Tonfrequenz von 1000 Hz decken sich die Werte des Lautstärkepegels in Phon mit dem Schalldruckpegel in dB (Schmidt et al., 2011, S. 346). Das Merkmal Lautstärke wird im Kontext dieser Studie sowohl im Rahmen akustischer Reize in einem Tonparadigma als auch in impliziter Form bei visuell präsentierten Verben im Sprachparadigma variiert.

1.4 MEG

Die Magnetenzephalographie (MEG) ist ein nicht-invasives neurophysiologisches Untersuchungsverfahren zur Messung neuroelektrischer Hirnaktivität, die in messbaren Magnetfeldern resultiert und ist durch eine besonders hohe zeitliche und räumliche Auflösung gekennzeichnet.

Die Methodik beruht auf der Messung intrazellulärer Stromflüsse in kortikalen apikalen Dendriten, die einen Spannungsabfall im extrazellulären Raum produzieren (Klinke et al., 2005). Postsynaptische exzitatorische und inhibitorische Signale an der Nervenzelle induzieren Ionenströme, die das Membranpotential des Neurons beeinflussen. Bei ausreichender Verschiebung des im Ruhezustand negativen Membranpotentials in positiver Richtung entsteht bei Erreichen eines Schwellenwertes ein Aktionspotential. Die neuronalen elektrischen Ströme werden entlang der Axone der im Kortex parallel angeordneten Pyramidenzellen weitergeleitet. Die synchrone Aktivierung der Pyramidenzellen erzeugt eine erfassbare Ladungsänderung an der Nervenzelle, die als Stromdipol bezeichnet werden kann (Da Silva et al., 2010). Entsprechend den physikalischen Gesetzen (Maxwell-Gleichung) verursachen die Ströme neben einem elektrischen auch ein magnetisches Feld (Hämäläinen et al., 1993).

Unter der Annahme, dass eine einzelne Pyramidenzelle ein Stromdipol von annähernd 0,2 Pikoampere misst, und das kleinste an der Schädeldecke messbare Signal bei circa 10 Nanoampere liegt (Hämäläinen et al., 1993) ist eine synchrone Aktivierung von nahezu 50.000 Neuronen notwendig um ein messbares magnetisches Feld zu erzeugen (Da Silva et al., 2010).

Die apikalen Dendriten der kortikalen Pyramidenzellen sind nahezu parallel und senkrecht zur Kortexoberfläche angeordnet. Gyri und Sulci bilden das Oberflächenrelief der Großhirnrinde. Dadurch sind vor allem die Dendriten der Neuronen in den Fissuren parallel zur Schädeldecke ausgerichtet und werden im MEG von den planaren Gradiometern detektiert. Senkrecht zur Schädelkalotte orientierte Dendriten generieren

ein radiales Magnetfeld, welches nicht von den planaren Gradiometern registriert werden kann (Da Silva et al., 2010). In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich die Messdaten der planaren Gradiometer analysiert.

Während die Elektroenzephalographie (EEG) mittels Elektroden direkt an der Schädeldecke die Potentialänderungen summiert detektiert, ermöglicht die Magnetenzephalographie die Messung von kleinen magnetischen Feldern mithilfe von hoch sensitiven Sensoren in unmittelbarer Nähe der Schädeldecke. Die MEG und EEG ermöglichen die Beobachtung von neurologischen Prozessen mit einer hohen zeitlichen Auflösung von wenigen Millisekunden. Funktionelle Bildgebende Verfahren, wie die funktionelle MRT (fMRT) oder die Positronen-Emissions-Tomographie (PET), sind räumlich hochauflösende Darstellungen der Anatomie, mit der auch funktionelle Prozesse sichtbar gemacht werden können. Sie beruhen auf einer indirekten Messung der neuronalen Prozesse über neurovaskuläre Kopplung und unterliegen somit prinzipbedingt einer zeitlichen Verzögerung.

Die räumliche Auflösung der MEG liegt unter optimalen Bedingungen im Bereich von wenigen Millimetern und ist dem EEG in Teilen überlegen. Grund dafür ist, dass bei der Interpretation von EEG-Daten Unterschiede bezüglich der Leitfähigkeit und Dicke von Schädeldecke und Gewebe berücksichtigt werden müssen (Hämäläinen et al., 1993), was für die MEG nicht der Fall ist. Dadurch eignet sich die Methode der MEG besonders gut, um mittels Analyse der gemessenen neuromagnetischen Feldverteilungen wahrscheinliche neuronale Generatorkonstellationen zu schätzen. Die neuromagnetischen Felder betragen typischerweise 50-500 Femtotesla und sind somit im Vergleich zum um acht bis neun Größenordnungen stärkeren Erdmagnetfeld extrem klein (Hämäläinen et al., 1993).

Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDs), erstmals von David Cohen (Cohen et al., 1972) angewendet, sind hochempfindliche Sensoren, die auf quantenmechanischen Methoden beruhen und in der Lage sind, sehr kleine Magnetfelder zu erfassen. Sie bestehen aus einem supraleitenden Ring mit zwei Bruchstellen, den Josephson-Kontakten (Josephson, 1962), an denen die Supraleitung durch dünnes elektrisch isolierendes Material unterbrochen wird (Abbildung 2).

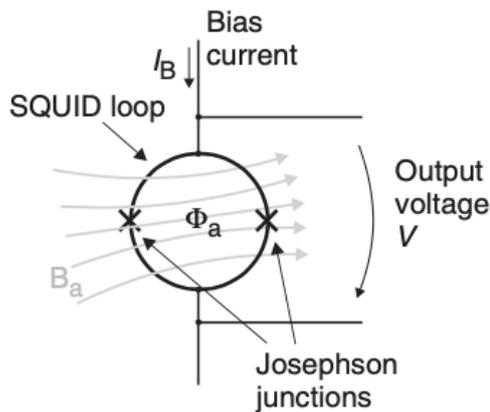


Abb. 2: Ein SQUID mit zwei Josephson-Kontakten. Schematische Darstellung einer SQUID-Schleife im Magnetfeld B_a , das den magnetischen Fluss Φ_a in der SQUID-Schleife verursacht. Quelle: Parkkonen (2010) mit freundlicher Genehmigung des Verlags.

Supraleiter sind Materialien, die beim Unterschreiten einer materialspezifischen sogenannten kritischen Temperatur (T_c), einen elektrischen Widerstand gegen Null anstreben. Die kritische Temperatur liegt meist unter 20 Kelvin (-253°C), sodass Supraleiter mit flüssigem Helium gekühlt werden müssen. Die Siedetemperatur von Helium beträgt 4 K (-269°C). Das flüssige Helium befindet sich mitsamt den Sensoren in einem zylinderförmigen Behälter, dem Kryostat des MEG-Gerätes (s. Abbildung 3), der mit seiner helmförmigen Mulde über dem Kopf der Versuchsperson positioniert wird (Parkkonen, 2010). In dem supraleitenden Ring befindet sich ein magnetischer Fluss, der sich abhängig vom äußeren Magnetfeld ändern kann. Bei Änderung wird ein elektrischer Kreisstrom angeregt. Der elektrische Spannungsabfall ist an den Josephson-Kontakten messbar, sodass durch die SQUID keine absoluten Flüsse oder Magnetfeldstärken, sondern lediglich die Änderung der Magnetfeldstärke anhand der Spannungsschwankungen registriert wird (Parkkonen, 2010). SQUIDs sind mit einem Durchmesser von weniger als einem Millimeter sehr klein und somit auf Flusstransformer angewiesen, die an die SQUIDs gekoppelt sind. Sie bestehen ebenfalls aus supraleitendem Material. Man unterscheidet Magnetometer, die eine einfache Aufnahmespule besitzen, von Gradiometern, die aus zwei entgegengesetzt gewundenen Nachweisspulen bestehen. Letztere Konfiguration aus einer Aufnahmespule und einer sogenannten Kompensationsspule ermöglicht die Unterdrückung von magnetischen Feldern mit geringer Ortsabhängigkeit bereits vor der Messung (Parkkonen, 2010).

Die hohe Sensitivität der SQUIDs hat zur Folge, dass die Anfälligkeit des Messsystems für Artefaktsignale aus dem Umfeld steigt. Zur Abschirmung der Sensoren von externen Magnetfeldern ist das MEG-Gerät in einem magnetisch abgeschirmten Raum mit Wänden aus Aluminium und μ -Metall installiert. Zusätzlich werden die Versuchspersonen gebeten, jegliche magnetischen Objekte vor Betreten des Raumes abzulegen (Parkkonen, 2010).



Abb. 3: Das 306-Kanal-Ganzkopf-MEG-System (Elekta Neuromag®, Elekta, Helsinki, Finnland) des Universitätsklinikums Düsseldorf. Die Sensoren bestehen aus 102 Triple-Sensor-Elementen, jeweils bestehend aus einem Magnetometer und zwei orthogonalen planaren Gradiometern.

1.4.1 Dipol-Quellen-Analyse

Die Äquivalente Stromdipol-Quellen-Analyse (Dipol-Quellen-Analyse) ist eine interaktive Analyse zur Modellierung einer Quelle, welche die an der Schädelkalotte gemessenen Magnetfelder mit großer Wahrscheinlichkeit generiert haben könnte. Das sogenannte Inverse Problem beschreibt dabei die Möglichkeit der Entstehung eines neuromagnetischen Feldes durch verschiedene neuronale Aktivierung, sodass die Rekonstruktion einer Stromquelle nur ein möglicher aber kein eindeutiger Generator des

neuromagnetischen Signals darstellt (Hämäläinen et al., 1993). Die Annäherung an ein geeignetes Quellenmodell erfordert die Hinzunahme von anatomischen und physiologischen Kenntnissen, sowie die Anfertigung eines Volumenleiters, in dem die Quelle lokalisiert sein soll.

Die planaren Gradiometer der MEG registrieren, im Gegensatz zur EEG, nur zur Schädeldecke tangential orientierte eher oberflächennahe Aktivität. Dies vereinfacht die Interpretation der Daten insofern, dass diese MEG-Signale wahrscheinlich von Quellen generiert werden, die sich in den kortikalen Fissuren befinden. Der äquivalente Stromdipol repräsentiert das Zentrum der neuronalen Aktivität und verläuft zwischen den beiden Extrema des Magnetfeldes (siehe Abbildung 4). Er wird durch drei Raumkoordinaten x , y und z , sowie durch seine Orientierung und seine Stärke [nA] definiert (Ahonen et al., 1993). Die Orientierung des Stromdipols entspricht dem Stromfluss im Gehirn, die parallel zur Ausrichtung der Pyramidenzellen verläuft.

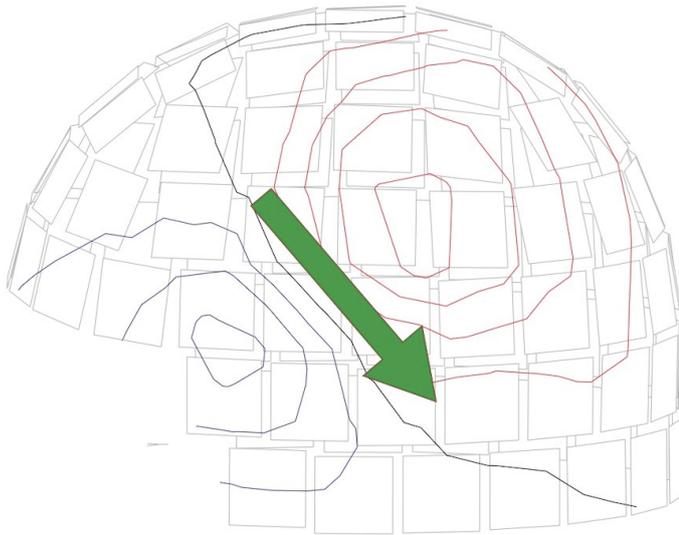


Abb. 4: Schematische Darstellung eines äquivalenten Stromdipols, Ansicht auf die linke Seite des Helms mit den Messsensoren (helle Quadrate). Die Mitte des äquivalenten Stromdipols (grüner Pfeil) repräsentiert das Zentrum der für die Darstellung an die Oberfläche projizierten neuronalen Aktivität. Er verläuft zwischen den beiden Extrema des Magnetfeldes (rot und blau), und wird definiert durch seine Orientierung, seine Richtung, sowie durch drei Raumkoordinaten x , y und z .

1.5 Evozierte Aktivität und N100

Als evozierte Aktivität wird eine Aktivierung als Antwort auf einen dargebotenen Reiz bezeichnet. Die auditorische Aktivierung auf einen akustischen Reiz kann mittels

verschiedener Methoden ermittelt werden. Mithilfe von bildgebenden Verfahren wie fMRT und PET-Scans, die eine hohe räumliche Auflösung aufweisen, konnte eine Steigerung der Aktivität in auditorischen Areale infolge eines Tonstimulus beobachtet werden (Näätänen und Picton, 1987). Neurophysiologische Messverfahren, wie MEG und EEG, besitzen neben der guten räumlichen Auflösung eine sehr gute zeitliche Auflösung, und ermöglichen die Analyse von evozierten Potentialen und Feldern infolge eines Reizes (Hinrichs, 2012, S.516).

Das Gehirn zeigt auf ein wiederholt präsentiertes Ereignis ähnliche Antworten. Um diese ereigniskorrelierten Signale gegenüber den zufällig verteilten Störsignalen zu extrahieren, werden zeitliche Epochen um diese Ereignisse definiert. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses werden diese Epochen gemittelt. Auditorisch evozierte Potentiale, die vom Vertex gegen das Mastoid mit Latenzen um 100 ms abgeleitet werden, spiegeln die Aktivierung des superioren Temporalen Planums wider, das den primär auditorischen Kortex umfasst (Scherg et al., 1989, Scherg und Von Cramon, 1990). Im Rahmen der Auswertung von ereigniskorrelierten Antwortsignalen nehmen Komponenten eine zentrale Rolle ein. Die Komponente ist der „Beitrag eines speziellen Generators zu der aufgezeichneten Welle“ (Näätänen und Picton, 1987).

Die N100 (Synonym: N1) stellt eine gut untersuchte Komponente der ereigniskorrelierten Antwort nach akustischen Sinneseindrücken dar und kann als negatives Potential im elektrischen Feld mit einer Latenz von etwa 100 ms gemessen werden. Näätänen und Picton (1987) konnten drei Hauptkomponenten der N100 entschlüsseln, die zum registrierten Ausschlag beitragen. Die erste Komponente wird auf Grundlage der Arbeiten von Vaughan und Ritter (1970) und Scherg und Von Cramon (1986) als frontozentral generiertes negatives Potential beschrieben, welches von bilateral vertikal orientierten Dipolen im supratemporalen Lobus generiert wird. Vornehmlich diese Komponente wird von magnetischen Sensoren als N100m erfasst. Die zweite Komponente zeigt einen biphasischen Verlauf mit einem positiven Ausschlag bei 100 ms und einem negativen bei 150 ms. Diese wird von einer radial angeordneten Quelle im lateralen Gyrus temporalis superior generiert und ist durch die planaren Sensoren im MEG nicht detektierbar. Die dritte Komponente hat einen negativen Ausschlag bei 100 ms und spiegelt vermutlich eine Orientierungsreaktion wider (Näätänen und Picton, 1987). Die N100-Komponente wird von verschiedenen exogenen Faktoren, wie zum

Beispiel Tonlautstärke, Interstimulusintervall sowie endogenen Faktoren, wie zum Beispiel Aufmerksamkeit beeinflusst (Hillyard et al., 1973, Näätänen und Picton, 1987).

1.5.1 Lautstärkeeffekt

Akustische Eigenschaften, wie zum Beispiel Modulationen der Lautheit, der Tonfrequenz oder der Tonhöhe aktivieren primär auditorische Rindfelder und rufen ebenfalls eine N100-Antwort hervor (Näätänen und Picton, 1987). Die Antwortmodulation in Abhängigkeit der Lautstärke ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevant und wird im Folgenden eingehender beschrieben.

In einer Reihe von verschiedenen Studien wurde mittels EEG (Hegerl et al., 1994, Neukirch et al., 2002), MEG (Vasama et al., 1995, Elberling et al., 1981), fMRT (Jäncke et al., 1998, Hart et al., 2002, Mulert et al., 2005) der Einfluss von Lautstärkevariation auf die Aktivierung des menschlichen auditorischen Kortex untersucht. In diesen Studien konnte übereinstimmend gezeigt werden, dass eine zunehmende Tonintensität mit einer zunehmenden Aktivierung der Quellen im auditorischen Kortex selbst, aber auch in anliegenden Arealen, korreliert. Diese Zunahme der Aktivierung zeigt sich in einer zunehmenden Antwort gemessen in Stromdichte, aber auch in einer räumlichen Zunahme der Aktivierung über den Kortex. Der zunächst mittels akustisch evozierter Potentiale (AEP) beobachtete Lautstärkeeffekt ließ sich erstmals von Eberling 1981 auch im magnetischen Feld replizieren. Die Größe der magnetischen Felder nimmt mit steigender Tonintensität zu (Elberling et al., 1981, Vasama et al., 1995). Vergleicht man den Zusammenhang zwischen Aktivierung im auditorischen Kortex und der Stimulusintensität, so kann man je nach angewendetem Verfahren Unterschiede feststellen. Die Amplitude akustisch evozierter Potentiale steigt mit zunehmender Stimulusintensität linear an. Im MEG konnte man hingegen eine Zunahme evozierter Felder bis ungefähr 60 dB messen. Bei höheren Intensitäten stellte sich ein Plateau ein, oder die neuronale Aktivität nahm sogar ab (Adler und Adler, 1989, 1991, Neukirch et al., 2002). Analog dazu verhielten sich die zeitlichen Latenzen (Reite et al., 1982, Pantev et al., 1986, Neukirch et al., 2002). Eine ERP-Studie von Pineda et al. (1991) zeigte, dass der neuronale Ursprung der auditorisch evozierten Antwort den Zusammenhang zwischen Amplitude und Tonintensität beeinflusst. Potentiale, die im primär auditorischen Kortex gemessen wurden, nahmen linear zur Tonintensität zu, während Potentiale im auditorischen Assoziationskortex bei steigender Intensität abnahmen.

Analog zu den evozierten Potentialen und Feldern besteht eine Abhängigkeit der Stromdipolstärke von der Tonintensität (Hegerl et al., 1994). Dabei variiert das Quadrat des intrazellulären axialen Stroms, der dem äquivalenten Stromdipol zugrunde liegt, zum Logarithmus der Stimulusintensität (Bak et al., 1985).

1.5.2 Repetitionseffekt

Die Amplitude und Latenz der auditorisch evozierten N1-Komponente ist neben Stimulusintensität und Frequenz auch vom Interstimulusintervall (ISI) (Hari et al., 1982, Herrmann et al., 2016, Javitt et al., 2000, Pereira et al., 2014, Teichert et al., 2016), sowie von der Ähnlichkeit zweier aufeinanderfolgender Stimuli abhängig (Butler, 1968, Herrmann et al., 2014, Näätänen et al., 1988, Yagcioglu and Urgan, 2008).

Der Repetitionseffekt beschreibt den Zusammenhang zwischen ISI und N1 Komponente. In den Studien zum Repetitionseffekt kristallisieren sich insbesondere zwei verschiedene Erklärungsansätze heraus, auf die der Repetitionseffekt zurückgeführt werden kann – der Ansatz der neuronalen Refraktärität und der Ansatz der Habituation. Davis et al. (1966) stellte in seiner Arbeit fest, dass die Amplitude der N1-Komponente des evozierten Potentials nach einem wiederholten auditorischen Reiz erst bei einem ISI über 6 Sekunden maximal ist. Bei kürzeren Interstimulusintervallen wurde eine reduzierte N1-Amplitude beim zweiten Stimulus beobachtet. Dieser Befund wurde in mehreren Studien reproduziert und auch im magnetisch evozierten Feld beobachtet (Hari et al., 1982). Diese Abnahme der N1-Komponente stabilisiert sich allerdings, wenn die zwei aufeinanderfolgenden Stimuli identisch sind und das Interstimulusintervall konstant bleibt (Budd et al., 1998, Rosburg und Sörös, 2016). Die reduzierte N1-Antwort auf einen wiederholten Stimulus wurde zunächst von Ritter et al. (1968) und später auch von anderen Arbeiten (Budd et al., 1998, Näätänen und Picton, 1987, Rosburg et al., 2010), auf die Erholungsphase der neuronalen Generatoren, auch Refraktärzeit genannt, zurückgeführt. In dieser temporären Erholungsphase können Neurone kein Aktionspotential generieren, das als Reizantwort im evozierten Feld gemessen werden kann, sodass die verminderte Anzahl an stimulierbaren Neuronen nach einem auditorischen Reiz entsprechend in einer reduzierten N1-Amplitude resultiert. Näätänen und Picton (1987) behaupten zudem, dass der Repetitionseffekt stimuluspezifisch ist. Die Aktivierung durch einen zweiten Tonstimulus, der dem ersten nicht identisch ist, wird durch andere Neuronengruppen hervorgerufen und zeigt daher eine weniger reduzierte

auditorische Antwort bei vorausgehendem Tonstimulus, da die anderen Neurone nicht refraktär sind. Je unterschiedlicher die aufeinanderfolgenden Tonstimuli, desto größer die auditorische Antwort, da die N1-Komponente selbst auch durch einen Unterschied in Tonlevel und Stimuluseigenschaften (in Näätänen und Picton (1987) Change 1 und 2 genannt) hervorgerufen wird. Fruhstorfer et al. (1970), und später auch andere Arbeiten (Bourbon et al., 1987, Ruusuvirta, 2021, Woods und Elmasian, 1986, Yue et al., 2017) behaupten hingegen, dass der Repetitionseffekt durch Habituation entsteht, da die beobachtete negativ exponentielle Abnahme der N1 Amplitude ein wichtiges Charakteristikum für Habituation darstellt (Thompson und Spencer, 1966). In der rezenten Arbeit von Rosburg und Mager (2021) werden die beiden Erklärungsansätze Refraktärität und Habituation mittels eines *Oddball-Task* diskutiert. Ein *Oddball-Task* ist ein Studienparadigma mit Standardstimuli und wenigen abweichenden (*deviant*) Stimuli, die sich in Frequenz oder Dauer der Reizdarbietung von den Standardtönen unterscheiden. Geht man von Refraktärität als Erklärung für den Repetitionseffekt aus, so würde man keinen oder nur eine geringe Amplitudenreduktion bei einem Standardstimulus erwarten, der auf einen abweichenden (*deviant*) Stimulus folgt. Außerdem erwartet man bei Refraktärität keine negativ exponentielle Reduktion der N1-Amplitude, und keine N1 Reduktion bei ISIs die länger sind als die Erholungsperiode. Beim Habituationseffekt hingegen, würde man bei Standardstimuli, die auf abweichende Stimuli folgen, eine gesteigerte Antwort erwarten. Dieser gesteigerten Antwort liegt die Dishabituation zugrunde, die ein wichtiges Merkmal zur Unterscheidung zwischen Habituation und Fatigue darstellt (Thompson, 2009). Rosburg und Mager (2021) haben, wie mehrere vorausgehende Arbeiten auch den Effekt der Dishabituation nicht belegen können und argumentiert, dass daher beim Repetitionseffekt nicht von Habituation ausgegangen werden kann. Sie erklären, dass der fehlende Effekt der Dishabituation nicht automatisch die Theorie der Refraktärität bestätigt, sondern, dass die wiederholt belegte Abwesenheit eines Effekts mit den Erwartungen der Refraktäritätshypothese übereinstimmt, und somit diese unterstützt. In der Zusammenschau liegt somit mehr Evidenz für den Erklärungsansatz der neuronalen Refraktärität vor, auf den der Repetitionseffekt zurückgeführt werden kann.

Ein weiterer Aspekt, der unabhängig von den beiden zuvor genannten Erklärungsansätzen einen Einfluss auf die Amplitude der N1 nehmen kann, ist die Erwartung der Versuchsperson. Die zunehmende N1-Suppression im Zusammenhang mit zunehmender

Stimulusdarbietung im Rahmen des Einflusses der erwarteten Wahrnehmung auf mentaler Repräsentation wird in der Arbeit von Baldeweg (2006) diskutiert. Neuronale Systeme nutzen Erwartungsanalysen, um die sequentielle Verarbeitung von Reizen zu vereinfachen. Als Indikatoren für erwartete Prozessierung konnte elektroenzephalographisch eine positive Antwort (Repetition Positivity) und eine negative Antwort (Mismatch Negativity) gemessen werden. Wenn der erwartete sensorische Reiz mit dem tatsächlichen sensorischen Reiz übereinstimmt, kann eine reduzierte Antwort auf den Stimulus beobachtet werden (Repetition Positivity). Stimmen der erwartete Reiz und der tatsächliche Reiz nicht überein, wird eine Mismatch Negativity (MMN) gemessen (siehe Bendixen et al., 2012). Im auditorischen System konnte der Einfluss von Erwartung reproduziert werden (Haenschel et al., 2005, Hsu et al., 2016).

1.6 Kognition

Kognition umfasst alle Formen des Erkennens und Wissens und die Prozesse der mentalen Repräsentation in einem Individuum. Es ist die Fähigkeit aufgenommene Informationen zu verarbeiten und sie in Wissen umzuwandeln (Hänsel et al., 2016, S. 24). Bereits im 18. Jahrhundert wurde der enge Zusammenhang zwischen Sprache und Denken thematisiert (Wildgen, 2012, S. 9).

Im Rahmen der kognitiven Linguistik steht Sprache als essenzielle kognitive Fähigkeit des Menschen im Fokus der Forschung. Dabei wird Sprache von Vertretern, wie Lackoff, Langacker und Talmy als Teil allgemeiner kognitiver Prozesse verstanden und die Theorie der Sprache als autonomes Modul des Gehirns, wie sie von Noam Chomsky postuliert wird, ausdrücklich abgelehnt (Jessen et al., 2018, S. 19). Konzepte und konzeptuelle Repräsentationen basieren auf modalitätsspezifischen Systeme und sind wichtige Bausteine menschlicher Kognition. Sie spielen im Rahmen von Sprache, Handlungen und Denken eine wichtige Rolle. So machen sie Wortbedeutungen aus und liefern die kognitive Basis für kategorisch organisiertes Wissen über die physikalische und soziale Umwelt (Barsalou et al., 2003). Während die Relevanz von Konzepten im Zusammenhang mit Sprache weitestgehend akzeptiert ist, wird die funktionelle und neuronale Repräsentation von Konzepten und Wortbedeutungen im semantischen Gedächtnis kontrovers diskutiert (Kiefer und Pulvermüller, 2012).

1.7 Sprache

Sprache, wie sie von Menschen genutzt, gesprochen und geschrieben wird, unterscheidet den Menschen vom Tier. Auch wenn in der Tierwelt durchaus kommuniziert wird, ist unter Anderem die duale Funktion von Sprache, Kommunikation und Kognition nur der menschlichen Sprache vorbehalten und macht diese im Unterschied zur tierischen Kommunikation einzigartig (Johansson, 2005). Im Kontext dieser Studie wird der funktionelle Aspekt von Sprache beleuchtet.

Mittels Sprache kann der Mensch seine Gedanken, seine Gefühle und seine Handlungsabsichten zum Ausdruck zu bringen (Gabelentz, 1891, S. 2). Kognitive Mechanismen der Sprachproduktion und des Sprachverstehens stellen die Voraussetzung dar, um von Sprache Gebrauch zu machen. Im späten 19. Jahrhundert wurde angenommen, dass Sprache in zwei kortikal gelegenen Zentren, Broca und Wernicke, in der sprachdominanten Hemisphäre verarbeitet wird. Das Wernicke-Areal (Brodmann 22 und 42) ist im posterioren Bereich des Gyrus temporalis superior lokalisiert und nimmt im Prozess des Sprachverständnisses eine essenzielle Rolle ein (Hillis et al., 2001, Warren et al., 2009). Neben Verbindungen zum auditorischen und visuellen Kortex, bei Letzterem über den Gyrus angularis (Kreisler et al., 2000), ist das Wernicke-Areal mit dem motorischen Sprachzentrum, dem Broca-Areal (Brodmann 44 und 45), verknüpft. Dieses liegt im inferioren Teil des Frontallappens und wird vor allem im Rahmen expressiver Sprachfähigkeiten aktiviert (Catani und Mesulam, 2008, Hillis et al., 2006).

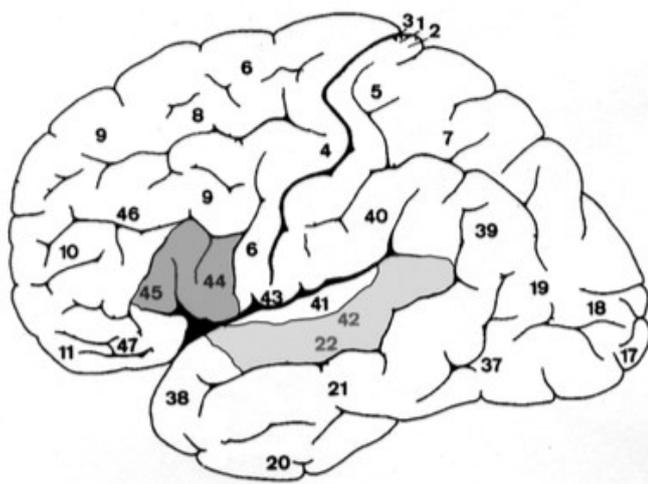


Abb. 5: Laterale Ansicht auf die linke Großhirnhemisphäre, nummeriert nach Korbinian Brodmann. Dunkelgrau: Broca-Areal (44 und 45 nach Brodmann). Hellgrau: Wernicke Areal (42 und 22 nach Brodmann). Quelle: Pulvermüller (1999), S. 258 mit freundlicher Genehmigung vom Verlag.

Befunde aus neueren Studien widerlegen dieses vereinfachte Modell und bringen Evidenz für ein komplexes neuronales Netzwerk hervor, welches verschiedene kortikale Areale im Rahmen der Sprachverarbeitung involviert. Neurobiologischen Lerntheorien zufolge wird kognitives Wissen in kortikalen Neuronenpopulationen distributiv repräsentiert und durch assoziatives Lernen neuronal vernetzt (Hebb, 1949). Im Kontext der Sprachverarbeitung werden Wortbedeutungen abhängig von ihrem semantischen Gehalt in mehreren verschiedenen Arealen repräsentiert (Pulvermüller, 1999). Dazu im Einklang steht die Theorie der *Grounded Cognition*, die eine Beteiligung des sensomotorischen Kortex bei der mentalen Repräsentation von Sprache annimmt.

Die modalitätsspezifische Rekrutierung kortikaler Areale im Rahmen von Sprachverarbeitung wird in zahlreichen Studien diskutiert und ist auch Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

1.8 Grounded Cognition

Der Zusammenhang zwischen sprachlicher und nicht-sprachlicher Kognition ist komplex und noch nicht hinreichend verstanden. Es gibt zwei grundlegend verschiedene Sichtweisen, die im Rahmen der Frage nach Kognition und Sprache berücksichtigt werden sollten.

Klassische Erklärungsansätze sprachlicher Repräsentation gehen von einem amodalen System aus, in dem konzeptuelles Wissen als Grundbaustein des Langzeitgedächtnisses unabhängig vom sensomotorischen System repräsentiert wird (Knitsch und Van Dijk, 1978, Anderson, 1983, S. 45, Levelt et al., 1999). Auch Informationen aus dem modalen System für sensorische Wahrnehmung, Bewegung und Selbstwahrnehmung sollen dieser Ansicht nach zunächst in abstrakte Symbole umgewandelt werden, bevor sie im Langzeitgedächtnis gespeichert werden (Fodor, 2001). Andere Arbeiten, die von amodaler semantischer Repräsentation von Sprache ausgehen, argumentieren mit einer Assoziation aber keiner Abhängigkeit von dem sensomotorischen Kortex, da sensomotorische Informationen die Quelle für amodales konzeptionelles Wissen darstellt (Mahon und Caramazza, 2009).

Dieser Annahme entgegen steht die Theorie der *Grounded Cognition*, in der die zentrale Bedeutung sensomotorischer Erfahrungen im Prozess von Denken und Sprache betont wird (Barsalou, 2008). Die Theorie der *Grounded Cognition* versteht die semantische Bedeutung von Wörtern als multimodale Repräsentation von Wahrnehmungs-,

motorischen und introspektiven Zuständen, die mit dem Wort erlebt und assoziiert werden (Jirak et al., 2010). Wird dieses Begriffswissen aufgerufen, werden diese multimodalen Assoziationen simuliert. Entgegen der konstitutionellen Sprachtheorie, die von einer amodalen Repräsentation abstrakter Konzepte ausgeht, werden laut der Theorie der *Grounded Cognition* Kognition und konzeptionelles Wissen, so auch Sprache, in einem distributiven neuronalen Netzwerk repräsentiert (Pulvermüller, 2005, Pulvermüller et al., 2001). Hinweise für mehr als nur einen Zusammenhang, sondern eine kausale Rolle des sensomotorischen Kortex bei der Verarbeitung von konzeptionellem Wissen liefern neuropsychologische Studien mit Patienten, die an fokalen Läsionen in modalitätsspezifischen Hirnarealen leiden (Fernandino et al., 2013, Jirak et al., 2010).

Während in manchen Arbeiten der Fokus auf verschiedenen körperlichen Zuständen liegt, die Effekte von Kognition sein können oder diese beeinflussen können (z.B. Barsalou et al., 2003, Lakoff and Johnson, 1980), gründen andere Autoren den Einfluss des sensomotorischen Kortex auf mentalen Modellen (Barsalou, 1999, Decety und Grèzes, 2006). Unter mentalen Modellen versteht man die mentale Repräsentation von realen, hypothetischen oder imaginären Situationen. Ein zentraler Mechanismus mentaler Repräsentation von Sprache sind Simulationen (Zwaan, 2004). Da die Repräsentation von Sprache und von anderen kognitiven Funktionen auf verschiedene Sinnesmodalitäten (visuelle, akustische, olfaktorische, taktile) verteilt ist, werden beim Verstehen von Wörtern Situationen (Yeh und Barsalou, 2006, Zwaan, 2001), wahrgenommene Reize (Zwaan und Madden, 2005), Motorik (z.B. Pulvermüller, 2005) und affektive Zustände (Havas et al., 2007) simuliert, indem motorische und wahrgenommene Reize durch Rekrutierung der entsprechenden Neuronengruppen rekonstruiert werden (Glenberg und Kaschak, 2003, Glenberg und Robertson, 2000, Zwaan, 2004). Beispielsweise werden bei dem Gedanken an einen Stuhl assoziierte Zustände simuliert, die beim Hinsetzen auf einen Stuhl gespeichert wurden. Dazu gehören zum Beispiel das Aussehen, die Beschaffenheit, der Vorgang des Hinsetzens und die wahrgenommene Relaxation (Barsalou, 2008). Dabei ist die Stimulierung einer einzelnen Modalität ausreichend, um auch die Neuronengruppen anderer an der Repräsentation beteiligten Modalitäten zu aktivieren (Kaup und Ulrich, 2017).

Der im Rahmen von *Grounded Cognition* oft verwendete Begriff *Embodied Cognition* oder *Embodiment* betont dabei die multimodale Verkörperlichung von Denkprozessen. Der Körper spielt gemäß der Theorie der *Grounded Cognition* eine zentrale Rolle, steht

jedoch nicht alleinig in einer Wechselbeziehung mit Kognition. Auch wenn der Begriff “*Embodiment*“ noch in vielen Arbeiten auftaucht, führt er zu einer eher irreführenden Darstellung des Konzeptes der *Grounded Cognition* (Barsalou, 2008, Kiefer und Barsalou, 2013). In der Übersichtsarbeit von Meteyard et al. (2012) werden starke und schwache *Embodiment* Theorien unterschieden. Beim starkem *Embodiment* geht man von vollständiger Simulation aus, bei der primär sensorische und motorische kortikale Areale aktiviert werden. Theorien, die von schwächerem *Embodiment* ausgehen, behaupten eine Beteiligung durch Aktivierung von Arealen anterior oder benachbart zu den primär sensorischen und motorischen Arealen vorzufinden.

Da die Theorie der *Grounded Cognition* von einem einheitlichen Repräsentationssystem ausgeht, das allen kognitiven Funktionen zugrunde liegt, beleuchtet sie neben der Repräsentation von Sprache auch die Theorie des situativen Handelns, der kognitiven und sozialen Simulation. Im folgenden Abschnitt wird lediglich auf die für diese Arbeit relevanten Aspekte der Sprachverarbeitung eingegangen.

1.8.1 Prozessierung von Wortbedeutung

Die Art mentaler Repräsentationen von konzeptionellem Wissen und Sprache gelangt immer mehr in den Vordergrund wissenschaftlicher Arbeiten. Hinweise auf eine domänenspezifische Aktivierung bei der semantischen Wortverarbeitung ergaben sich bereits in neuropsychologischen Studien (Warrington und Shallice 1984, Warrington und McCarthy, 1987), bildgebenden neurowissenschaftlichen Studien (z.B. Hauk et al., 2004, Martin und Chao, 2001), MEG-Studien (z.B. Shtyrov et al., 2014, Nicolai et al., 2014, Klepp et al., 2014), EEG-Studien (z.B. Kiefer, 2001, Kiefer, 2005, Kiefer et al., 2007, Kiefer et al., 2008), sowie in Verhaltensstudien (z.B. Boulenger et al., 2006, Helbig et al., 2006, Mirabella et al., 2012).

Die Beteiligung des motorischen Systems beim Lesen von bewegungs-assozierten Wörtern wurde vielfach demonstriert (z.B. Hauk et al., 2004, Klepp et al., 2014, Aziz-Zadeh et al., 2006). So konnten beispielsweise Hauk et al. (2004) in einer fMRT Studie eine differenzierte somatotopische Aktivierung motorischer Areale beim Lesen von Bewegungsverben mit Gesichts-, Arm-, oder Beinbeteiligung feststellen. Auch Objekte, die mit Motorik assoziiert werden (z.B. Hammer) riefen beim Lesen eine begleitende Aktivierung im Bereich des posterioren mittleren temporalen Gyrus (pMTG) hervor (Chao et al., 1999, Hoenig et al., 2008), welcher handlungsbezogene Bewegungen kodiert

(Martin und Chao, 2001). Im Vergleich zu nicht-bewegungsbezogenen Wörtern, konnte auch in Aufzeichnungen ereigniskorrelierter Potentiale (engl. event-related potentials, ERP) eine stärkere Aktivierung in frontozentralen Elektroden bei Wörtern beobachtet werden, für die konzeptuelles motorisches Wissen relevant ist (Kiefer, 2001, Kiefer, 2005, Pulvermüller, 1999). Klepp et al. (2014) untersuchten in einer MEG-Studie die Beteiligung spezifischer motorischer Quellen beim Lesen von Handverben, Fußverben und Verben, die mit keinem Körperteil assoziiert sind. Ähnlich wie in der vorliegenden Studie wurden die motorischen Quellen zunächst durch tatsächliche Hand- und Fußbewegungen lokalisiert. Die Quellen dienten dann als Parameter für motorische Aktivierung im Sprachparadigma. Es konnte eine Aktivierung der motorischen Quellen in allen Verbkonditionen beobachtet werden, obwohl eine semantische Verarbeitung durch eine zu bearbeitende Aufgabe nicht sichergestellt wurde. Insbesondere konnte ein Hinweis auf eine spezifische somatotopie Rekrutierung von Neuronengruppen bei der Verarbeitung von hand- und fußbezogenen Verben festgestellt werden: handassoziierte Bewegungsverben haben im Vergleich zu Fußverben eine signifikant stärkere Aktivierung in den Handquellen hervorgerufen. Es wurde keine Lateralisierung bezüglich der Aktivierung beobachtet, jedoch aber eine Seitendifferenz in der Latenz der Antworten. Motorische Dipolquellen der rechten Hand - lokalisiert in der linken Hemisphäre - zeigten signifikant kürzere Antwortlatenzen im Vergleich zu motorischen Dipolquellen der linken Hand. Auch Studien, die sich der Methode der Transkraniellen Magnetstimulation bedienen, ließen Rückschlüsse auf eine begleitende motorische Aktivierung bei der Verarbeitung von Bewegungsverben zu (Buccino et al., 2005). In der Arbeit von Pulvermüller et al. (2005b) bewirkte die magnetische Stimulierung linkshemisphärischer Hand-Motorareale kürzere Reaktionszeiten beim Lesen von handbezogenen Verben. Die Ergebnisse zu Fußverben zeigten ein analoges Muster.

Bezüglich des visuellen Systems konnte beispielsweise bei der Verarbeitung von Nomen mit visuell konzeptuellen Inhalten eine begleitende visuelle Aktivierung in okzipitalen Hirnregionen beobachtet werden (Chao und Martin, 1999). Beim Generieren von Farbbegriffen wurde hingegen der ventrale temporale Kortex, in dem Farbwahrnehmung stattfindet, aktiviert (Kellenbach et al., 2001). Auch olfaktorische (González et al., 2006) und gustatorische Areale (Barros-Loscertales et al., 2012, Goldberg et al., 2006, Simmons et al., 2005) sind im Prozess des Sprachverständnisses involviert und untermauern die domänenspezifische Repräsentation von Wissen in verschiedenen Modalitäten.

In der vorliegenden Arbeit wird die Beteiligung des auditorischen Systems bei der Verarbeitung von akustisch assoziierten Wortstimuli thematisiert. In diversen Arbeiten, die unterschiedliche Methoden, wie ereignis-korrelierte Potentiale (Popp et al., 2016, Trumpp et al., 2013bb, Trumpp et al., 2014), oder bildgebende Verfahren nutzten (Goldberg et al., 2006, James und Gauthier, 2003, Kellenbach et al., 2001, Kiefer et al., 2012, Popp et al., 2019) konnte bereits ein Zusammenhang belegt werden. So konnte beispielsweise in einer kombinierten fMRT/ERP-Studie von Kiefer et al. (2008) eine Aktivierung im linken auditorischen Assoziationskortex, sowie bilateral stärkere negative ERPs beim Lesen von akustisch assoziierten Nomen, wie z.B. das Telefon, im Vergleich zu Objekten ohne akustische Assoziation, wie z.B. der Tisch, gemessen werden. Die aktuelle Studienlage zeigt jedoch keine einheitliche Lateralisierung der gemessenen Aktivierung auf. So wurde in den Arbeiten von James und Gauthier (2003) und Kiefer und Pulvermüller (2012) bei der Untersuchung von Wörtern mit akustischen und motorischen Merkmalen eine Aktivierung in rechtshemisphärischen Hirnarealen beobachtet.

1.9 Lateralisierung

Bei den meisten links- und rechtshändigen Menschen ist die linke Hemisphäre die dominante Hemisphäre für sprachliche Funktionen (Knecht et al., 2000, Rasmussen und Milner, 1977, Binder et al., 1997). Die kortikale Lateralisation erwies sich unter anderem in Läsions- (Woods, 1983) und Aphasie-Studien (Damasio, 1992). Bei Rechtshändern konnten Defizite in der Sprachproduktion und -verarbeitung nach linksseitigen Läsionen beobachtet werden, während rechtsseitige Läsionen eher geringere sprachliche Defizite hervorriefen (Geschwind, 1971). Die strenge Seitendifferenz sprachlicher Funktionen wird allerdings durch Erkenntnisse in Split-Brain-Studien, die eine bilaterale Verarbeitung von Sprache anzeigen, herausgefordert. (Zaidel, 1998). Als neuroanatomisches Korrelat der beobachteten Lateralisierung sprachlicher Funktionen ließ sich ein Unterschied in der Größe der perisylvischen Areale (Galaburda et al., 1978, Geschwind and Levitsky, 1968, Steinmetz et al., 1990) und der Pyramidenzellen in sprachlichen Kerngebieten beobachten (Hayes und Lewis, 1993).

Im Rahmen der Sprachverarbeitung konnten unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Lateralisierung beobachtet werden. Im Einklang mit dem Hebb'schen Prinzip über die Existenz neuronaler Netzwerke (siehe Pulvermüller, 1999) hängen unterschiedliche

kortikale Lokalisationen im Rahmen der Repräsentation und Verarbeitung von Wörtern mit dem semantischen Gehalt der Wörter zusammen. Demzufolge sind Neuronengruppen, die auf Wortbedeutungen reagieren, ebenso wie sensorische und motorische Neuronengruppen, bihemisphärisch verteilt und, somit im Vergleich zu abstrakten Funktionswörtern, wie Pronomen oder Artikel, weniger lateralisiert. Damit übereinstimmend zeigten mehrere Studien variierende Ergebnisse bezüglich der Lateralisierung abhängig von der semantischen Kategorie des präsentierten Wortes (Belin et al., 2000, Hoenig et al., 2011, James und Gauthier, 2003, Lewis et al., 2005, Pineda et al., 2013, Specht und Reul, 2003), die in der Diskussion näher beleuchtet werden.

1.10 Hypothesen

Sensorische Simulationen bei der Verarbeitung von Sprache sind im Vergleich zu motorischen wenig untersucht. Im Einklang mit der Theorie der *Grounded Cognition* beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Beteiligung des auditorischen Systems bei der Verarbeitung von Verben mit akustischem Gehalt. Ziel der Arbeit ist zu untersuchen, ob und inwiefern Verben, die unterschiedliche Lautstärken bei der Ausführung der jeweiligen Tätigkeit implizieren, die auditorische Responsivität auf einen darauffolgenden Tonstimulus modulieren und, ob diese Verben selbst eine korrespondierende unterschiedliche Aktivierung in den auditorischen kortikalen Arealen hervorrufen. Ein Beispiel für ein Verb, das hohe Lautstärke impliziert, wäre „schreien“. Ein Verb, welches geringe Lautstärke impliziert, wäre beispielsweise „flüstern“.

Im Tonparadigma wurde die Aktivierung der auditorischen N100m-Quellen in Abhängigkeit der Tonlautstärke untersucht (Lautstärkeeffekt, Elberling et al., 1981, Vasama et al., 1995). Die N100m-Komponente des ereigniskorrelierten Feldes wurde im Rahmen der Stromdipol-Quellen-Analyse modelliert und diente der Lokalisation und Quantifizierung der auditorischen Aktivierung. Übereinstimmend mit der Literatur wurde erwartet, dass laute Töne im Vergleich zu leisen Tönen eine stärkere N100m Aktivierung hervorrufen (Hypothese 1).

Im Sprachparadigma wurden implizit laute („laute“) und implizit leise („leise“) Verben visuell präsentiert. Daraufhin folgte ein Standardton, sowie eine semantische Entscheidungsaufgabe. Hier wurde die auditorische Aktivierung als Antwort auf den Standardton untersucht. Da die repetitive Darbietung eines gleichen Tonstimulus in einer reduzierten Aktivierung des auditorischen Kortex nach wiederholter Präsentation

(Repetitionseffekt, Näätänen und Picton, 1987) resultiert, wurde vor dem Hintergrund des Lautstärke- und Repetitionseffekts hypothetisiert, dass Töne, die auf „laute“ im Vergleich zu „leisen“ Verben folgen in einer reduzierten Aktivierung des auditorischen Kortex resultieren (Hypothese 2).

Im Sprachparadigma wurde außerdem die auditorische Beteiligung in der Verarbeitung der visuell präsentierten „lauten“ und „leisen“ Wörter geprüft. Hierzu wurde untersucht, inwiefern diese Verben selbst eine korrespondierende unterschiedliche Aktivierung des auditorischen Kortex hervorrufen. Es wurde analog zum Lautstärkeeffekt (siehe Hypothese 1) angenommen, dass „laute“ im Vergleich zu „leisen“ Verben, analog zu lauten und leisen Tönen, eine stärkere auditorische Aktivierung hervorrufen (Hypothese 3).

2 Material und Methoden

2.1 Allgemeine Informationen zur Durchführung der MEG-Studie

Die Messungen wurden am Institut für klinische Neurowissenschaften und medizinische Psychologie von der Arbeitsgruppe Biermann-Ruben im Zeitraum zwischen 2016 und 2017 durchgeführt. Als Methode wurde die Magnetenzephalographie (MEG) verwendet. Die Daten wurden im Labor für Magnetenzephalographie des Universitätsklinikum Düsseldorf mit dem 306-Kanal Ganzkopf MEG System (®Elekta Neuromagsystem, Elekta, Helsinki, Finnland) erhoben. Vor der MEG-Messung wurde eine schriftliche Einverständniserklärung von den Versuchspersonen eingeholt. Die Durchführung der Messungen erfolgte gemäß der Deklaration von Helsinki und nach Einholung eines positiven Ethikvotums bei der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (Studennummer 4814R).

2.2 Probanden

Die Messungen für meine Studie wurden mit 20 Versuchspersonen, davon 12 weiblich, im Alter von durchschnittlich 24 Jahren ($SD = 4,2$) und Deutsch als Muttersprache durchgeführt. Die Größe der Stichprobe wurde zuvor mittels G -Power berechnet (faul ©1992-2014). Alle Probanden hatten eine normale oder korrigierte Sehstärke und gaben keine neurologischen oder psychiatrischen Störungen an. In Anbetracht des

Zusammenhangs der Handpräferenz mit der funktionellen Organisation der beiden Hemisphären, wie zum Beispiel die Lateralisation von Sprachfunktionen und motorischen Funktionen, wurde ein Lateralitätsquotient dem Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) folgend für jeden Probanden bestimmt, um die Händigkeit der Probanden zu überprüfen. Bei allen Probanden war die rechte Hand dominant (Lateralisationsquotient 84,8; SD = 3,2).

2.3 Stimulusmaterial und Versuchsaufbau

Vor der MEG-Messung wurden die Probanden außerhalb der MEG-Messkammer vorbereitet: Für jeden Probanden wurde ein vertikales und horizontales Elektrookulogramm (EOG) abgeleitet, um Augenbewegungen, sowie Blinzeln, in den Messdaten zu identifizieren und bei der Auswertung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde den Versuchspersonen Elektroden mittig über und unter dem rechten Auge platziert; für die horizontale EOG-Aufzeichnung klebten die Elektroden neben den lateralen Kanthi des rechten und linken Auges. Zur Bestimmung der exakten Position des Kopfes im MEG-Helm wurden den Probanden je vier elektrisch aktivierbare *Head-Position-Indicators* (HPI-Spulen) angebracht: eine Spule wurde hinter dem rechten und eine hinter dem linken Ohrfläppchen am Mastoid befestigt, sowie zwei weitere jeweils rechts und links an der Stirn unter dem Haaransatz. Vor der MEG-Messung wurde die Digitalisierung dieser Spulen sowie die Digitalisierung einiger weiterer Punkte an der Kopfoberfläche der Probanden mit Hilfe eines Digitalisierungsinstrumentes (Polhemus Isotrak) vorgenommen. Unmittelbar vor dem Tonparadigma und vor dem Sprachparadigma wiederum wurde vom MEG-Messsystem ein geringer, nicht spürbarer Strom durch die HPI-Spulen geschickt, sodass die MEG-Sensoren dieses Signal detektieren konnten. Um die MEG-Messdaten der individuellen Anatomie der Probanden überlagern zu können, wurden zusätzlich vor der MEG-Messung anatomische Referenzpunkte am Nasion, sowie an den rechten und linken präaurikulären Punkten gemessen und digitalisiert. Diese können in der MRT-Aufnahme gut identifiziert werden. Durch eine offline vorgenommene Überlagerung der individuellen anatomischen MRT-Daten mit den funktionellen MEG-Daten über die HPI-Spulen und die weiteren anatomischen vor der Messung digitalisierten Punkte am Kopf wurde die Lokalisation von Aktivierungen im individuellen Gehirn ermöglicht. Vor Betreten des Raumes wurden die Versuchspersonen gebeten jegliche magnetischen Objekte abzulegen um

Artefaktsignale zu minimieren. Während der Messung wurden die Versuchspersonen instruiert sich möglichst nicht zu bewegen und möglichst nur in dafür vorgesehenen Pausen zu blinzeln.

Die Studie umfasst zwei hintereinander durchgeführte MEG-Messungen: Das Sprachparadigma und das darauffolgende Tonparadigma. Die Versuchspersonen führten im Sprachparadigma eine Aufgabe aus, bei der „laute“ und „leise“ Verben visuell präsentiert wurden. Zur Lokalisation der zu untersuchenden Kortexareale, die für die Verarbeitung von auditorischen Stimuli von Interesse sind, wurde den Versuchspersonen laute und leise Töne präsentiert (Ton-Paradigma als Localizer). Die beiden Paradigmen werden im Folgenden genauer beschrieben.

2.3.1 Tonparadigma

Im Tonparadigma wurde den Versuchspersonen binaural über Plastikschläuche mit Ohrstöpseln 150 ms andauernde Sinustöne präsentiert. Jeder Proband hörte 50 leise und 50 laute 440 Hz Standardtöne, sowie zusätzlich 10 Töne mittlerer Lautstärke mit Frequenzen von 220 Hz und 880 Hz. Das Verhältnis der Lautstärken betrug 1:2:4; der lauteste Ton maß 85 dB. Die Abfolge der Töne war randomisiert. Die Probanden wurden instruiert, die Lautstärke zu ignorieren. Um ihre Aufmerksamkeit zu gewährleisten, wurden sie aufgefordert, nach der Darbietung eines 220-Hz oder 880-Hz Tons den rechten Zeigefinger zu heben. Laute und leise Töne, bei denen irrtümlich der Finger gehoben wurde, wurden nicht in die Analyse miteinbezogen. Das Heben des Fingers wurde von einer Lichtschranke registriert.

Zu Beginn der Messung erschien ein weißer Fixationspunkt in der Mitte des Bildschirms, der über die gesamte Messung hinweg sichtbar blieb (siehe Abbildung 6). Der erste Tonstimulus wurde 1 Sekunde nach Beginn der Messung präsentiert. Das Zeitintervall zwischen den Tonstimuli variierte in 100-ms-Schritten zwischen 2 und 3 Sekunden. Nach einem Ton mit einer vom Standardton abweichenden Frequenz, wurde nach 2 Sekunden der nächste Stimulus dargeboten. Die Messung eines Probanden dauerte 5 Minuten, und folgte in jedem Fall dem Sprachparadigma. Vor Beginn der Messung wurde zwecks Übung ein verkürzter Testdurchlauf unternommen.

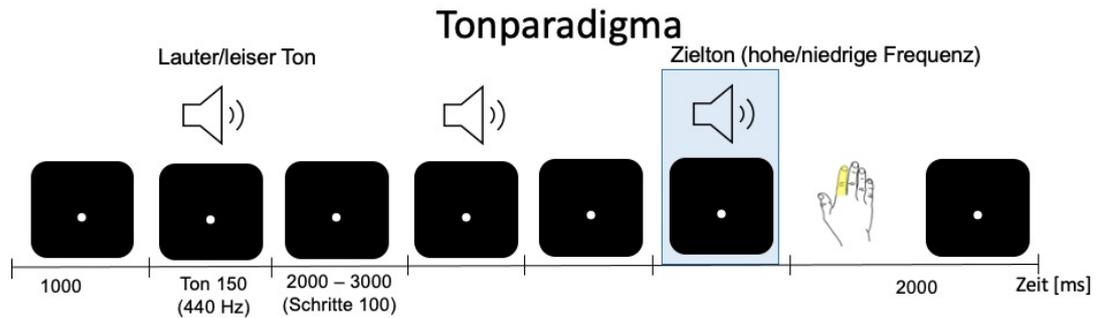


Abb. 6: Beschreibung des Versuchsablaufs im Tonparadigma. Die Versuchspersonen hörten 440Hz-Töne unterschiedlicher Lautstärke. Bei Tönen mit abweichender Frequenz (blau hervorgehobener Kasten) sollten sie den Zeigefinger heben.

2.3.2 Sprachparadigma

Die Wortstimuli aus dem Sprachparadigma umfassten deutsche konjugierte Verben, die menschliche Tätigkeiten beschreiben und dabei laute oder leise Geräusche produzieren. Die Auswahl der Stimuli erfolgte anhand einer den Messungen vorausgegangenen Bewertungsstudie auf der Online Plattform SoSci Survey mit 30 Probanden. Die Probanden wurden gebeten, insgesamt 268 Verben bezüglich der Lautstärke, und des Bewegungsausmaßes der tätigen Person bzw. eines involvierten Objekts zu bewerten. Die Bewertung wurde anhand der Likert Skala (0 = niedrig, 5 = hoch) vorgenommen. Probanden, die an der Bewertungsstudie teilnahmen, waren als Versuchspersonen von den MEG-Messungen ausgeschlossen. In der Umfrage wurden zuerst Verben gefiltert, die aufgrund von Mehrdeutigkeit, Synonymie, bildlicher Bedeutung und ähnlichen Kriterien weniger geeignet waren. Danach verblieben 52 „laute“ und 63 „leise“ Verben, die in der Bewertungsstudie eine wortspezifische interindividuelle Varianz von $\leq 0,9$ zeigten. Diese wurden anschließend bezüglich der Wortlänge, Wortfrequenz, Bi-Trigram Frequenz, sowie des Körperteils mit der die Tätigkeit ausgeübt wird, für „laut“ und „leise“ parallelisiert (Match program, Van Casteren und Davis, 2007). Es resultierten 40 Verben, die eine hohe Lautstärke (Mittelwert = 4,10; z. B. „schreien“) und 40 Verben, die eine geringe Lautstärke (Mittelwert = 1,84, z. B. „flüstern“) im Rating erhielten. Die vollständige Liste der präsentierten Wortstimuli ist dem Anhang A beigelegt.

Die Verben wurden den Probanden in der Messung zwei Mal in erster und zwei Mal in dritter Person Singular Präsens konjugiert randomisiert visuell dargeboten, z.B. „ich schreie“. Der Ablauf eines Durchgangs ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Messung

startete mit einem grauen Fixationspunkt, der nach einer Sekunde weiß wurde. Wiederum nach einer Sekunde wurde der Fixationspunkt durch ein „lautes“ oder „leises“ Verb in der ersten oder dritten Person Singular mit dem zugehörigen darüberstehenden Personalpronomen ersetzt. Das Verb wurde für eine Dauer von 600 ms präsentiert. Anschließend erschien für ein Zeitintervall von 600-1000 ms, variierend in 100-ms-Schritten, ein Fixationspunkt. Darauf folgte ein 150-ms andauernder 440 Hz-Ton. Bei einem Probanden lag ein technischer Fehler vor, d.h. 19 von 20 Probanden hörten diesen Ton. Um eine semantische Verarbeitung der Wörter zu gewährleisten, bearbeiteten die Probanden 350 ms nach Ende des Tonstimulus pseudorandomisiert eine von zwei möglichen Aufgaben. In der einen Aufgabe wurden auf dem Computermonitor im Anschluss an den Ton jeweils auf der rechten und linken Seite die beiden möglichen Personalpronomen dargeboten, in denen das Verb zuvor gezeigt werden konnte (ich bzw. sie bei männlichen oder er bei weiblichen Versuchspersonen). Die Probanden sollten das Personalpronomen auswählen, in dem das Verb präsentiert wurde. In der anderen Aufgabe wurden Piktogramme von zwei Körpersilhouetten dargeboten, in denen jeweils ein Teil gelb markiert war: Arme, Kopf, Beine, oder der ganze Körper. Die Probanden sollten hier auswählen, mit welchem Körperteil die Tätigkeit ausgeführt wird. Entsprechend der Position der richtigen Antwort, hoben die Versuchspersonen den rechten oder linken Zeigefinger. Dies wurde mit einer Lichtschranke gemessen. Die Aufgabe wurde so lange präsentiert, bis eine Antwort gegeben wurde, maximal aber für zwei Sekunden. Durchgänge, bei denen die Probanden eine falsche Antwort gegeben haben, wurden nicht in die Analyse miteinbezogen. Nach der Antwort der Probanden am Ende eines jeden Durchgangs wurde schließlich zwei Sekunden lang ein Bildsymbol für ein Augenpaar gezeigt. Hier werden die Probanden aufgefordert zu blinzeln, bevor der nächste Durchgang startet. Die Messung wurde in bis zu vier Blöcken aufgeteilt und dauerte für einen Proband 34 Minuten. Auch hier wurde vor Beginn der Messung zu Übungszwecken ein kurzer Probelauf unternommen.

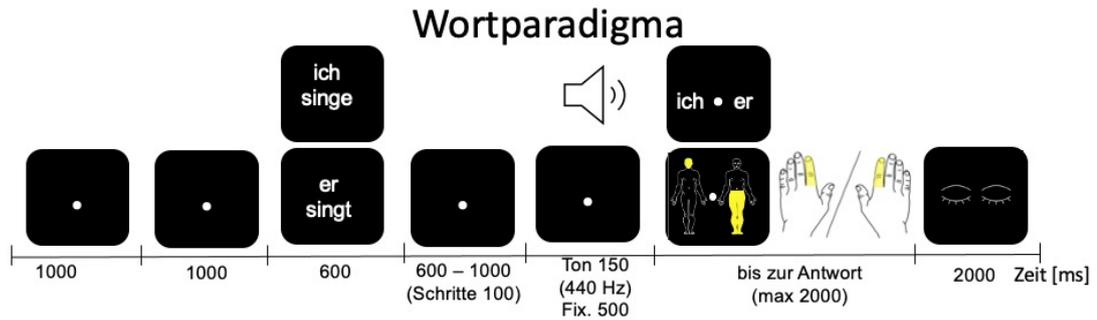


Abb. 7: Beschreibung des Versuchsablaufs im Sprachparadigma. Es wurden Verben mit impliziter hoher und niedriger Lautstärke visuell präsentiert. Die Probanden sollten nach der Präsentation entweder entscheiden, in welcher Person (1./3. Person Singular) das Verb gezeigt wurde, oder mit welchem der gelb markierten Körperteile die Tätigkeit, die das Verb beschreibt, ausgeführt wird.

2.4 MEG-Datenerhebung

In dieser Arbeit wurde das 306-Kanal Ganzkopf MEG System (®Elekta Neuromagsystem, Elekta, Helsinki, Finnland) des Universitätsklinikums Düsseldorf verwendet. Die Sensoren bestehen aus 102 Triple-Sensor-Elementen mit je einem Magnetometer und zwei orthogonalen planaren Gradiometer.

Die MEG-Daten wurden bei 1000 Hz digitalisiert und von 0,03 bis 330 Hz bandpassgefiltert. Die Messdaten wurden auf einer Computerfestplatte gespeichert. Für die Analyse wurden lediglich die 204 Gradiometer Nachweisspulen berücksichtigt.

2.5 Datenanalyse

Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Softwareprogramm-Paket von Neuromag (Elekta Neuromag, Helsinki, Finland). Im Folgenden wird die Erstellung des evozierten Feldes und die anschließende Quellenmodellierung beschrieben.

2.5.1 Mittelung

Die evozierten Potentiale als Antwort auf einen präsentierten Stimulus werden durch spontane Hirnaktivität, das sogenannte Hintergrundrauschen, überlagert. Das Hintergrundrauschen ist nicht zeitgebunden zum Stimulus und folglich unabhängig (Parkkonen, 2010). Eine Möglichkeit zur Reduktion ihres Einflusses stellt die wiederholte Präsentation der Ton- und Wortstimuli dar. Für ein adäquates Verhältnis zwischen Signal

und Hintergrundrauschen (*signal-to-noise-ratio*) sollte ein Stimulus zwischen 20 und 500 Mal wiederholt werden (Hämäläinen et al., 1993). Um evozierte Felder zu erhalten, wurde die neuromagnetische Aktivität zu den Zeitpunkten der Stimuluspräsentation offline gemittelt. Alle MEG-Daten wurden im Rahmen der Vorverarbeitung mit einem Bandpass-filter von 0,1-100 Hz gefiltert. Die Rohdaten wurden visuell auf Signalsprünge oder ausgefallene Messsensoren inspiziert, die, falls vorhanden, für die Analyse ausgeschlossen wurden. Es wurde ein Zeitfenster von 500 ms vor bis 500 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation für die Mittelung definiert, und zwar für alle Ton- und Verbpräsentationen. Die mittlere Amplitude unmittelbar vor der Reizdarbietung (von -150 ms bis 0 ms) diente als Baseline. Nachfolgende Aktivierungen werden in ihrer Amplitude relativ zur Baseline bemessen. Das Zeitfenster von 300 ms vor Stimulusbeginn bis 200 ms danach soll für die Analyse frei von Artefakten sein. Daher werden die Signale in diesem Zeitfenster auf Lidschläge und Augenbewegungen untersucht. Hierzu dient die Aufzeichnung des Elektrookulogramms (EOG). Die EOG-Datenspurten wurden zunächst rektifiziert, um positive und negative Ausschläge in gleichem Maße zu berücksichtigen. Anhand der aufgezeichneten Augenbewegungen im EOG wurde schließlich im Vorfeld der Analyse für jeden Probanden eine individuelle Schwelle für das Auftreten von Lidschlägen festgelegt. Epochen mit Signalen, die diese Schwelle in dem Analysezeitfenster von -300 ms bis 200 ms überschreiten, werden von der Mittelung ausgeschlossen. Dadurch, dass das kritische Zeitfenster kleiner gefasst wurde als das Mittelungszeitfenster, gehen nicht zu viele Daten durch aufgezeichnetes Blinzeln verloren und zugleich ist das für die Analyse relevante Zeitfenster frei von Artefakten.

Die Mittelung der MEG-Daten erfolgte für die leisen und lauten 440-Hz-Standard-Tonstimuli aus dem akustischen Paradigma, und für die Ton- und Wortstimuli aus dem Sprachparadigma, hier jeweils separat für "laute" und "leise" Verben. Im Folgenden werden Einzelheiten im Rahmen der Mittelungsprozedur in beiden Paradigmen dargelegt.

2.5.1.1 Tonparadigma

Mithilfe der Neuromag Software Graph (Elekta Neuromag, Helsinki, Finnland) wurden personenspezifisch zunächst die Triggerzeiten aus dem Tonparadigma ausgelesen und dokumentiert. Trigger, auf denen im Rahmen der Verhaltensaufgabe falsch reagiert wurde, wurden von dem Mittelungsvorgang ausgeschlossen.

Im Rahmen der reizbezogenen Mittelung mithilfe der Neuromag Software Graph (Elekta Neuromag, Helsinki, Finnland) wurden die artefaktbereinigten evozierten Antworten aus dem Tonparadigma für die Quellenmodellierung mit einem Tiefpassfilter von 40 Hz (Weite 11 Hz) gefiltert. Die Epochen aus dem Tonparadigma wurden separat, für laute und leise Tonstimuli, gemittelt, um im Anschluss an die Analyse den statistischen Vergleich der Quellenaktivierung bei akustischer Präsentation von lauten versus leisen Tönen anzustellen. Es resultierten für die Versuchspersonen 38 bis 50 artefaktfreie Epochen ($M = 46$; $SD = 3,7$) in der lauten, und 40 bis 50 ($M = 47$; $SD = 3,1$) in der leisen Tonbedingung. Maximal hätte eine Anzahl von jeweils 50 erreicht werden können. Im Rahmen der Erstellung auditorischer Stromdipole wurden die MEG-Daten aus dem Tonparadigma zusätzlich unabhängig von der Lautstärke gemittelt.

2.5.1.2 Sprachparadigma

Im Sprachparadigma wurden mittellaute 440-Hz-Standardtöne, sowie „laute“ und „leise“ Verben präsentiert. Die Triggerzeiten der Standardtöne wurden identisch zum Prozedere im Tonparadigma personenspezifisch und separat für die Bedingungen „Ton nach „lautem“ und „leisem“ Wort“ ausgelesen. Für die Versuchspersonen ergaben sich 68 bis 155 Epochen ($M = 124$; $SD = 25,0$) für Ton nach „lautem“ Wort und 77 bis 155 Epochen ($M = 124$; $SD = 23,1$) für Ton nach „leisem“ Wort. Maximal hätte eine Anzahl von jeweils 160 erreicht werden können. Im Rahmen des Mittelungsprozesses der neuromagnetischen Aktivität während der Verarbeitung von „lauten“ und „leisen“ Wortstimuli wurden die wortspezifischen Triggerzeiten in Listenform von Valentina Niccolai zur Verfügung gestellt. Jene Trigger, auf die im Rahmen der semantischen Entscheidungsaufgabe eine falsche Reaktion folgte, wurden nicht für die Mittelung herangezogen.

Die MEG-Messungen für das Sprachparadigma wurden in vier Datensätzen separat abgespeichert und dementsprechend separat gemittelt. Um bei der Zusammenführung der gemittelten Daten aus den vier Messungen die unterschiedliche Anzahl der Epochen in den Blöcken zu berücksichtigen, wurde eine gewichtete Mittelung vorgenommen. Im Ergebnis resultierten 73 bis 156 Epochen ($M = 134$ $SD = 21,3$) für Wortstimuli mit impliziter hoher Lautstärke und 81 bis 157 Epochen ($M = 135$; $SD = 19,9$) für Wortstimuli mit implizit geringer Lautstärke für die Gruppe der Versuchspersonen. Maximal hätte eine Anzahl von jeweils 160 erreicht werden können.

2.5.2 Ausrichtung des MRTs (MRT-MEG-Integration)

Die Betrachtung der Stromdipole im individuellen Gehirn erfolgte anhand von T1-gewichteten kraniellen MRT-Aufnahmen, die einige Tage bis Wochen nach der MEG-Messung von jeder Versuchsperson an der Uniklinik Düsseldorf erstellt worden sind. Um die räumliche Vergleichbarkeit der Bilddatensätze der Probanden zu erleichtern, wurde im Vorfeld der Analyse das dreidimensionale Koordinatensystem des Kopfes nach dem Talairach-Tournoux-Atlas (Talairach und Tournoux, 1988) ausgerichtet. Zur Ausrichtung der MRT-Aufnahme nach Talairach-Tournoux wurde zunächst der Interhemisphärenspalt parallel zur Medianebene (die y-z-Ebene) ausgerichtet. Schließlich wurden in der Medianebene die gut zu identifizierenden Commissurae anterior und posterior aufgesucht. Die Aufnahme wurde schließlich entlang der x-Achse so rotiert, dass die Bikommissurallinie zwischen dem oberen Rand der vorderen Kommissur und dem Unterrand der hinteren Kommissur horizontal eingestellt wird. Nach dem Import der digitalisierten Punkte (HPI-Spulen und anatomische Punkte) reicht nun die x-Achse vom rechten zum linken präaurikulären Punkt, während die y-Achse senkrecht dazu durch das Nasion geht. Die z-Achse steht im rechten Winkel zu y- und x-Achse und erstreckt sich in kranialer Richtung.

2.5.3 Erstellung der Sphäre

Die mit dem MEG detektierten Magnetfeldänderungen an der Schädelkalotte lassen keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Lokalisation der neuronalen Generatoren im Gehirn zu (Hämäläinen et al., 1993). Um die Lokalisation der Quellen auf neuronaler Ebene im Rahmen des Inversen Problems einzugrenzen, bedient man sich der Quellenmodelle innerhalb eines definierten Volumenleiters (Hari, 1991). Anhand der individuellen MRT-Aufnahmen wurde für jeden Probanden ein sphärischer Volumenleiter angepasst, in dem sich der tangential orientierte Stromdipol befindet. Die Sphäre wird definiert aus einer x-, y-, und z-Koordinate sowie einem Radius und sollte die zu untersuchenden Zielregion im Gehirn gut abbilden (Hari et al., 1986).

Im ersten Arbeitsschritt wurde der Sulcus lateralis im MRT-Bild des Probanden in der axialen Ebene aufgesucht. Dieser anatomische Spaltraum trennt den Temporallappen von den darüber befindlichen Anteilen des Frontal- und Parietallappens und enthält die Heschl'schen Querwindungen des primär auditorischen Kortex. Mit der Neuromag

Software werden in der koronaren Schnittebene mehrere Markierungen entlang des Umrisses des Gehirns gesetzt. Dieser Schritt wird für fünf weitere Schnitte in je anteriorer und posteriorer Richtung wiederholt. Die gesetzten Markierungen werden in allen drei Ebenen visuell betrachtet. Dabei wird geprüft, ob die Kontur des Temporallappens dicht genug mit Markierungen besetzt worden ist. Die Berechnung des Sphärenmodells aus den gesetzten Markierungen erfolgt durch die Software. Die Ursprungskoordinaten der individuell berechneten Sphären werden für die spätere Berechnung der Dipolmodelle mittels der Software Source Modelling herangezogen.

2.5.4 Quellenmodellierung

Als Parameter zur Quantifizierung der Aktivierung des auditorischen Kortex diente für diese Arbeit die in dem Tonparadigma generierte N100m-Komponente des evozierten Feldes nach einer Tonstimulation (Hari, 1991), die mittels der Äquivalenten Stromdipol-Quellen-Analyse (Dipol-Quellen-Analyse) ausgewertet wurde. Die Dipol-Quellen-Analyse stellt eine geeignete Methode zur Detektion neuronaler Generatoren von ereigniskorrelierten Potentialen und Feldern dar und wurde nach bewährter Prozedur durchgeführt (Hämäläinen et al., 1993, Salmelin und Helenius, 2000, Biermann-Ruben et al., 2008, Vartiainen et al., 2011). Aus der Dipol-Quellen-Analyse resultieren für jeden Probanden auf Grundlage der gemittelten MEG-Daten aus dem Tonparadigma zusammen mit der im Vorfeld definierten Sphäre zwei Dipole, ein Dipol je Hemisphäre, jeweils stellvertretend für die linkshemisphärische und rechtshemisphärische auditorische Verarbeitung (Hämäläinen et al., 1993). Diese werden im Sprachparadigma als Parameter zur Beurteilung der auditorischen Aktivierung beim Lesen von Verben sowie bei der Verarbeitung des dem Verb mit Verzögerung folgenden Tons herangezogen. Das genaue Prozedere wird im Folgenden genauer erläutert.

Das evozierte Feld der MEG-Daten aus dem Tonparadigma zeigte für beide Hemisphären um 100 ms nach Beginn der Tonstimulation je eine bipolare Feldverteilung, die mit einem äquivalenten Stromdipol je Hemisphäre modelliert werden kann. Für die Modellierung wurde das Programm Source Modelling (Elekta Neuromag, Helsinki, Finnland) genutzt. Im Rahmen der Dipolberechnung wurde jeweils für die linke und rechte Hemisphäre eine Selektion von MEG-Sensoren bzw. -Kanälen getroffen, die den primären und sekundären auditorischen Kortex erfassen (siehe auch 3.1.2). Diese Selektion umfasste 12 Kanalpaare je Hemisphäre und war für alle Probanden identisch. Die Identifizierung der auditorisch

evozierten N100-Komponente in den Kanälen diente als Anhaltspunkt für die Kanalauswahl. Die bipolaren Feldverteilungen dieser ausgewählten Sensorpaare dienen als Grundlage zur Berechnung eines Dipols, jeweils für die linke und rechte Hemisphäre, der mit der geringsten Abweichung das von den Sensoren erfasste Signal generiert haben könnte. In einer Zeitspanne von ± 20 Millisekunden um das individuelle, hemisphärenspezifische Amplitudenmaximum im Rahmen der Kanalauswahl wurden zu diesem Zweck in 1-ms-Schritten sequenziell mehrere Dipole modelliert. Als Parameter zur Beurteilung der verschiedenen Dipole dienen die Goodness of fit und das Konfidenzvolumen. Die Goodness of Fit beschreibt, wie viel Prozent des gemessenen Signals durch den errechneten Dipol aufgeklärt werden kann. Dieser Parameter sollte möglichst hoch sein. Das Konfidenzvolumen beschreibt einen elliptischen Körper, in dem der Dipol mit 95% Wahrscheinlichkeit liegt. Dieser Parameter sollte möglichst klein sein. Die Auswahl eines Dipolmodells erfordert des Weiteren die Berücksichtigung der Lokalisation und Ausrichtung im Gehirn. Die Dipole wurden im MRT-Bild des jeweiligen Probanden betrachtet und bei der Selektion eines Dipols als nachgelagertes Kriterium einbezogen. Die neuronalen Generatoren der N100-Komponente sollten möglichst im supratemporalen Planum, der den primären und sekundären auditorischen Kortex umfasst, lokalisiert sein und nach dorsokaudal, parallel zum Stromfluss der kortikalen Neurone, ausgerichtet sein (Hari et al., 1980, Elberling et al., 1980). Nach Auswahl des geeignetsten Dipols wird die Lokalisation und die Richtung des Dipols konstant gehalten, während seine Stärke in Abhängigkeit von der Zeit so variiert wird, dass er die gemessenen neuronalen Signale optimal nachbilden kann. Da verschiedene neuronale Aktivierungen ein und dasselbe neuromagnetische Feld produzieren können, ist nicht eindeutig lösbar, ob der berechnete Dipol die neuronale Aktivierung der einbezogenen Sensoren tatsächlich erzeugt hat (Inverses Problem, siehe 1.4.1).

Die auditorischen Dipole, ein linkshemisphärischer und ein rechtshemisphärischer pro Person, werden nun für die Überprüfung meiner Hypothesen herangezogen. In der vorliegenden Arbeit wird hypothetisiert, dass laute Töne im Vergleich zu leisen Tönen eine stärkere auditorische Aktivierung hervorrufen (Hypothese 1). Töne, die auf „laute“ im Vergleich zu „leisen“ Verben folgen sollten in einer reduzierten Aktivierung des auditorischen Kortex resultieren (Hypothese 2). „Laute“ Verben selbst sollten den auditorischen Kortex im Vergleich zu „leisen“ Verben stärker aktivieren (Hypothese 3). Zu diesem Zweck werden ebenfalls in der Software Source Modelling (Elekta Neuromag,

Helsinki, Finnland) die berechneten auditorischen Dipole zusammen mit den jeweiligen evozierten Feldern aus dem Ton- und Sprachparadigma eingeladen. Hieraus ergeben sich Aktivierungsverläufe für die Dipole, die über die Zeit variieren und für die statistische Analyse abgespeichert werden. Die Software versucht, die durch die Dipole modellierbare Aktivität der gemessenen Aktivität möglichst nahe zu bringen, reguliert die Dipole bzgl. ihrer Stärke [nAM] herauf, wenn sie gemessene Aktivität aufklären können, und reguliert sie herunter, wenn dies nicht der Fall ist. Für das Tonparadigma ergeben sich für jeden Probanden insgesamt vier Quellenverläufe: je Hemisphäre ein Quellenverlauf für die Aktivierung nach lauten und für die Aktivierung nach leisen Tönen. Für das Sprachparadigma resultieren für jede Versuchsperson insgesamt acht Quellenverläufe: je Hemisphäre ein Quellenverlauf für die auditorische Aktivierung zu Tönen, die auf „laute“, sowie auf „leise“ Verben folgen und je Hemisphäre ein Quellenverlauf für die Aktivierung beim Lesen „lauter“ und beim Lesen „leiser“ Verben.

2.5.5 Amplitudenmaxima und *Area under the curve*

Für die jeweiligen Bedingungen und Hypothesen (1) laute und leise Tonstimuli, (2) Tonstimuli nach visuell präsentierten „lauten“ und „leisen“ Verben und (3) visuell präsentierte „laute“ und „leise“ Wortstimuli wurden die Quellenverläufe der Probanden einander überlagert dargestellt und zusätzlich gemittelt, um auf dieser Grundlage ein Zeitfenster für die Vermessung der individuellen maximalen Dipolstärke der einzelnen Quellenverläufe zu definieren. Für die Vermessung des Maximums der N100m nach einem akustischen Reiz ist das Auftreten des Maximums bekannt und liegt um 100 ms (Näätänen und Picton, 1987). Die Überlagerung und Mittelung dienten hier als zusätzliche Bestätigung. Die Aktivierung der N100-Quelle bei einer visuellen Darbietung (hier: der Wörter) ist hingegen bislang nicht beschrieben. Dies ist eine Hypothese, die im Rahmen meiner Arbeit untersucht wird. Daher war a priori nicht bekannt, ob überhaupt und falls ja in welchem Zeitfenster mit einer Aktivierung zu rechnen sein könnte. Hier dienten die Überlagerung und Mittelung allein der Definition eines Zeitfensters für das Auslesen einer maximalen Aktivierung. Die Vermessung der Maxima der Quellenverläufe aus den Bedingungen (1) der lauten versus leisen Tonstimuli, sowie der (2) Tonstimuli nach „lauten“ versus „leisen“ Wörtern erfolgt für beide Hemisphären in einem Zeitfenster von 100 ms bis 155 ms. Die Maxima mussten in dem definierten Zeitfenster liegen, ein lokales Maximum darstellen und größer als eine Standardabweichung der Messdaten im Zeitfenster der Baseline sein, um in der Analyse

berücksichtigt zu werden. Bei der Überlagerung der Quellenverläufe aus der Bedingung (3) „laute“ und „leise“ Wörter über alle Versuchspersonen, Hemisphären und Lautstärkebedingungen hinweg konnte kein gemeinsames Maximum mit einer ähnlichen Latenz festgestellt werden. Allerdings konnte an zwei unterschiedlichen Stellen ein Maximum beobachtet werden, einmal in einem Zeitfenster von 100 – 155 ms, und ein zweites Maximum im Zeitfenster von 155 bis 215 ms. Die Anwendung der zwei Zeitfenster auf die individuellen hemisphärenspezifischen Quellenverläufe für „laute“ und für „leise“ Wörter, stellte sich als schwierig dar, da die einzelnen Quellenverläufe aus der Wortbedingung sowohl für „leise“ als auch für „laute“ Verben, sowie jeweils für die linke und rechte Hemisphäre keine einheitliche Anzahl an Maxima in einem einzelnen Zeitfenster zeigten. Während einige Quellenverläufe zwei aufeinanderfolgende Maxima demonstrierten, zeigten andere Quellenverläufe, teilweise auch vom selben Probanden, einen einzelnen Peak entweder bei circa 100 - 155 ms oder bei 155 - 215 ms. Um die gesamte Aktivierung in die Analyse mit einzubeziehen und dem Umstand der intra- und interindividuellen Variabilität bzgl. des Auftretens von lokalen Amplitudenmaxima Rechnung zu tragen, wurde anstelle von lokalen Dipolmaxima die gesamte Aktivierung der Quelle in Form einer Flächenberechnung unter der Kurve über beide Zeitfenster insgesamt genutzt (siehe Abbildung 8). Die Fläche umfasst die (rektifizierte) Aktivierung im Zeitfenster von 100 ms bis 215 ms. Für die Berechnung wurden die z-standardisierten Aktivierungsverläufe in diesem Zeitfenster in Flächeneinheiten berechnet. Hierzu wurden die Werte aller in diesem Zeitfenster liegenden y-Werte (Dipolstärke) rektifiziert, gemittelt und mit der Strecke auf der x-Achse (Zeit), d.h. mit 116 [ms], multipliziert.

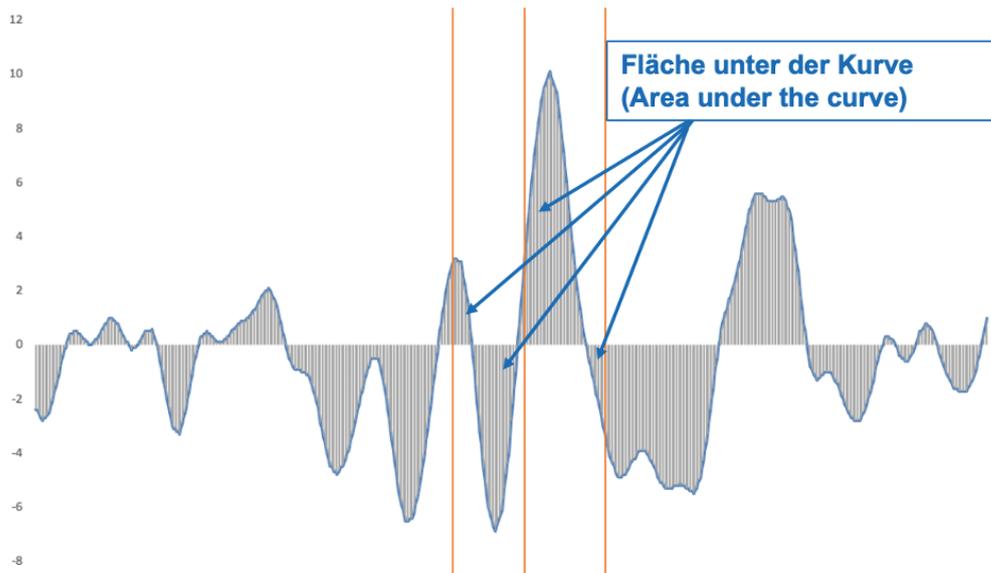


Abb. 8: Area under the curve. Für die statistische Analyse wurden die Dipolaktivierung als Fläche unter der Kurve (*Area under the curve*) quantifiziert und in den Wortbedingungen laut versus leise verglichen. Die Bemessung der Fläche umfasst alle Flächenanteile unter der Kurve (grau schraffierte Anteile, die mit blauen Pfeilen gekennzeichnet sind) in den Zeitfenstern 1 und 2 (mit orangefarbenen Linien markiert).

2.6 Statistische Analyse

Die Quantifizierungen mittels Dipolstärke wurden mit dem Statistischen Analyse Programm SPSS (IBM Corp. Released 2019. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0. Armonk, NY: IBM Corp) mit Blick auf die drei Hypothesen statistisch überprüft. Folgende intraindividuelle Vergleiche wurden vorgenommen: (1) Tonstimulus laut versus leise aus dem Tonparadigma (Amplitudenmaxima), (2) Tonstimulus nach lautem versus leisem Verb aus dem Sprachparadigma (Amplitudenmaxima), und (3) "lautes" versus "leises" Wort aus dem Sprachparadigma (*Area under the curve*). Ich erwarte eine signifikant stärkere auditorische Aktivierung durch laute versus leise Töne (1). Töne, die auf „laute“ im Vergleich zu „leisen“ Verben folgen, sollten erwartungsgemäß eine signifikant reduzierte auditorische Aktivierung hervorrufen (2). „Laute“ Verben selbst sollten im Vergleich zu „leisen“ Verben in eine stärkere Aktivierung im auditorischen Kortex resultieren (3). Für die statistische Analyse wurden alle Daten eines Probanden mittels z-Standardisierung (Milligan und Cooper, 1988) normalisiert, um individuelle Schwankungen bezüglich der Amplitudengrößen zu berücksichtigen und auszugleichen. Die Daten wurden zunächst mithilfe des Kolmogorow-Smirnov-Tests auf Normalverteilung geprüft. Die Normalverteilung traf nicht bei allen Daten zu, sodass die

Analyse mit nicht-parametrischen Verfahren vorgenommen wurde. Mit dem Wilcoxon-Test, einem nicht-parametrischen Test für abhängige Stichproben, wurden für jede Bedingung je zwei Paarvergleiche, nämlich separat für die linke und rechte Hemisphäre, angestellt. Die separate Analyse gründet auf der Lateralisierung der Sprachfunktion im menschlichen Gehirn (Démonet et al., 1992) und somit auf mögliche Unterschiede in der Aktivierung beider Ergebnisse. Bei einem alpha-Niveau von 0,05 ist ein Unterschied für die vorliegenden Daten und verwendeten Testverfahren bei einem p-Wert von $p < 0,05$ statistisch signifikant.

3 Ergebnisse

Für jeden Probanden ergeben sich insgesamt sechs evozierte Felder, die zum Beginn eines Tons oder zum Beginn der visuellen Präsentation eines Wortes gemittelt wurden: zwei evozierte Felder (lauter Ton und leiser Ton) aus dem Tonparadigma (vgl. Hypothese 1), und vier evozierte Felder aus dem Sprachparadigma, nämlich Tonsimulation nach "lautem" Wort und "leisem" Wort (vgl. Hypothese 2), sowie "lautes" Wort und "leises" Wort selbst (vgl. Hypothese 3). Die Ergebnisse der beiden Paradigmen werden im Folgenden nacheinander dargestellt.

3.1 Tonparadigma

3.1.1 Verhaltensdaten

Die Versuchspersonen wurden während der Präsentation der Tonstimuli aufgefordert, beim Hören von seltenen 220- oder 880-Hz-Tönen dies durch Heben des rechten Zeigefingers zu beantworten. Die durchschnittliche Antwortrichtigkeit lag bei 96,5% (SD = 5,7). Laute und leise 440-Hz-Töne, die fälschlicherweise als frequenzabweichend mit einer Fingerbewegung quittiert wurden, wurden nicht zur Analyse herangezogen.

3.1.2 Evozierte Aktivität

Im Mittelungsprozess umfassten die artefaktbereinigten Epochen für leise und laute Töne ein Zeitfenster von 500 ms vor bis 500 ms nach Stimulusbeginn. Nach Prüfung der Epochen auf Artefakte aufgrund von Augenbewegungen und Störungen in einzelnen Kanälen wurden insgesamt 80 bis 100 artefaktfreie Epochen ($M = 95$; $SD = 6,0$) in die

Mittelung der leisen und lauten Tonstimuli einbezogen. Aufgrund von Signalstörungen im Sensor 0443 bei einem Probanden (0693), wurden Signale aus diesem Kanal für die Mittelung dieses Probanden ausgeschlossen. Die folgenden Werte gelten für das ungewichtete Mittel aus lauten und leisen Tönen. Die gemittelten evozierten Felder nach Tonstimulus Präsentation zeigten bei allen 20 Versuchspersonen in der Kanalauswahl über dem linken und rechten Temporallappen deutlich identifizierbare Amplitudenmaxima auf Kanalebene zwischen 99 ms und 141 ms (links; $M = 122$ ms, $SD = 12,0$) bzw. zwischen 104 ms und 141 ms (rechts; $M = 121$ ms, $SD = 10,4$) nach Reizbeginn. Das Amplitudenmaximum in fT/cm^2 wurde auf der linken Seite bei 16 der Probanden von Kanal 0233 aufgezeichnet. Bei den verbleibenden vier Probanden wurde das Maximum in einem benachbarten Kanal aufgezeichnet. Auf der rechten Seite finden sich die Amplitudenmaxima bei 11 Probanden im Sensorpaar 1333 und 1332. Die übrigen Probanden zeigten in den benachbarten und ventral gelegenen Kanälen ihre Signalhöhepunkte auf. Diese entsprechen der N100m-Komponente des evozierten Feldes nach einer Tonstimulation (Hari, 1991). Linkshemisphärisch konnte eine sehr ähnlich starke Aktivierung ($M = 52fT/cm^2$, $SD = 15,6$) wie in der rechten Hemisphäre ($M = 51 fT/cm^2$, $SD = 21,9$) beobachtet werden. Die Amplitudenmaxima wurden im Programm XPlotter jeweils für die linke und rechte Hemisphäre vermessen und können mit dem entsprechenden Sensor, der Latenz und der Magnetfeldstärke in Femtotesla/ cm^2 der Tabelle 1 entnommen werden. Die neuromagnetischen Signale auf Sensorebene werden exemplarisch für einen Probanden (0694) über alle Kanäle in Abbildung 9 dargestellt.

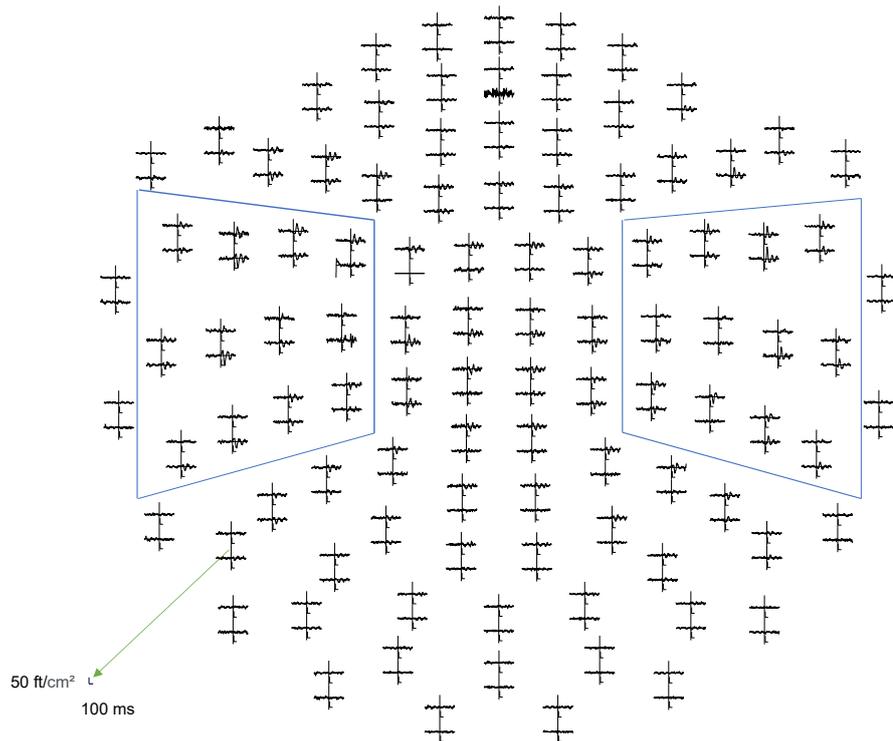


Abb. 9: Gemittelte MEG-Signale aus dem Tonparadigma auf Sensorebene. Die neuromagnetische Aktivierung bei Tonstimulierung ist exemplarisch für einen Probanden (0694) dargestellt. Die für die Dipolerstellung berücksichtigten Kanäle sind für alle Probanden identisch und werden hier mit einem blauen Kasten markiert.

Tabelle 1: N100m-Amplitudenmaxima. Die Amplitudenmaxima der neuromagnetischen Signale nach akustischer Stimulierung können in ihrer Lokalisation (Kanal), ihrem Zeitpunkt nach Stimulusbeginn (in ms) und ihrer Magnetfeldstärke (in fT/cm²) jeweils für die linke und rechte Hemisphäre entnommen werden. Die mittleren Zeitwerte und Magnetfeldstärken sind mit den entsprechenden Standardabweichungen und minimalen/maximalen Werten unter den Amplitudenmaxima aufgeführt.

Proband	Kanal Links	Zeit (ms) Links	Stärke (fT/cm ²) Links	Kanal Rechts	Zeit (ms) Rechts	Stärke (fT) Rechts
0689	0233	124,0	44,5	1332	111,5	61,8
0690	0233	99,2	36,0	1333	135,8	57,0
0691	0233	132,3	46,4	1313	141,1	28,2
0693	0233	122,6	46,5	1322	124,2	68,7
0694	0233	132,9	60,6	1333	111,1	76,4
0695	0233	120,7	53,3	1332	117,8	68,6
0697	0233	126,1	55,6	1332	113,7	27,4
0698	0233	126,1	67,6	1313	107,1	19,0
0706	0233	137,0	40,8	1313	117,9	26,9
0708	1612	103,2	29,5	1443	119,1	29,1
0712	0233	100,3	69,4	1322	109,0	86,3
0715	0233	116,2	37,0	1333	133,5	45,3
0723	1623	117,1	28,8	1332	125,1	30,4
0727	0242	138,1	42,0	1332	139,0	44,3
0728	0242	118,9	37,2	1333	104,2	29,5
0730	0233	133,3	45,4	1343	114,3	52,0
0731	0233	118,9	69,7	1313	124,0	59,3
0745	0233	126,3	83,2	1333	125,8	85,7
0748	0233	140,9	64,8	1322	119,9	36,7
0752	0233	115,2	72,0	1333	117,9	80,6
Mittelwert		122,5	51,5		120,6	50,7
Standardabweichung		12,0	15,6		10,5	21,9
Minimum		99,2	28,8		104,2	19,0
Maximum		140,9	83,2		141,1	86,3

3.1.3 Modellierung auditorischer Dipole und Quellenaktivierung

Auf Grundlage der über laute und leise Töne gemittelten MEG-Signale aus dem Tonparadigma wird für jeden Probanden ein Dipol je Hemisphäre mit dem Programm Source Modelling (Elekta Neuromag, Helsinki, Finnland) modelliert. Die gemittelten Aktivierungen in den ausgewählten Sensoren können als bipolare Magnetfelder auf der Schädeldecke dargestellt werden, und werden mit Hilfe der Software mittels eines äquivalenten Stromdipols (*equivalent current dipole*) modelliert (siehe Abbildung 10). Die Modellierung wird für ein Zeitfenster von 20 ms um das individuelle lokale Maximum herum durchgeführt. Unter Einbezug der Goodness of Fit sowie der Lokalisation im individuellen MRT als unterstützendes Kriterium wird für jeden Probanden aus dem Pool der resultierenden Dipole über die Zeit ein Dipol je Hemisphäre selektiert, der die neuromagnetische Aktivierung bestmöglich aufklärt. In Abbildung 10 sind die hemisphärenspezifischen Dipole im Programm Source Modelling (Elekta Neuromag, Helsinki, Finnland) eines Probanden (0694) exemplarisch als grüne Pfeile und an die Kopfoberfläche projiziert dargestellt. Die Mitte des Pfeils entspricht der Punktlokalisierung des Dipols und die Richtung des Pfeils entspricht der Richtung, in die der Strom fließt. Die Koordinaten der auditorischen Dipole aller Versuchspersonen mit entsprechender Goodness of Fit sind im Anhang B zusammengefasst.

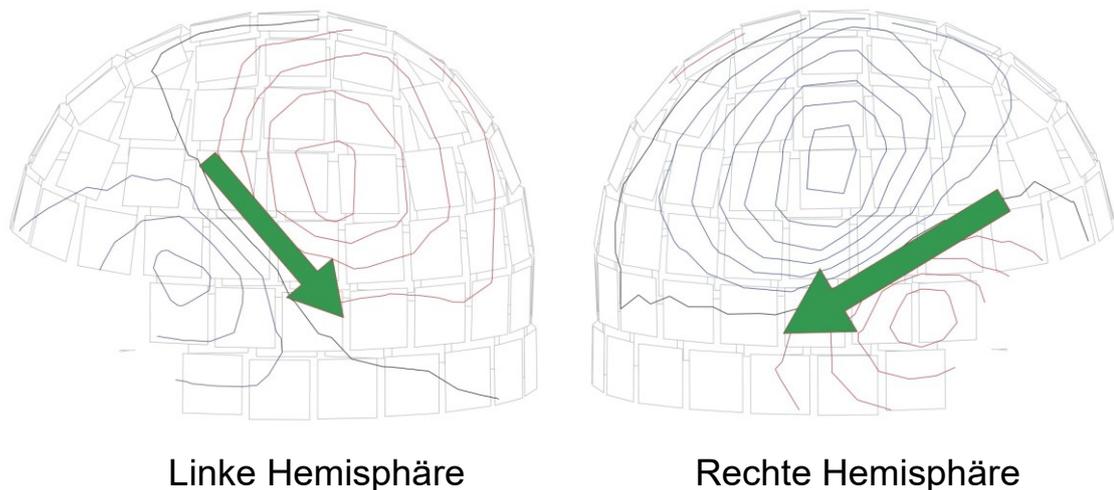


Abb. 10: Auditorische Dipole. Die bipolare Feldverteilung eines Probanden (0694) zu einem Zeitpunkt nahe der maximalen neuromagnetischen Aktivierung (110 ms) wird links- und rechtstemporal abgebildet. Aus den Magnetfeldern wird mittels Software der Dipol berechnet (als grüner Pfeil dargestellt), der diese Feldverteilung produziert haben könnte. Der Dipol stellt dabei das Zentrum der neuronalen Aktivierung dar und ist parallel zum intrazellulären Stromfluss der apikalen Pyramidenzellen ausgerichtet.

Die Lokalisationen der Quellen im individuellen Gehirn der Probanden wurden mittels T1-gewichteten MRT-Aufnahmen überprüft. In Abbildung 11 werden die Quellen exemplarisch für einen Probanden (0694) in seinem individuellen MRT gezeigt. Die Dipole liegen bei allen Probanden jeweils im Bereich des linken und rechten primären auditorischen Kortex im Temporallappen und sind parallel zum Stromfluss der apikalen kortikalen Pyramidenzellen nach dorsokaudal ausgerichtet.

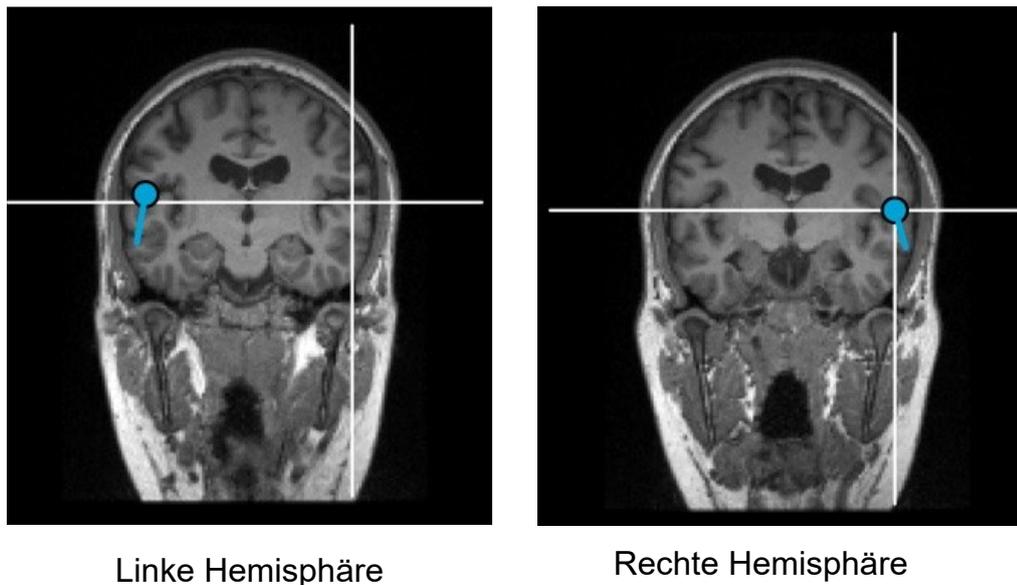


Abb. 11: Auditorische Dipole im MRT-Bild. Die Lokalisation der selektierten probandenspezifischen auditorischen Dipole werden in der individuellen Anatomie (hier:) des Probanden 0694 gesichtet und evaluiert. In der T1-gewichteten MRT-Aufnahme sind die Dipole als blaue Pins jeweils in der Frontalaufnahme zu erkennen. Sowohl der rechte als auch der linke Dipol ist im Temporallappen lokalisiert und nach dorsokaudal ausgerichtet.

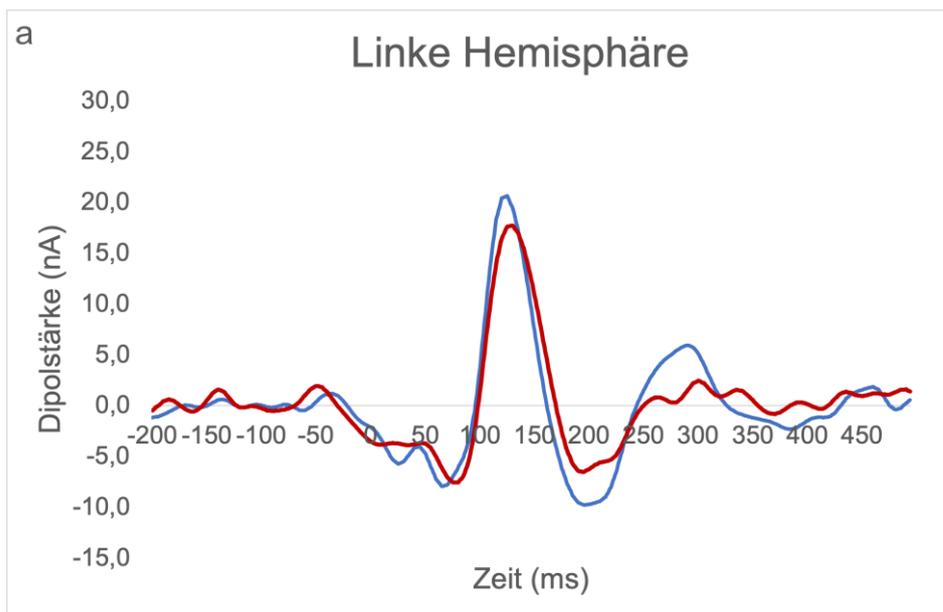
Entsprechend des in Abschnitt 2.4 beschriebenen Inversen Problems sind die Dipolmodelle nicht eindeutig und stellen lediglich eine mögliche und unter Berücksichtigung des Stands der Forschung wahrscheinliche Quelle der registrierten neuromagnetischen Aktivierung dar. Für 16 von 20 Probanden resultierte je ein Dipol je Hemisphäre nach dem beschriebenen Vorgehen. Bei drei weiteren Probanden musste für je eine Hemisphäre ein angepasstes Vorgehen praktiziert werden, bei einem Probanden für beide Hemisphären. Dies wird im Folgenden erläutert. Bei einem Probanden (0690) wurden drei Kanalpaare (0412, 0413, 0442, 0443, 1812, 1813) im Rahmen des Dipolfittings ausgeschaltet, da im Modellierungsprozess sonst bipolare Felder berücksichtigt worden wären, die außerhalb der typischen Feldverteilung für die N100m

liegen. In dem festgelegten Fitting Zeitfenster von ± 20 ms um das Amplitudenmaximum dieses Probanden herum, zeigte sich die N100m nicht als stärkstes Feld. Eine stärkere bipolare Feldverteilung entsprechend der N100m zeigte sich wenige Millisekunden später, sodass unter Berücksichtigung der Goodness of Fit und der anatomischen Gegebenheiten ein Dipol außerhalb des Modellierungszeitfensters, nämlich bei in der Gruppe üblichen Zeitpunkten (vgl. Tabelle 1) von 119 ms auf der linken und von 114 ms auf der rechten Seite ausgewählt wurde. Bei drei Probanden (0691; 0698; 0706) waren die berechneten Dipole der rechten Hemisphäre mit der maximalen Goodness of Fit anatomisch nicht in den Regionen des Temporallappens lokalisiert, sondern in der temporalen Schädelkalotte und damit zu lateral. Für diese Probanden wurde das anatomische Kriterium der typischen Lokalisation stärker gewichtet und nachgeordnet wurde eine möglichst hohe Goodness of Fit angestrebt.

Nach der Modellierung der auditorischen Dipole werden die gemittelten MEG-Signale separat für laute und leise Tonstimulation in das Programm Source Modelling (Elekta Neuromag, Helsinki, Finnland) eingeladen. Die resultierenden Quellenverläufe stellen die Aktivierung des Dipols in Nanoampere (y-Achse) im zeitlichen Verlauf (x-Achse) dar.

Die Dipolstärken wurden mit ihren zugehörigen Zeitpunkten in 1 ms-Schritten ausgelesen, in das Ascii-Format umgewandelt, und im Programm Excel weiterverarbeitet. Es resultierten für jeden Probanden vier ausgelesene Quellenverläufe, jeweils zwei (lauter Ton, leiser Ton) für die linke und rechte Hemisphäre. Für die statistische Analyse wurden für einen Probanden alle Daten der vier Quellenverläufe für rechts und links zu jedem Zeitpunkt gemäß z-Standardisierung (Milligan und Cooper, 1988) normalisiert. Die Ausmessung der Quellenaktivierung erfolgte für alle Probanden in der Tonbedingung in einem Zeitfenster von 100 bis 155 ms und orientierte sich am Auftreten der N100m im magnetischen Feld. Für die Vermessung der Dipolstärkeverläufe über die Zeit sollen die beiden eingesetzten Dipole die gemessenen Signale aller Kanäle bestmöglich aufklären, hierzu wurde, wie in den anderen Bedingungen auch, die für das Dipol-Fitting verwendete Kanalauswahl aufgehoben. Ein lokales Maximum wurde nur dann als Aktivierung gewertet, sofern dieses das Baselinenniveau in diesem Zeitfenster um eine Standardabweichung überschritt. Ein solches Maximum konnte bei allen Probanden sowohl in der Bedingung laute Töne als auch leise Töne gemessen werden. Abbildung 12 zeigt die Quellenverläufe gemittelt über alle Probanden für die linke (12a) und für die

rechte (12b) Hemisphäre, jeweils separat für laute und leise Töne. Die Aktivierungsverläufe der auditorischen Quellen in der Bedingung „laute Töne“ zeigten in der linken Hemisphäre Maxima um 124 ms (SD = 8) nach Stimulusbeginn mit einer mittleren Dipolstärke von 22,8 nA (SD = 8,2). Leise Töne zeigten deskriptiv links im Mittel zeitlich etwas spätere (M = 130 ms; SD = 11), und mit durchschnittlich 20,0 nA (SD = 8,6) etwas niedrigere Amplitudengipfel als in der lauten Tonbedingung. Über dem rechten Temporallappen ist die maximale Quellenaktivierung beim Hören lauter Töne aller Probanden mit 24,5 nA (SD = 11,7) im Mittel etwas stärker als links und liegt zeitlich ähnlich dem Ergebnis in der linken Hemisphäre im Mittel bei 122 ms (SD = 8,6). Leise Töne aktivierten die Quellen der rechten Hemisphäre mit einer mittleren Dipolstärke von 22,7 nA (SD = 13,2) weniger stark und zeitlich später (M = 124 ms; SD = 13,4) als laute Töne.



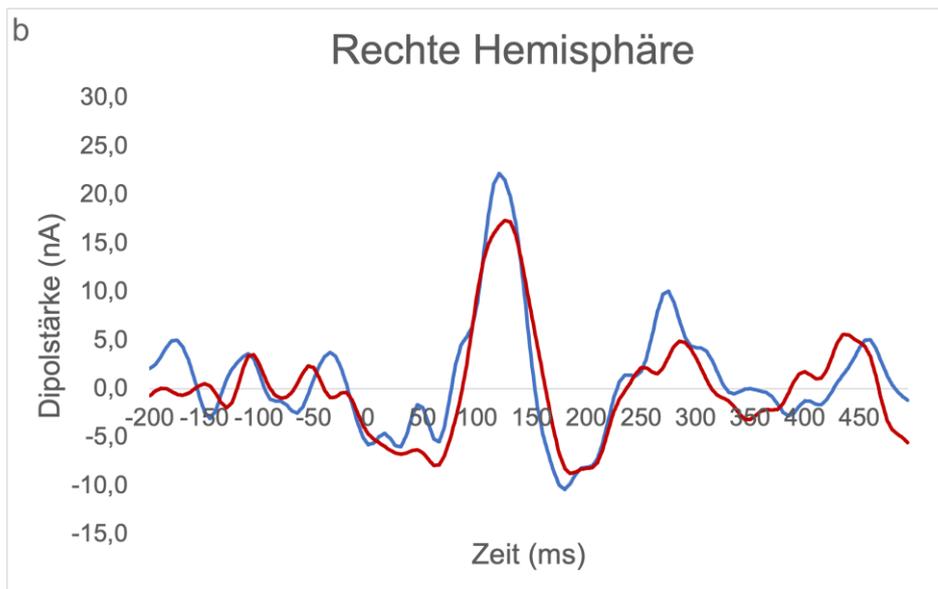


Abb. 12a und b: Dipolquellenverläufe bei lauten und leisen 440-Hz-Tonstimuli. In der Abbildung sind die mittleren Quellenverläufe aller Probanden, jeweils für die linke (a) und rechte Hemisphäre (b), beim Hören lauter (blaue Kurve) und leiser (rote Kurve) 440-Hz-Töne dargestellt. Null stellt den Zeitpunkt der Tonpräsentation dar.

3.1.5 Statistische Analyse

In der Tonbedingung wurde mittels zweier Wilcoxon-Tests, separat für die linke und die rechte Hemisphäre untersucht, ob laute 440-Hz-Tonstimuli im Vergleich zu leisen Tonstimuli eine stärkere Aktivierung im auditorischen Kortex hervorrufen (Hypothese 1). In der linken Hemisphäre wurden die normalisierten maximalen Dipolstärken beim Hören von lauten versus leisen Tonstimuli miteinander verglichen. Es wird eine signifikant stärkere Aktivierung der Dipole ($p = 0,016$) bei lauten Tönen als bei leisen Tönen beobachtet. Vergleicht man die Werte für laute versus leise Töne in der rechten Hemisphäre, erhält man ebenfalls eine signifikant erhöhte Aktivierung beim Hören von Tonstimuli hoher Lautstärke gegenüber geringer Lautstärke ($p = 0,038$).

3.2 Sprachparadigma: Ton nach „lauten“ und „leisen“ Wörtern

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bedingungen „440-Hz-Ton nach ‚lauten‘ und ‚leisen‘ Verben“ dargestellt.

3.2.1 Verhaltensdaten aus dem Sprachparadigma

Die Aufgaben zur Überprüfung der semantischen Verarbeitung der Wortstimuli im Wortparadigma wurden im Mittel mit 95,3% (SD = 7,3) richtig beantwortet. Wortstimuli,

die eine falsch beantwortete Aufgabe nach sich zogen, wurden von der Analyse ausgeschlossen.

3.2.2 Evozierte Aktivität

Aus dem Sprachparadigma wurde für die Mittelung der 440-Hz-Standardtöne nach „lautem“ Wort 68 bis 155 Epochen ($M = 124$; $SD = 25,0$) und für Töne nach „leisem“ Wort 77 bis 155 Epochen ($M = 124$; $SD = 23,1$) eingeschlossen. Gelegentlich waren einzelne Kanäle mit einem Signalrauschen belegt und wurden für die weitere Auswertung ausgeschlossen. Dies betraf die Kanäle 0233 (Proband 0695), 1533 (Proband 0731) und 0443 (Proband 0693). Signalstörungen in einem Teildatensatz eines Probanden (0694) erforderten den Ausschluss des gesamten Datenblockes (Datenblock 3 von insgesamt 4 vergleichbaren Datenblöcken) für diese Versuchsperson. Bei einem Probanden (0752) wurde aus technischen Gründen kein 440 Hz-Standardton appliziert - dieser Proband wurde für die Bedingung "Ton nach Wort" ausgeschlossen. Somit konnte für 19 Probanden die evozierte Aktivität für "Ton nach ‚lautem‘ Wort" und für "Ton nach ‚leisem‘ Wort" berechnet werden.

Die gemittelten neuromagnetischen Signale eines Probanden (0694) werden in der Sensoransicht in Abbildung 13 demonstriert. Im Folgenden werden die individuell modellierten auditorischen Dipole aus dem Tonparadigma herangezogen, um die im Sprachparadigma gemessene Aktivierung auf "Ton nach ‚lautem‘ Wort" und auf "Ton nach ‚leisem‘ Wort" aufzuklären.

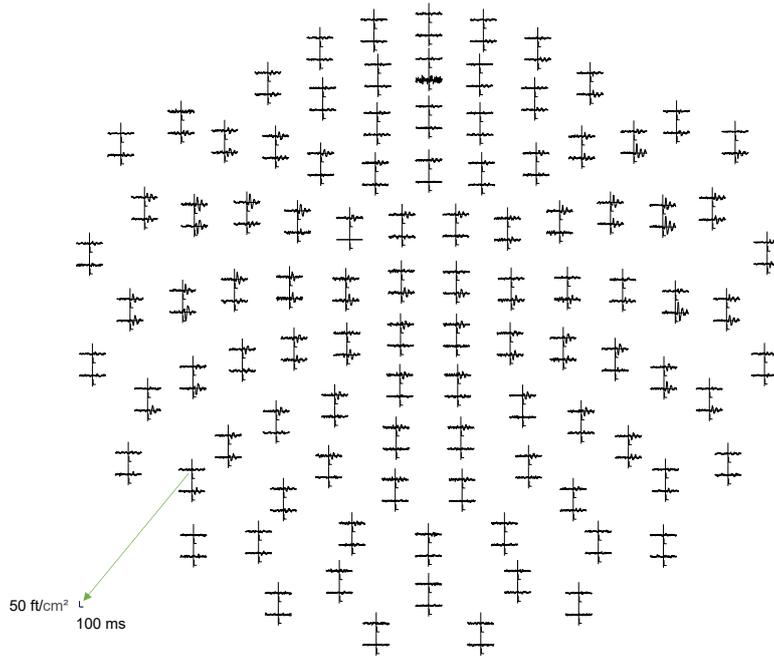


Abb. 13: Gemittelte MEG-Signale aus dem Sprachparadigma auf Sensorebene. Die neuromagnetische Aktivierung bei Tonstimulierung nach visueller Präsentation von implizit lauten Wörtern ist exemplarisch für einen Probanden (0694) dargestellt.

3.2.3 Quellenaktivierung

Im Sprachparadigma wurden bei 19 Probanden 440-Hz-Tonstimuli, die auf „laute“ und „leise“ Verben folgten, auf Aktivierung der auditorischen Dipole analysiert. Die Quantifizierung der Dipolaktivierung erfolgt auch hier anhand der maximalen Dipolstärke in Nanoampere, die im Quellenverlauf gemessen wird. Für die Vermessung der Dipolstärkeverläufe über die Zeit sollen die beiden eingesetzten Dipole die gemessenen Signale aller Kanäle bestmöglich aufklären, hierzu wurde wie in den anderen Bedingungen auch die Kanalauswahl aufgehoben. Der Aktivierungsverlauf der Quellen einer Versuchsperson wird in Abbildung 14 für die Bedingung "Ton nach ‚lautem‘ Wort" und "Ton nach ‚leisem‘ Wort" dargestellt. Die lokalen Maxima wurden, wie in der Tonbedingung, in einem Zeitfenster von 100 ms bis 155 ms aufgesucht und ausgemessen. Bei einem Probanden (0698) wurde im Quellenverlauf der auditorischen Aktivierung nach Präsentation von „lauten“ Wörtern in der rechten Hemisphäre ein lokales Maximum mit einer Latenz von 170 ms und demnach außerhalb des Zeitfensters vermessen. Das lokale Maximum des Probanden 0693 unterschritt in der Tonanalyse der rechten

Hemisphäre nach „leisen“ Verben eine Standardabweichung des Baselinelevels um 0,01 nA. Beide Werte wurden dennoch in die Analyse miteinbezogen.

Im linken Temporallappen zeigten die Probanden deskriptiv eine geringere Aktivierung der Quelle bei der Verarbeitung eines 440-Hz-Tons nach dem Lesen eines „lauten“ Wortstimulus ($M = 29,1$ nA; $SD = 12,6$) als nach dem Lesen eines „leisen“ Wortstimulus ($M = 30,5$ nA; $SD = 12,6$). Die Signalhöhepunkte ereigneten sich nach Verben geringer Lautstärke um 128 ms ($SD = 12,1$), und damit nur wenig später als bei der „lauten“ Wortbedingung ($M = 127$ ms, $SD = 10,1$). Im Hinblick auf die auditorische Verarbeitung der rechten Hemisphäre konnten zwischen „lauter“ und „leiser“ Wortbedingung deskriptiv ähnlich hohe Dipolmaxima detektiert werden. Die Tonverarbeitung nach „lauten“ Verben misst ein geringfügig kleineres lokales Maximum ($M = 26,2$ nA; $SD = 14,8$) um 129 ms ($SD = 15,6$) als nach „leisen“ Verben ($M = 26,5$ nA; $SD = 14,9$) bei 126 ms ($SD = 11,7$). Insgesamt zeigt die linke Hemisphäre im Vergleich zur rechten Hemisphäre numerisch höhere Signale der äquivalenten Stromdipole auf.

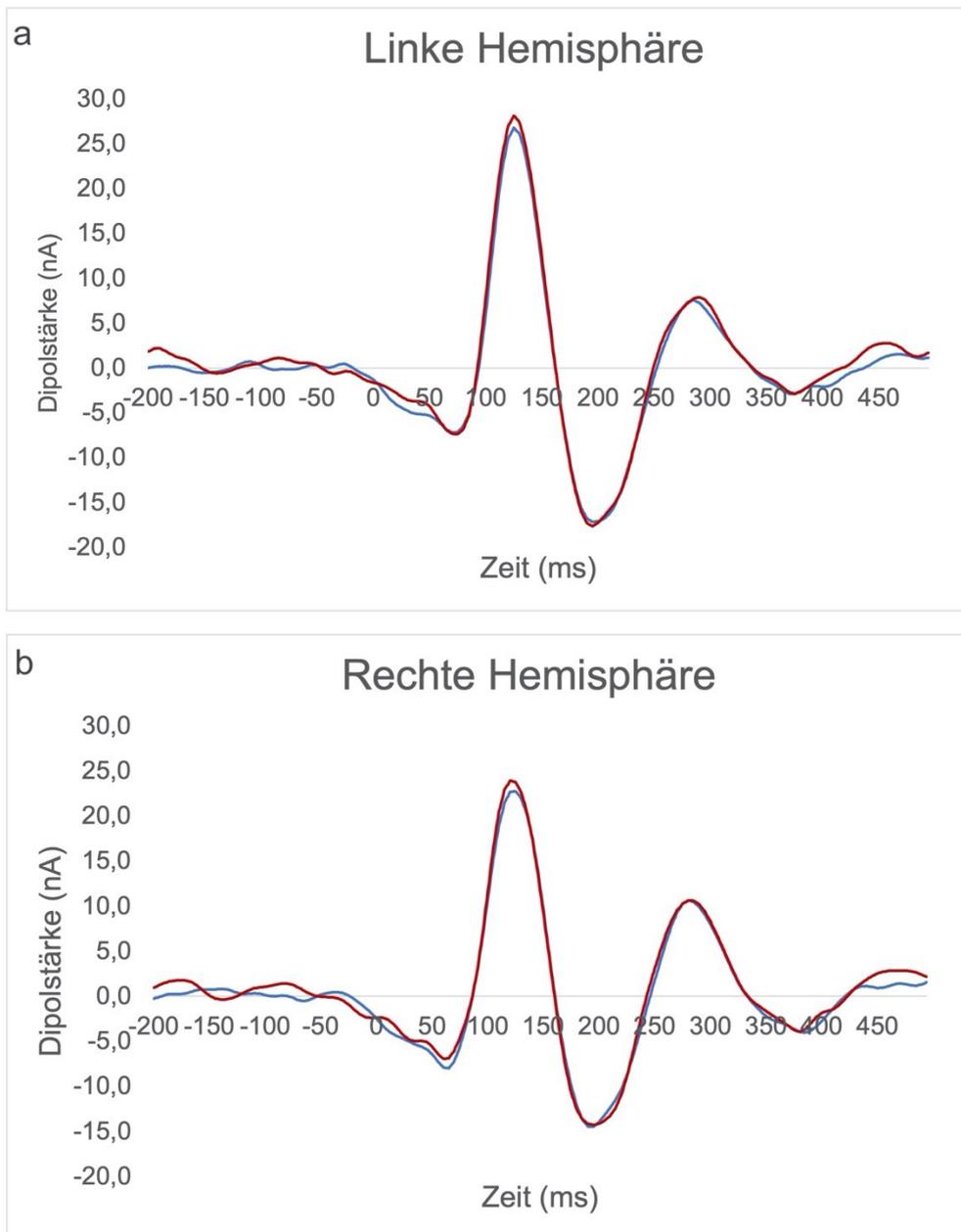


Abb. 14a und b: Dipolquellenverläufe bei 440-Hz-Tönen nach „lauten“ und „leisen“ Wörtern. In der Abbildung sind die mittleren Quellenverläufe aller Probanden, jeweils für die linke (a) und rechte Hemisphäre (b), für 440-Hz-Töne nach implizit lauten (blaue Kurve) und leisen Wortstimuli (rote Kurve) dargestellt. Null stellt den Zeitpunkt der Tonpräsentation dar. Die Töne selbst hatten stets dieselbe Lautstärke.

3.2.4 Statistische Analyse

Der auditorische Kortex wurde hinsichtlich einer möglichen differenzierten Aktivierung beim Hören von 440Hz-Standardtönen in Abhängigkeit von zuvor visuell präsentierten Verben mit akustischem Gehalt unterschiedlicher Lautstärke untersucht. Es wird angenommen (Hypothese 2), dass die Dipolstärke der Töne nach „lauten“ Verben kleiner

ist als für Töne nach „leisen“ Verben, da bei "lauten" Verben der auditorische Kortex bereits stärker involviert sein und daher nachfolgend auf einen Ton schwächer reagieren könnte.

Der Vergleich der z-standardisierten Werte der Quellenaktivierung auf der linken Seite ergab eine signifikant höhere Ausprägung bei der Verarbeitung von Tonstimuli nach Verben mit geringer impliziter Lautstärke im Kontrast zu Verben mit hoher impliziter Lautstärke ($p = 0,043$; Wilcoxon). In der rechten Hemisphäre wurde kein signifikanter Unterschied der Dipolaktivierung zwischen Tönen nach "lauten" versus „leisen“ Wörtern festgestellt ($p = 0,359$; Wilcoxon).

3.3 Sprachparadigma: „Laute“ und „leise“ Wörter

3.3.1 Evozierte Aktivität

73 bis 156 Epochen ($M = 134$ $SD = 21,3$) nach Wortstimuli mit implizit hoher Lautstärke und 81 bis 157 Epochen ($M = 135$; $SD = 19,9$) nach Wortstimuli mit implizit geringer Lautstärke wurden bei der Mittelung nach oben beschriebenen Ausschluss von Epochen mit falschen Reaktionen und/oder Signalartefakten verwendet. Unberücksichtigte Sensoren entsprechen den Sensorausschlüssen in der Bedingung „440-Hz-Ton nach „lauten“ und „leisen“ Wörtern“ und sind dem Abschnitt 3.2.2.1 zu entnehmen. Die mittlere neuromagnetische Aktivierung eines Probanden beim Lesen von „lauten“ Wörtern ist in Abbildung 15 auf Sensorebene abgebildet. Betrachtet man die temporal lokalisierten Kanäle im Vergleich zu den vorherigen beiden akustischen Stimulationen, lassen sich hier nur kleine Signale finden. Dies ist zu erwarten, da die Wörter visuell präsentiert werden und der visuelle Kortex im Okzipitallappen der Großhirnrinde lokalisiert ist. Dementsprechend werden in den okzipitalen Sensoren stärkere neuromagnetische Aktivierungen registriert.

Zur Weiterverarbeitung werden auch hier die MEG-Signale gemittelt zum Beginn der "lauten" und der "leisen" Wortpräsentation gespeichert. Die auditorischen Dipol-Quellen der rechten und linken Hemisphäre aus der Tonstimulation werden mittels der Software Source-Modelling (Neuromag) herangezogen, um die gemessenen Signale insgesamt aufzuklären.

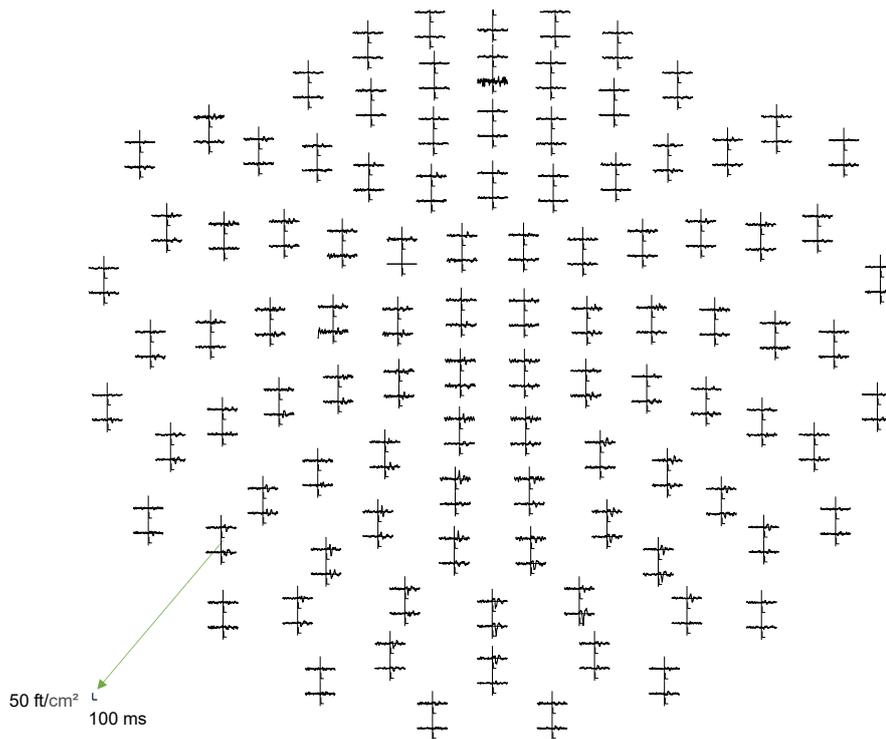


Abb. 15: Gemittelte MEG-Signale beim Lesen von „lauter“ Wörtern auf Sensorebene. Dargestellt sind die neuromagnetischen Signale eines Probanden (hier: 0694) bei visueller Präsentation „lauter“ Wortstimuli auf Sensorebene. Die Kanäle zeigen jeweils die Magnetfeldstärke in fT/cm² im zeitlichen Verlauf von 500 ms vor bis 500 ms nach Reizdarbietung.

3.3.2 Quellenaktivierung

Das Besondere der Auswertung in dieser Bedingung ist, dass keine lokalen Amplitudenmaxima für die Auswertung vermessen wurden, sondern in einem Zeitfenster von 100 – 215 ms ein Flächenmaß der Aktivierung als Fläche unter der Kurve berechnet wurde. Diese Art der Quantifizierung wurde angewandt, da bei der Vermessung der maximalen Dipolstärken auf Quellenebene bei mehreren Probanden bilateral lokale Peaks außerhalb des für die auditorischen Bedingungen (Tonstimulation laut und leise und Ton nach Wort) festgelegten Zeitfensters von 100 ms bis 155 ms auffielen (siehe Abbildung 16a). Für die Vermessung der Dipolstärkeverläufe über die Zeit wurde auch hier die Kanalauswahl aufgehoben. Nach explorativer Mittelung aller Quellenverläufe wurde zunächst ein weiteres Zeitfenster definiert, das sich dem ersten Zeitfenster anschloss und sich von 155 ms bis 215 ms erstreckte, damit dieser weitere Peak in einer Analyse berücksichtigt werden könnte. Die Amplitudenmaxima präsentierten sich uneinheitlich in einem oder beiden Zeitfenstern und zeigten auch innerhalb eines einzelnen Probanden ein unterschiedliches Auftreten zwischen rechter und linker Hemisphäre, sowie zwischen der

„lauten“ und „leisen“ Wortbedingung. Die explorativen Ergebnisse der Ausmessungen der Dipolmaxima sind dem Anhang C beigelegt. Für die statistische Analyse der Hypothese wurde ein anderes, hier besser geeignetes Maß für eine Aktivierung über die Zeit herangezogen: die *Area under the curve*.

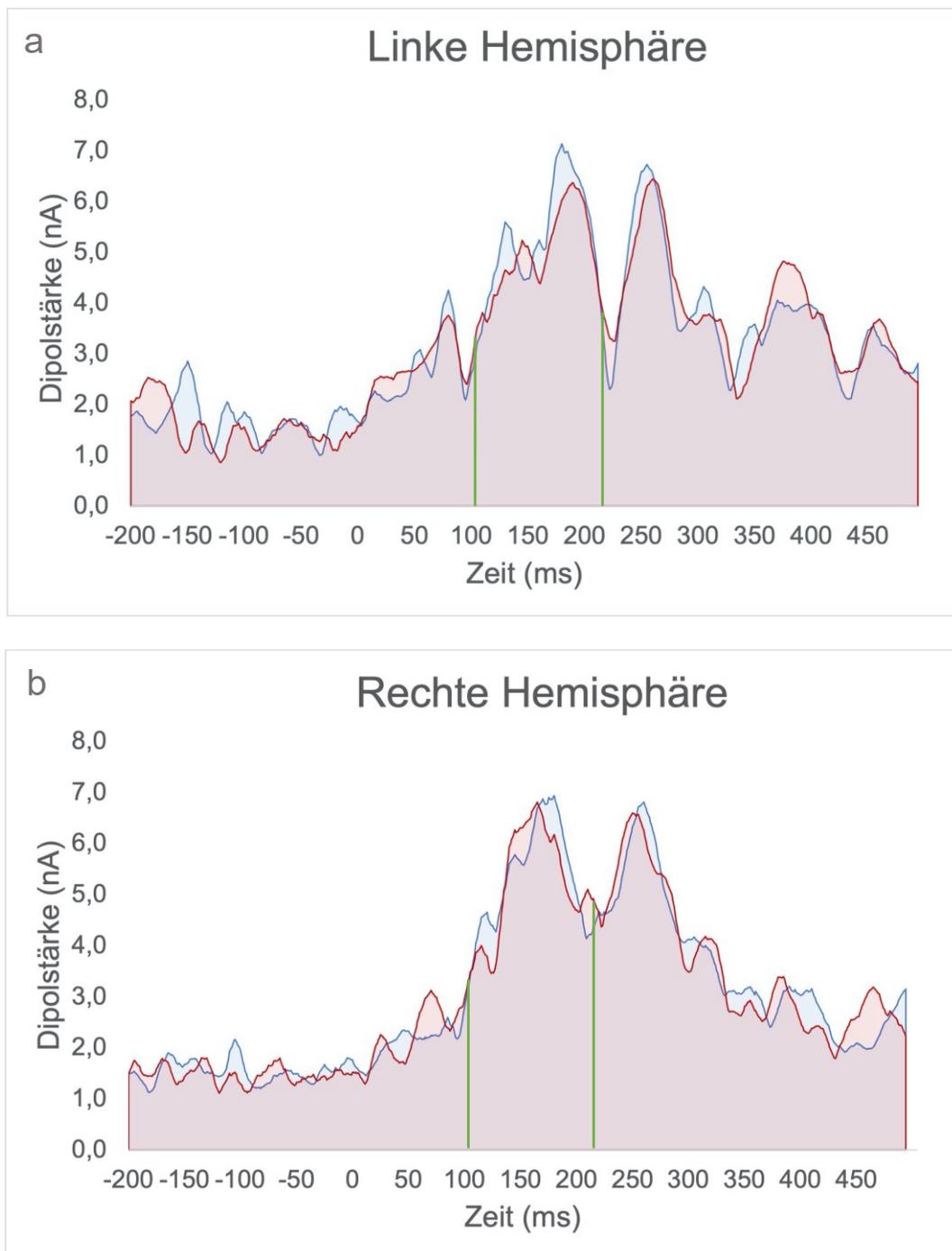


Abb. 16a und b: Dipolquellenverläufe beim Lesen von „lauten“ und „leisen“ Wörtern. In der Abbildung sind die mittleren Quellenverläufe, jeweils für die linke (a) und rechte Hemisphäre (b), beim Lesen von implizit lauten (blaue Kurve) und leisen Wortstimuli (rote Kurve) dargestellt. Null auf der X-Achse stellt den Zeitpunkt der visuellen Wortpräsentation dar. Die hellrot beziehungsweise hellblau markierte Fläche unter der Kurve stellt die *Area under the curve* dar. Grüne Linien markieren das Zeitfenster von 100 – 215 ms.

Um die gesamte Aktivierung des relevanten Zeitfensters in die Analyse mit einzubeziehen und dem Umstand der intra- und interindividuellen Variabilität bzgl. des Auftretens von lokalen Amplitudenmaxima Rechnung zu tragen, wurde anstelle von lokalen Dipolmaxima die gesamte Aktivierung der Quelle in Form einer Flächenberechnung unter der Kurve über beide Zeitfenster insgesamt genutzt (siehe Abbildung 16). Die Fläche umfasst die (rektifizierte) Aktivierung im Zeitfenster von 100 ms bis 215 ms. Die Werte der *Area under the curve* für alle Probanden können im Anhang D nachgelesen werden.

Sowohl in der linken als auch in der rechten Hemisphäre lässt sich numerisch eine stärkere Aktivierung des jeweiligen Dipols nach der visuellen Präsentation von „lauten“ Verben (links $M = 567,9$; $SD = 355,3$; rechts $M = 610,8$; $SD = 45,8$) im Vergleich zu „leisen“ Verben (links $M = 565,6$; $SD = 297,9$; rechts $M = 596,3$; $SD = 303,8$) beobachten.

3.3.3 Statistische Analyse

Zur Untersuchung der Annahme, dass auditorische Dipole bei Wörtern mit akustischem Gehalt beteiligt sind, und sie beim Lesen der präsentierten „lauten“ Wörter stärker aktiviert werden als bei „leisen“ Wörtern, wurde die Quellenaktivierung mittels *Area-under-the-Curve*-Berechnung quantifiziert und bezüglich hoher und geringer Lautstärke getrennt für die beiden Hemisphären verglichen.

Hinsichtlich der Aktivierung der linkshemisphärischen Dipole konnte eine signifikant stärkere Aktivierung nach „lauten“ Wortstimuli ($p = 0,029$; Wilcoxon) detektiert werden. Die Aktivierung der in der rechten Hemisphäre lokalisierten Dipole war nicht signifikant ($p = 0,275$; Wilcoxon).

4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit untersucht die Beteiligung des auditorischen Kortex bei der Verarbeitung von visuell präsentierten Wörtern mit implizit akustischem Gehalt unterschiedlicher Lautstärke. Die Hypothesen bauen auf Vorbefunden zur Sprachtheorie der *Grounded Cognition* (Barsalou, 2008) und zur Aktivierung des auditorischen Kortex bei der Verarbeitung von Wörtern auf.

Im Tonparadigma konnte eine bilateral signifikant verstärkte N100-Quellenaktivierung durch laute im Vergleich zu leisen Tönen beobachtet werden (Ergebnis zu Hypothese 1). Im Sprachparadigma ergab sich eine signifikant reduzierte linkslateralierte auditorische Antwort auf einen mittellauten Ton, dem ein implizit lautes im Vergleich zu einem implizit leisen Verb vorausging (Ergebnis zu Hypothese 2). Verben mit implizit hoher Lautstärke selbst riefen im Vergleich zu Verben, die niedrige Lautstärke implizieren, eine signifikant stärkere Aktivierung der auditorischen N100-Dipole hervor (Ergebnis zu Hypothese 3). Die Ergebnisse werden im Folgenden nacheinander diskutiert.

4.1 Tonparadigma

4.1.1 Lokalisation auditorischer Quellen

Die Gipfel-Amplituden stellten sich in den selektierten links- und rechtshemisphärischen Kanälen über auditorischen Arealen sehr ähnlich mit einer mittleren Amplitudenstärke von 52 ft/cm² und einer mittleren Latenz von 122 ms nach Reizexposition dar. Die N100m ist eine gut untersuchte Komponente des ereigniskorrelierten evozierten Feldes, die auf eine lokalisierte physiologische Aktivität im primär auditorischen Kortex zurückgeführt werden kann und ungefähr 100 – 150 ms nach Tonstimulation oder Änderung eines akustischen Reizes gemessen werden kann (Näätänen und Picton, 1987). Die zeitlichen Latenzen in meiner Studie stimmen folglich mit der Literatur zur N100m gut überein.

Die Modellierung der N100m-Komponente erfolgte für jeden Probanden individuell und diente der Lokalisierung und Quantifizierung der Aktivierung im auditorischen Kortex. Bei allen 20 Probanden konnte für jede Hemisphäre je ein Dipol unter Berücksichtigung der Goodness of Fit sowie der Lokalisation im individuellen MRT selektiert werden. Die Stromdipole befinden sich bei allen Probanden im Bereich des Gyrus temporalis superior, welcher den auditorischen Kortex umfasst (Amunts und Zilles, 2013). Die Dipole sind parallel zum Stromfluss der apikalen kortikalen Pyramidenzellen nach dorsokaudal ausgerichtet. Eine vergleichbare Lokalisation modellierter N100-Quellen im Temporallappen zeigte sich bereits in einer Reihe von früheren EEG-Arbeiten (Vaughan und Ritter, 1970, Scherg und Von Cramon, 1985, Scherg und Von Cramon, 1986). Die Stromdipole, die die N100 im magnetischen Feld generieren, wurden in MEG-Studien (Elberling et al., 1980, Hari et al., 1980, Pantev et al., 1990, Rogers et al., 1990, Sams et al., 1991), intrakraniellen EEG-Messungen (Godey et al., 2001) und EEG-Arbeiten mit

Läsionen (Knight et al., 1988, Woods et al., 1987) analysiert. Sie liegen wie in der vorliegenden Studie im superioren Teil des Temporallappens, im Planum temporale in der Nähe des primär auditorischen Kortex, und entsprechen den Dipolen, die im EEG von Vaughan und Ritter (1970) sowie von Scherg und Von Cramon (1985) beschrieben worden sind. Es sollte allerdings berücksichtigt werden, dass mehr als ein einzelner neuronaler Generator zur Entstehung des N100-Gipfelamplituden beitragen könnte (Näätänen und Picton, 1987), und dieser durchaus außerhalb des auditorischen Kortex lokalisiert sein kann (Arezzo et al., 1975, Wyss et al., 2014).

Zusammenfassend lokalisierten sich die modellierten Dipole in der vorliegenden Studie übereinstimmend mit der Literatur im Gyrus temporalis superior und damit anatomisch im auditorischen Kortex.

4.1.2 Aktivierung auditorischer Quellen: laute und leise Töne (Hypothese 1)

In der vorliegenden Arbeit dienten die aus dem Tonparadigma generierten N100m-Quellen als Parameter für Aktivierung im auditorischen Kortex. Zur Überprüfung des Lautstärkeeffekts lauter und leiser auditorischer Reize wurde die Quellaktivierung nach lauten und leisen Tönen verglichen.

Im Tonexperiment wurden laute und leise 440-Hz-Töne und nur wenige mittellaute 220/880-Hz-Töne präsentiert. Das Lautstärke-Verhältnis war 1:2:4; der lauteste Ton betrug 85 dB. Wie in Hypothese (1) erwartet, riefen die lauten Töne im Vergleich zu leisen Tönen in beiden Hemisphären eine signifikant stärkere Aktivierung der modellierten neuronalen Generatoren der magnetischen N100-Komponente auf Quellebene hervor. Die Quellenverläufe für die Aktivierung nach Tonstimulation zeigten in der linken Hemisphäre eine über alle Probanden gemittelte, maximale Aktivierung mit einer Latenz von 123 ms (laute Töne) und 130 ms (leise Töne), in der rechten Hemisphäre entsprechend 121 ms (laute Töne) und 124 ms (leise Töne). Die Latenzen entsprechen den gemessenen Latenzen in anderen Arbeiten zur N100-Komponente des evozierten Feldes (Näätänen und Picton, 1987). Bei leisen Tönen konnten teilweise deutlich längere Latenzen von 150-200 ms verzeichnet werden (Näätänen und Picton, 1987).

Die Ergebnisse lassen sich auf den Lautstärkeeffekt zurückführen. Es gilt als unbestritten, dass sich die Intensität eines Tonstimulus in der neuronalen Aktivierung widerspiegelt (Näätänen und Picton, 1987). Die Größe der magnetischen Felder nimmt mit steigender Tonintensität zu (Elberling et al., 1981, Vasama et al., 1995). Neben MEG-Studien

diskutierten auch EEG-Studien (z.B. Hegerl et al., 1994), und fMRT-Studien (z.B. Mulert et al., 2005) den Einfluss von Lautstärkevariation auf neuronale Aktivität. Einige Arbeiten bedienten sich gleichzeitig EEG- und MEG-Verfahren und stellten unterschiedliche Zusammenhänge zur Stimulusintensität fest (Reite et al., 1982, Pantev et al., 1986, Neukirch et al., 2002). Während die Amplitude akustisch evozierter Potentiale mit zunehmender Stimulusintensität stieg, wiesen evozierte Felder lediglich eine Zunahme der neuronalen Aktivität bis 60 dB auf und nahmen bei darüberhinausgehenden Intensitäten ab. Analog dazu verhielten sich die zeitlichen Latenzen. Dieser U-förmige Zusammenhang zeigte sich auch in anderen Arbeiten, wie z.B. in Adler und Adler (1989, 1991), mit einer Stagnation bei 70 dB. In einer ERP-Studie bei Affen konnte beobachtet werden, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Intensität und Amplitude besteht, wenn die Aktivierung aus dem primär auditorischen Kortex kommt, während Potentiale, die im auditorischen Assoziationskortex gemessen werden konnten, bei steigender Intensität reduziert waren (Pineda et al., 1991). Der neuronale Ursprung der auditorisch evozierten Antwort, im primär auditorischen Kortex und im auditorischen Assoziationskortex, scheint folglich den Zusammenhang zwischen Amplitude und Tonintensität zu beeinflussen. Analog zu den evozierten Potentialen und Feldern, lässt sich auch eine Abhängigkeit der Stromdipolstärke von der Tonintensität beobachten (Hegerl et al., 1994). Das Quadrat des intrazellulären axialen Stroms, der dem äquivalenten Stromdipol zugrunde liegt, variiert zum Logarithmus der Stimulusintensität (Bak et al., 1985). Dies stimmt mit der in dieser Studie beobachteten signifikant höheren Dipolstärke bei lauten im Vergleich zu leisen Tönen überein. Zusammenfassend ist der in meiner Studie vorliegende Lautstärkeeffekt bei lauter und leiser Tonstimulation auch in der Literatur in diversen Studien nachgewiesen worden und beeinflusst Amplitude sowie Latenz der N100 (m) Komponente.

4.2 Sprachparadigma

Im Sprachparadigma haben die Probanden visuell präsentierte Verben mit hoher und niedriger impliziter Lautstärke und einen darauffolgenden Standardton verarbeitet. Um die semantische Verarbeitung der Wortstimuli sicherzustellen, mussten die Versuchspersonen eine von zwei zufällig dargebotenen semantischen Aufgaben bearbeiten (s. Kapitel 2.3.2). Die Antwortrichtigkeit lag bei 95,3% (SD = 7,3), sodass eine semantische Wortverarbeitung angenommen werden kann. Im Sprachparadigma wurden zwei Hypothesen untersucht: Die auditorische Aktivierung nach einem Ton, der

auf „laute“ Verben folgt, ist im Vergleich zu „leisen“ Verben reduziert, wie es in Analogie zur repetitiven akustischen Stimulation zu erwarten wäre (Repetitionseffekt; Hypothese 2). „Laute“ Verben selbst rufen im Vergleich zu „leisen“ Verben eine stärkere Aktivierung im auditorischen Kortex hervor, wie es in Analogie zu akustischen lauten versus leisen Reizen zu erwarten wäre (Lautstärkeeffekt; Hypothese 3). Die Ergebnisse werden im Folgenden vor dem Hintergrund der Hypothesen dieser Studie nacheinander diskutiert.

Die im Tonexperiment ermittelten auditorischen Dipole wurden im Anschluss zur Aufklärung von neuromagnetischen Daten im Sprachparadigma herangezogen. Es konnte bei jedem Probanden eine Aktivierung der auditorischen Quellen in den Bedingungen Ton nach Wort und auch nach visuell präsentierten Wörtern beobachtet werden. Nach „lauten“ Verben war die linkshemisphärische auditorische Antwort auf einen Tonstimulus im Vergleich zu Tönen nach „leisen“ Verben signifikant stärker reduziert. „Laute“ Verben selbst riefen im Vergleich zu „leisen“ Verben eine linkslateralisierte signifikant stärkere Aktivierung der Dipolquellen hervor. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit der Theorie der *Grounded Cognition*, dies wird in Abschnitt 4.4 näher diskutiert. Im Rahmen von bildgebenden Studien, die die auditorische Involvierung bei der Sprachverarbeitung diskutierten, scheinen besonders der posteriore Anteil des Gyrus temporalis superior (pSTG; BA 21), sowie der Gyrus temporalis medialis (MTG; BA 22) bei der Prozessierung von konzeptionellem akustischem Wissen eine bedeutende Rolle einzunehmen (Kiefer et al., 2008, Goldberg et al., 2006, James und Gauthier, 2003, Kellenbach et al., 2001). Bei diesen Arealen handelt es sich um höhere auditorische Areale, die auch einen Zusammenhang zur Erkennung von Geräuschen und Objekten unterschiedlichen Ursprungs aufweisen. Während der linkshemisphärische pSTG und MTG insbesondere für die Erkennung von Geräuschen und Objekten mit akustischen Merkmalen relevant ist, ist die rechtshemisphärische Region in der Verarbeitung von musikalischen Klängen (Hoenig et al., 2011, Halpern et al., 2004, Zatorre et al., 1992), und beide Hemisphären im Rahmen der Verarbeitung von tierischen (Altmann et al., 2007, Lewis et al., 2005) und menschlichen Vokalisationen (Belin et al., 2000) beteiligt. Die Aktivierung temporaler Areale ist allerdings nicht auf auditorisch assoziierte Sprachverarbeitung begrenzt. Die Aktivierung ventraler und lateraler Anteile des posterioren Temporallappens wurde beim Sehen und Benennen von Tieren und Werkzeugen, sowie beim Lesen von Tier- und Objektamen beobachtet. Die Ergebnisse

legen nahe, dass die semantische Wortbedeutung von Objekten und Tieren in einem verteilten Netzwerk repräsentiert wird und ebenfalls unter Bezugnahme temporaler Areale kategoriespezifisch abgerufen wird (Chao et al., 1999).

4.2.1 Aktivierung auditorischer Quellen: Ton nach „lauten“ und „leisen“ Wörtern (Hypothese 2)

Die Analyse ergab eine signifikant reduzierte Aktivierung des auditorischen Kortex der linken Hemisphäre auf einen Tonstimulus, dem ein visuell präsentiertes „lautes“ versus „leises“ Verb vorausgeht ($p = 0,043$). In der rechten Hemisphäre trat ein solches Ergebnis nicht auf ($p = 0,359$).

Die Suppression der auditorisch evozierten N100-Komponente im magnetischen Feld bei wiederholter akustischer Reizdarbietung ist ein gut untersuchter Effekt, und wird auf verschiedene perzeptuelle und neuronale Prozesse zurückgeführt. Während die Reduktion der N100-Amplitude in einigen Arbeiten als Habituation interpretiert wird (Woods und Elmasian, 1986, Yue et al., 2017), argumentieren andere Autoren mit refraktären Eigenschaften von Neuronen als Ursache für die N1-Suppression (Näätänen und Picton, 1987, Budd et al., 1998, Rosburg et al., 2010). Ein Habituationseffekt im Rahmen der Repetitionssuppression der N1-Komponente wird von einigen Autoren wegen unzureichender Indizien für eine umgekehrte Dishabituation, als Kriterium für einen Habituationseffekt (Thompson und Spencer, 1966), und eindeutigeren Hinweisen für neuronale Refraktärität in Frage gestellt (Barry et al., 1992, Rosburg und Mager, 2021). Ein weiterer Erklärungsansatz besteht darin, dass in neuronalen Systemen eine Erwartungsanalyse stattfindet, und die Antwortsuppression die Übereinstimmung zwischen erwartetem und tatsächlich wahrgenommenem Stimulus reflektiert (Bendixen et al., 2012, Hsu et al., 2016).

Vor dem Hintergrund des Lautstärkeeffekts haben wir im Sprachparadigma diesen gut beschriebenen Repetitionseffekt in einer Analogie experimentell nachgebildet. Anstelle von zwei aufeinander folgenden Tönen haben wir den ersten Ton durch einen visuellen Wortstimulus mit implizitem akustischem Gehalt ersetzt. Dieser implizite akustische Gehalt hatte eine hohe oder niedrige Lautstärke. Der nachfolgende Ton hatte in diesem Paradigma stets dieselbe Lautstärke. Wir haben die Hypothese aufgestellt, dass der auditorische Kortex bei der Verarbeitung von Wörtern mit akustischem Gehalt beteiligt ist, und, dass analog zu lauten Tönen, „laute“ Wörter den auditorischen Kortex stärker

involvieren (siehe 4.2.2). Als Parameter für die auditorische Aktivierung dienten die modellierten N100m-Quellen aus dem Tonparadigma. Bilaterale Amplitudenmaxima wurden bei Tönen nach „lauten“ Verben bei im Mittel 127 ms in der linken und 129 ms in der rechten Hemisphäre gemessen. Nach „leisen“ Verben wurden linkshemisphärisch maximale Signalausschläge bei 128 ms und in der rechten Hemisphäre bei 126 ms beobachtet. Die gemittelten zeitlichen Latenzen entsprechen der Antwortlatenz nach akustischer Stimulation, die auch im Tonparadigma, sowie in der bestehenden Literatur beobachtet werden konnten (Näätänen und Picton, 1987).

In einem Zeitfenster von 100 ms bis 155 ms nach Tonstimulation konnte eine signifikant niedrigere Aktivierung der N100m-Quelle der linken Hemisphäre bei der Verarbeitung eines Standardtons nach „lauten“ versus „leisen“ Wörtern festgestellt werden ($p = 0,043$), in der rechten Hemisphäre gab es keinen solchen Unterschied ($p = 0,359$). Dieses Ergebnis deutet auf eine linkslateralisierte differenzierte Modulation des auditorischen Kortex durch implizite Lautstärke bei der Verarbeitung von Wörtern hin. Laut der Theorie der *Grounded Cognition* nehmen modalitätsspezifische mentale Simulationen im Rahmen der Wortverarbeitung eine zentrale Rolle ein (Barsalou, 2008). Der auditorische Kortex scheint an der Verarbeitung von Wörtern mit akustischem Gehalt beteiligt zu sein und lässt die Annahme auf eine gemeinsame neuronale Grundlage für die Verarbeitung von Tönen und Wörtern mit akustischem Gehalt in der linken Hemisphäre zu. Die signifikant reduzierte neuronale auditorische Antwort nach "lauten" Verben kann folglich mit einer unterschiedlich starken Involvierung des auditorischen Kortex bei der Verarbeitung von Wörtern unterschiedlicher Lautstärke in Verbindung gebracht werden. Im Zusammenhang mit der modulierten Responsivität des auditorischen Kortex könnte die signifikant verstärkte Antwortsuppression nach „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern in dem vorausgehend untersuchten Repetitionseffekt (Näätänen und Picton, 1987) und Lautstärkeeffekt (Elberling et al., 1981) begründet sein. Eine N100-Antwortsuppression, die im Rahmen von Stimulusrepetition beobachtet werden kann, fand möglicherweise auch im Rahmen dieses Paradigmas statt. Die signifikant stärkere Suppression nach „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern könnte auf die stärkere Rekrutierung auditorischer Neurone analog zum Lautstärkeeffekt basieren, die dann für die Verarbeitung eines Tonstimulus nicht mehr in der gleichen Weise Verfügung stünden, wie es bei „leisen“ Wörtern der Fall wäre. Vor dem Hintergrund des Habituationseffektes kann argumentiert werden, dass eine stärkere Beanspruchung neuronaler Ressourcen bei

der Verarbeitung „lauter“ im Vergleich zu „leisen“ Verben, zu einem Habituationseffekt bei einer größeren Anzahl an Neuronen führt und schließlich ebenfalls in einer stärkeren Reduktion der N100-Antwort auf einen Tonstimulus resultiert. Folglich kann allein anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht entschieden werden, ob die Antwortreduktion auf refraktäre Eigenschaften oder auf den Habituationseffekt mehrerer Neurone nach „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern zurückzuführen ist – jedenfalls findet sich ein analoger Effekt zu wiederholt dargebotenen akustischen Reizen.

Im Rahmen von Studien zum Lippenlesen konnte ebenfalls eine modulierte Responsivität des auditorischen Kortex durch visuelle akustisch bezogene Reize beobachtet werden. Durch Beobachtungen in fMRT-Studien ist bekannt, dass das Lippenlesen bei gesunden Probanden den primär auditorischen Kortex aktiviert (z.B. Calvert et al., 1997, Pekkola et al., 2005). Kauramäki et al. (2010) zeigten in ihrer Arbeit, dass bei gesunden Probanden die neuromagnetischen N100-Antworten auf Sinustöne beim Lippenlesen im Vergleich zur Kontrollgruppe, die ein stilles Gesicht gesehen haben, reduziert waren. Die N100-Suppression war dabei in der linken im Vergleich zur rechten Hemisphäre stärker ausgeprägt, was die Lateralisierung sprachlicher Funktionen unterstreicht. Reduzierte N100-Amplituden in der linken (Jääskeläinen et al., 2008, Jääskeläinen et al., 2004) und in beiden Hemisphären (Besle et al., 2004, Van Wassenhove et al., 2005) konnten auch im Zusammenhang mit artikulatorischen Gesten während akustischer Präsentation von Phonemen beobachtet werden. Dies wird von den Autoren als Hinweis auf eine auditorische Beteiligung im Rahmen visueller Sprachverarbeitung im Sinne einer audiovisuellen Interaktion interpretiert.

Der Einfluss von semantischer Wortverarbeitung auf darauffolgende Stimuli wurde auch im Rahmen von semantischen Priming Studien analysiert. Auch wenn in meiner Arbeit kein klassisches Primingparadigma verwendet wurde, so folgten im Sprachparadigma dennoch zwei Reize aufeinander. Daher sind die im folgenden beschriebenen Ergebnisse aus Priming-Experimenten im Rahmen der Grounded Cognition Theorie interpretierbar und relevant für die Interpretation meiner Ergebnisse. Beim semantischen Priming geht man von einer Voraktivierung bestimmter kortikaler Areale durch die semantische Verarbeitung von Verben aus. Reize die darauffolgend durch diese kortikalen Areale verarbeitet werden, resultieren dann im Vergleich zur nicht-geprimten Stimulusprozessierung in einer schnelleren Verarbeitung im Sinne einer Fazilitation, die zudem mit einer reduzierten neuronalen Aktivierung in eben diesen kortikalen Arealen

einhergehen (Schacter et al., 2007, Kujala et al., 2012). Klepp et al. (2017, 2019) untersuchten den Einfluss von hand- und fußbezogenen Bewegungsverben auf die Reaktionszeiten von darauffolgenden tatsächlichen Hand- und Fußbewegungen und veranschaulichte die Antwortmodulation modalitätsspezifischer Areale durch die semantische Wortverarbeitung, vergleichbar wie sie in meiner Studie beobachtet werden konnte. In der Arbeit von Klepp et al. (2017) wurden die Versuchspersonen aufgefordert, in einer semantischen Go/NoGo Aufgabe bei der Präsentation von konkreten Verben auf einen zweiten, visuellen geometrischen Reiz eine schnelle Reaktion auszuführen (Go) und bei abstrakten Verben die Aufgabe auszusetzen, also eine Reaktion zurückzuhalten (NoGo). Die Studie zeigte, dass die Reaktionszeiten der Antworten, die mit der Hand getätigt werden sollten, beim vorherigen Lesen von handbezogenen Verben kürzer waren im Vergleich zu vorher präsentierten fußbezogenen Verben und vice versa, wobei die reaktionsausführende Extremität stets durch eine geometrische Figur vorgegeben wurde. Der Primingeffekt in der Verhaltensaufgabe spiegelte sich auch in der oszillatorischen Aktivität wider. In den Zielregionen, die in den hand- und fußspezifischen Arealen des sensomotorischen Kortex lokalisiert waren, konnte im Rahmen der motorischen Vorbereitung nach geprimten Effektoren (z.B. geforderte Handreaktion nach Präsentation eines Handworts) eine reduzierte Alpha- und Betasuppression registriert werden (Klepp et al., 2019). Diese Ergebnisse legen nahe, dass bei der Verarbeitung von körperspezifischen Verben modalitätsspezifische Areale herangezogen werden, und in der Folge motorische Bewegungen mit der Hand oder dem Fuß erleichtert getätigt werden können. Die oben beschriebenen Befunde könnte man nun in der Theorie auf den auditorischen Kortex übertragen und bei der Verarbeitung von Tonstimuli, denen akustisch assoziierte Verben vorausgingen, ebenfalls eine reduzierte Aktivierung auditorischer Areale als Resultat einer Involvierung erwarten. Cao et al. (2016) untersuchte die Annahme, dass eine verbale Verarbeitung sich auf die akustische Verarbeitung auswirkt, allerdings in einem völlig anderen Paradigma als in meiner Studie, und zeigte eine Beeinflussung des Hörvermögens durch vorangehende Wortverarbeitung bereits in einer Verhaltensstudie: Probanden mit einer niedrigen Fehlerquote in der lexikalischen Entscheidungsaufgabe (Wort vs. Nicht-Wort) konnten einen sehr leisen Tonstimulus besser detektieren, wenn sie mit akustisch bezogenen Wörtern im Vergleich zu abstrakten oder motorisch-akustisch bezogenen Verben geprimt wurden. Ein mögliches neurophysiologisches Korrelat, wurde allerdings nicht untersucht. Die vorgenannten Priming-Experimente im motorischen und auditorischen Bereich legen

eine Interaktion der Verarbeitung von Wörtern mit motorischem bzw. akustischem Gehalt und nachfolgend geforderten motorischen Reaktionen bzw. sensorischen Fähigkeiten nahe, wozu auch meine Studie einen im Ergebnis im Einklang stehenden Befund liefert.

Im Folgenden möchte ich auf die Literatur zum sogenannten Repetition-Priming eingehen, die den Primingeffekt in einem Repetitionsparadigma untersucht, da auch diese Befunde für die Interpretation meiner Daten relevant sind. Kiefer (2005) untersuchte den Effekt von wiederholt präsentierten Kategorie-spezifischen Wörtern, kombiniert mit einer lexikalischen Entscheidungsaufgabe. Die Repetition der Wörter resultierte in kürzeren Reaktionszeiten und in einer Reduktion der ereigniskorrelierten Potentiale, vornehmlich der N400 Komponente als elektrophysiologisches Korrelat zum semantischen Verarbeitungsprozess, in fronto-zentralen Arealen für artefaktische (z.B. Werkzeuge) und in okzipito-parietalen Arealen für natürliche Objekte (z.B. Tiere). Trumpp et al. (2013b, 2014) untersuchten in einem ähnlichen Versuchsaufbau die Modulation der Antwort auf akustisch assoziierte Nomen in zwei Paradigmen, in denen Prime- und Zielwort entweder identisch und akustisch assoziiert waren (z.B. Helikopter – Helikopter) oder nicht-identisch und nicht modalitätsverwandt waren (z.B. Kerze – Radio). Es konnte eine reduzierte Negativierung der ERP in der repetitions-geprimten im Vergleich zur nicht repetitions-geprimten Bedingung in bilateralen frontalen und temporalen Arealen beobachtet werden. Eine Voraktivierung durch ein akustisch assoziiertes Wort resultiert folglich in einer supprimierten Antwort auf dasselbe akustisch assoziierte Wort. Das Ergebnis konnte mit Verbstimuli derselben Kategorien repliziert werden (Popp et al., 2016). Eine reduzierte neurophysiologische Antwort auf einen Stimulus, der auf akustisch assoziierte Wörter folgt, konnte in meiner Studie insofern beobachtet werden, als die Antwort auf einen Tonstimulus abhängig von der impliziten Lautstärke des vorausgehenden Wortstimulus unterschiedlich stark war. Der gewählte Versuchsaufbau in dieser Arbeit stellt jedoch kein Priming-Paradigma dar. Die Versuchspersonen sollten nicht explizit auf den Standardton im Sinne eines Zielreizes reagieren, sodass es fraglich ist, ob sich die beobachtete Antwortsuppression auf einen Primingeffekt im eigentlichen Sinn durch die semantische Wortverarbeitung zurückführen lässt.

Zusammenfassend könnte der in meiner Studie gemessenen linkslateralisierten signifikant stärkeren N1-Antwortsuppression nach Tönen, denen „laute“ Wörter vorausgingen, das Phänomen der Refraktärität (Näätänen und Picton, 1987) zugrunde

liegen. Dies wäre ein Hinweis für eine Involvierung auditorischer Neurone bei der semantischen Verarbeitung der zuvor präsentierten Wörter mit akustischem Gehalt. Die alternative neurophysiologische Grundlage des Repetitionseffektes, die Habituation (Thompson und Spencer, 1966), die ebenfalls in eine Antwortsuppression resultiert, ist als Erklärungsansatz für meine Studie eher ungeeignet, da zum Einen die Stimuli Verb und Ton nicht identisch sind und ein Habituationseffekt somit eher unwahrscheinlich ist. Zum Anderen bestünde beim Habituationseffekt eher kein Unterschied zwischen der N1-Antwortsuppression nach „lauten“ und „leisen“ Verben. Die Ergebnisse aus Primingstudien zeigen einen Effekt in Verhalten und neurophysiologischen Messungen auf, der auf eine Involvierung modalitätsspezifischer Neurone bei der semantischen Verarbeitung von Wörtern zurückgeführt werden kann. Auch wenn meine Studie kein Priming-Paradigma darstellt, tragen die Ergebnisse durch Ähnlichkeiten im Versuchsaufbau zur Diskussion meiner Arbeitshypothese bei, und stützen die Annahme einer modalitätsspezifischen Verarbeitung von Sprache.

Die Modulation von wahrgenommenen Reizen durch multimodale mentale Repräsentation, die gemäß der Theorie der *Grounded Cognition* bei der semantischen Verarbeitung eine zentrale Rolle spielen, wurde auch in Studien zu Gedankenbildern (engl. Mental Imagery) festgestellt. Die zugrundeliegende Annahme dieser Studien baut wie in der vorliegenden Studie auf dem Repetitionseffekt auf. Erwartete externe Stimuli können eine Modulation im Sinne von Top-down Prozessen hervorrufen. So ist es zum Beispiel wahrscheinlicher, das Klingeln seines Telefons zu hören, wenn man einen Anruf erwartet, und unwahrscheinlicher, wenn man in ein Buch vertieft ist. Studien zu Mental Imagery zeigten, dass die Modulation der Wahrnehmung von Stimuli auch ohne externe Reize funktioniert. Dabei wird angenommen, dass interne Vorstellungen sich mentaler Repräsentationen bedienen. In einer MEG- und EEG-Studie von Tian et al. (2018) wurde mittels eines Repetitionsparadigmas die Modulation einer auditorisch dargebotenen Silbe nach interner Vorstellung dieser Silbe untersucht. Dabei lag, wie in dieser Studie, das Augenmerk auf dem Attribut der Lautstärke der intern vorgestellten Silbe sowie der tatsächlichen Lautstärke des darauffolgenden akustischen Reizes. Die Probanden sollten sich die Silbe „da“ mehrmals jeweils laut oder leise ausgesprochen vorstellen. Daraufhin wurde die Silbe „da“ akustisch in einer von fünf verschiedenen Lautstärken dargeboten. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die wahrgenommene Lautstärke des akustischen Reizes von eins bis fünf zu bewerten.

Tian et al. (2018) stellte die Hypothese auf, dass es, analog zum Repetitionseffekt, aufgrund von vorheriger Involvierung der gleichen Neuronengruppen zu einer Suppression der akustischen Lautstärkewahrnehmung kommen würde: nach Vorstellung von laut ausgesprochener Sprache, wurde tatsächlich ein niedriges Lautstärke-Rating des darauffolgenden akustischen Reizes, sowie eine signifikant geringere magnetisch und elektrisch registrierte auditorische Antwort beobachtet. Die Ergebnisse meiner Arbeit zeigen ein signifikantes Ergebnis in dieselbe Richtung: die auditorische Antwort auf einen Tonstimulus nach visuell präsentierten „lauten“ Verben ist geringer im Vergleich zu „leisen“ Verben. Während in meiner Studie die Beteiligung und Modulation des auditorischen Kortex bei der semantischen Verarbeitung von Verben unterschiedlicher Lautstärke untersucht wurde, ersetze Tian et al. (2018) den visuellen (externen) Stimulus durch einen internen Reiz, den der Proband gedanklich konstruieren sollte. Beiden Studien gemeinsam ist, dass eine mentale Repräsentation bei internen Vorstellungen bzw. semantischer Wortverarbeitung mit einer tatsächlichen darauffolgenden akustischen Stimulation verknüpft wird, und, dass bei der Interpretation von einer Rekrutierung ähnlicher Neuronengruppen ausgegangen wird. Wichtig ist hierbei zu unterscheiden, dass es sich in meiner Studie um konzeptuelle Prozesse handelt, die eine zeitlich frühe Aktivierung (ungefähr bis 250 ms) hervorrufen (z.B. Kiefer et al., 2008), während postkonzeptuelle Prozesse, wie Gedankenbilder zeitlich später auftreten (z.B. Machery, 2007).

Abschließend fügen sich meine Ergebnisse gut in die Befunde zur neuronalen Voraktivierung des auditorischen Kortex durch akustisch assoziierte Wörter ein. Konkret erweitern meine Ergebnisse diesen Befund dahingehend, dass eine differenzierte Involvierung vor allem des linksseitigen auditorischen Kortex durch implizite Lautstärke von Verben für möglich erachtet werden kann. Diese Annahme liegt in der signifikant verstärkten N1-Supprimierung auf einen Tonstimulus nach „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern, die in meiner Studie beobachtet werden konnte.

Es bleibt die Frage offen, inwiefern die Modulation des auditorischen Kortex von der Tiefe der Verarbeitung (semantisch versus lexikalisch) beeinflusst wird. Ein Vergleich dieser beiden Aufgaben könnte einen Ansatzpunkt für zukünftige Studien sein. Des Weiteren könnte der Frage nachgegangen werden, ob eine Modulation in gleichem Maße zu beobachten ist, wenn die Versuchspersonen sich bewusst auf das Lautstärkeattribut konzentrieren. Da sich die Probanden dieser Studie des Ziels der Untersuchung nicht

bewusst waren, kann argumentiert werden, dass eine Modulation durch Top-down Prozesse, das heißt eine Modulation des externen Stimulus durch interne Prozesse, eher nicht stattgefunden hat.

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass sich die angewandte Methode von vorausgehenden Arbeiten zum auditorischen System unterscheidet. Die Messung neuromagnetischer Signale mittels MEG weist eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung auf und stellt eine geeignete Möglichkeit dar, um evozierte Felder zu untersuchen. Die modellierten Dipole stellen allerdings lediglich Modelle der wahren neuronalen Generatoren dar und können daher nicht eindeutig den Ursprung neuronaler Aktivität bei der Tonwahrnehmung identifizieren (Hämäläinen et al., 1993).

Bei der Auswertung derselben Daten konnten Niccolai et al. (2020) in lautstärkesensiblen Arealen eine signifikant stärkere Suppression im Beta-Frequenzband in der linken Hemisphäre bei „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern feststellen. Hier ist allerdings anzumerken, dass eine andere, nämlich frequenzbasierte Methode zur Datenanalyse angewandt wurde. Zudem resultierten laute Töne in der reinen Tonstimulation rechtshemisphärisch in einer verstärkten Powersuppression im Alpha-Band, die für die kommenden Analyseschritte von Bedeutung waren. In meiner Auswertung mittels evozierter Felder wurde kein Vergleich zwischen den Hemisphären angestellt, sondern es wurde ein potenzieller Lautstärkeeffekt jeweils separat in der linken und in der rechten Hemisphäre untersucht.

Interessanterweise konnte ein signifikantes Ergebnis hinsichtlich lautstärkespezifischer Wortverarbeitung nur in der linken Hemisphäre beobachtet werden. Die Lateralisierung zur linken Seite im Zusammenhang mit auditorischer Involvierung während der Wortverarbeitung konnte in mehreren Arbeiten gezeigt werden. Ein möglicher Interpretationsansatz für die selektive Involvierung der linkshemisphärischen Regionen im Rahmen der Sprachverarbeitung könnte die Lateralisierung sprachlicher Fähigkeiten sein (Démonet et al. , 1992). Die Seitendifferenz des Ergebnisses wird in einem späteren Abschnitt ausführlicher diskutiert (siehe 4.3).

Ein weiterer Aspekt, der in der Datenanalyse deskriptiv auffiel, betrifft den Unterschied der Dipolstärken auf Töne im Ton- und Sprachparadigma. In der linken Hemisphäre wurde zwar eine signifikant niedrigere N1-Antwort auf einen Ton nach „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Verben beobachtet, jedoch waren diese N1-Antworten

interessanterweise numerisch größer als jene aus dem Tonparadigma ohne Wortpräsentation, insbesondere in der linken Hemisphäre. Da der Standardton im Sprachparadigma hinsichtlich der Lautstärke als „mittellaut“ eingeordnet werden kann, würde man dementsprechend eine Aktivierung erwarten, die bezüglich der Amplitudenwerte zwischen den lauten und leisen Tönen liegt. In einer folgenden Untersuchung könnte dies in einer gemeinsamen Analyse und ggfs. in einem einzigen Paradigma untersucht werden. Hier wurden die beiden Messungen nacheinander durchgeführt. Eine Hypothese, die einen statistischen Vergleich a priori begründet hätte, lag nicht vor. Der zentrale Unterschied zwischen Ton- und Sprachparadigma stellte die jeweilige Aufgabe dar: im Tonparadigma sollten die Probanden in einem *Oddball*-Paradigma auf Töne mit abweichender Frequenz reagieren, im Sprachparadigma sollten sie Wörter lesen, semantisch beurteilen, und in der nachfolgenden Aufgabe (Perspektive oder Körperteil) per Tastendruck beantworten. Hier erfolgte die Tonstimulation ohne weitere Bedeutung für die Probanden zeitlich zwischen dem Wort und dem Aufgabenprompt für den nachfolgenden Durchgang. Die Aufgaben und die Bedeutung der Töne für die Probanden waren folglich sehr verschieden und könnten einen Unterschied der Amplituden begünstigt haben. Die insgesamt beobachtete numerisch höhere N1-Antwort auf Tonstimuli, die auf akustisch assoziierte Wörter folgen, könnte auch auf eine Sensitivierung des auditorischen Kortex durch auditorisch-assozierte Sprachverarbeitung zurückgeführt werden. Diese Annahme wäre vereinbar mit Befunden aus der Verhaltensstudie von Cao et al. (2016). Die auditorische Wahrnehmung nach visueller Präsentation akustisch assoziierter Wörter wurde hier im Vergleich zu akustisch motorisch assoziierten, sowie abstrakten Wörtern untersucht. Probanden, die gute Ergebnisse in der lexikalischen Aufgabe erzielten, wiesen eine signifikant verbesserte Performanz in der Ton-Detektierungs-Aufgabe auf, nachdem sie akustisch bezogene Wörter lasen. Die Studie von Cao et al. (2016) involvierte allerdings eine lexikalische und keine semantische Entscheidungsaufgabe. Ein alternativer Erklärungsansatz ist der folgende: In einer semantischen Gedächtnis-Studie wurde die N1-Antwort auf einen nicht aufmerksam wahrgenommenen Ton in Abhängigkeit von der Menge an einzuprägenden Informationen untersucht. Eine große Menge an Informationen ging mit einer gesteigerten N1m-Amplitude im auditorischen Kortex einher (Valtonen et al., 2003). Einer der möglichen Erklärungsansätze dafür wäre, dass relevante und irrelevante Stimuli beide einen Zugang zum Gedächtnissystem haben. Der Abruf einer Information bleibt jedoch von der Aufmerksamkeit, die einer Information geschenkt wird, abhängig

(Cowan, 2001). Es ist daher denkbar, dass die insgesamt gesteigerte evozierte Antwort auf den Ton im Sprachparadigma darauf zurückzuführen ist, dass die Versuchspersonen sich das präsentierte Verb merken mussten, um nach dem Standardton die semantische Entscheidungsaufgabe bearbeiten zu können. Diese Annahme ist mit der niedrigeren N1-Antwort im Tonexperiment vereinbar, das keine semantische Bearbeitungsaufgabe enthält. Auch eine insgesamt gesteigerte Wachsamkeit der Versuchspersonen könnte eine Rolle spielen, die letztlich auch in eine gesteigerte N1-Antwort resultiert (Näätänen und Picton, 1987).

Unsere angenommene Hypothese und die beobachtete linkslaterale signifikant niedrigere N1-Antwort nach stärkerer Involvierung des auditorischen Kortex durch „laute“ Wörter im Vergleich zu „leisen“ Wörtern scheint mit einer insgesamt stärkeren N1-Antwort auf Tonstimuli im Sprachparadigma im Widerspruch zu sein. Wir gehen hier jedoch von zwei separat zu betrachtenden Effekten aus. Eine insgesamt bilateral verstärkte N1-Antwort auf Tonstimuli nach visueller Präsentation implizit akustischer Wörter zusammen mit einer höheren Aufgabenanforderung könnte hier im Sinne einer Sensitivierung gewirkt haben. Der Repetitionseffekt mit der signifikant supprimierten N1-Antwort nach „lauten“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern nur in der linken Hemisphäre ist im Rahmen der insgesamt gesteigerten N1-Antwort als differenzierte Rekrutierung des auditorischen Kortex in einer Aufgabe mit semantischer Sprachverarbeitung bei rechtshändigen Probanden mit angenommener linkshemisphärischen Sprachdominanz zu sehen und ist ein in der Form bislang nicht beschriebener Befund.

4.2.2 Aktivierung auditorischer Quellen: „laute“ und „leise“ Wörter (Hypothese 3)

Beim zweiten zu untersuchenden Aspekt im Sprachparadigma galt es zu prüfen, ob das Lesen von Verben mit implizit unterschiedlicher Lautstärke selbst auch eine Aktivierung auditorischer Areale hervorruft, und, ob diese Aktivierung beim Lesen „lauter“ Verben im Vergleich zu „leisen“ Verben stärker ist. Mithilfe einer semantischen Entscheidungsaufgabe wurde sichergestellt, dass die Probanden die Wortstimuli aufmerksam gelesen und verstanden haben.

Operationalisiert durch ein Flächenmaß der Aktivierung trat linkshemisphärisch eine signifikant verstärkte Aktivierung beim Lesen „lauter“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern auf ($p = 0,029$) - nicht aber in der rechten Hemisphäre ($p = 0,275$). Dieser Befund bestärkt

unsere Hypothese für eine differenzierte Beteiligung des auditorischen Kortex beim Lesen von akustisch assoziierten Verben, die in unserer rechtshändigen Gruppe von Probanden linkshemipshärisch lateralisiert ist. Die Aktivierung ist abhängig von der impliziten Lautstärke der Verben und verhält sich analog zum Lautstärkeeffekt: „Laute“ Wörter riefen analog zu lauten Tönen (siehe 4.1) eine signifikant stärkere Aktivierung des auditorischen N100-Dipols hervor. Als Parameter für die Quantifizierung der Aktivität des auditorischen Kortex dienten auch hier die auditorischen Quellen, die im Tonparadigma berechnet worden sind. Die Aktivierung der auditorischen Dipole wurde mittels *Area-under-the-Curve*-Berechnung (Zhou et al., 2009, Pepe, 2003) in einem Zeitfenster von 100 bis 215 ms erfasst und konnte bei allen Probanden festgestellt werden. Die Messung der Dipolaktivierung mittels *Area-under the curve* liegt darin begründet, dass in der Auswertung der Daten bei mehreren Versuchspersonen ein doppelgipfliger Quellenverlauf vorlag, der für eine adäquate Vermessung der Gipfelamplitude/n ein inkonsistentes Muster zeigte.

Das Zeitfenster, in dem eine Dipolaktivierung registriert werden konnte, stimmt neben dem Zeitfenster für das Auftreten evozierter Antworten nach akustischen Reizen auch etwa mit der beschriebenen Latenz für semantische Wortverarbeitung in vorausgehenden Arbeiten überein. In einer magnetenzephalographischen Studie mit gesprochenen bewegungsassoziierten Wörtern wurde eine wort-spezifische semantische Aktivierung innerhalb von 250 ms nach Stimulus-Onset beobachtet (Pulvermüller, 2005a). Diese Latenz konnte auch in Arbeiten mit visueller semantischer Wortverarbeitung repliziert werden (Sahin et al., 2009, Kiefer et al., 2008, Hoenig et al., 2008, Hauk et al., 2004, Nicolai et al., 2014). Die frühe Aktivierung bis zu 250 ms nach Stimulus-Onset reflektiert die Rekrutierung auditorischer Neurone beim Zugriff auf konzeptuelles Wissen und macht eine Registrierung von postkonzeptionellen Verarbeitungsprozessen, wie gedankliche Bilder (Machery, 2007) eher unwahrscheinlich (Kiefer et al., 2008). Das beobachtete Ergebnis erbringt weitere Evidenz für die Theorie der *Grounded Cognition*, die entgegen der klassischen Sprachtheorie (Kintsch und Van Dijk, 1978, Anderson, 1983, S. 45, Caramazza und Mahon, 2003) von einer engen Verknüpfung zwischen mentalen Repräsentationen beim Sprachverständnis und dem sensomotorischen Kortex ausgehen (Barsalou, 2008). Die vorliegenden Befunde bestärken in der Zusammenschau der Ergebnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt die Annahme einer auditorischen Beteiligung beim Lesen akustisch assoziierter Wörter im Sinne einer

modalitätsspezifischen Verwurzelung von Wortbedeutungen und erweitern diese durch eine Differenzierung abhängig von der impliziten Lautstärke eines Wortes.

Die Involvierung des sensomotorischen Systems im Rahmen der semantischen Wortverarbeitung konnte bereits anhand von unterschiedlichen Untersuchungsmethoden vielfach demonstriert werden und wurde bereits im vorangehenden Kapitel 1.9.1 diskutiert. In einer MEG-Studie von Klepp et al. (2014), in der, wie in der vorliegenden Arbeit auch, eine Dipol-Analyse durchgeführt wurde, konnte eine statistisch signifikante und somatotope Aktivierung von Dipolen in motorischen Arealen beim Lesen von Bewegungsverben beobachtet werden. Meine Auswertung ist analog dazu in der akustischen Modalität ausgeführt worden und es resultierte ein vergleichbares Ergebnis. Im Zusammenhang mit der Wortverarbeitung gibt es neben der Beteiligung motorischer kortikaler Areale auch einige Hinweise auf die funktionelle Beteiligung des sensorischen Systems an der Repräsentation von konzeptuellem Wissen (siehe Binder und Desai, 2011 für ein Review). Diese Arbeiten bestärken die Verwurzelung von Wissen in Wahrnehmungen, indem sie die modalitätsspezifische Aktivierung kortikaler Hirnregionen beim Verstehen von Wörtern, die mit den entsprechenden Modalitäten assoziiert sind, aufweisen.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Beteiligung des auditorischen Systems an semantischen Wortrepräsentationen. Die Aktivierung der auditorischen Quellen in der „lauten“ und „leisen“ Wortbedingung lag bei allen Versuchspersonen mit einer Standardabweichung über dem Niveau der Prästimulus Baseline, sodass eine auditorische Beteiligung angenommen werden konnte - zumindest insofern als sie sich zwischen „lauten“ und „leisen“ Wörtern unterscheidet, denn die visuelle Stimulation unterschied sich zwischen diesen Bedingungen nicht. Laut einer fMRT Studie ruft die lebhaftere Vorstellung von Tönen ohne einen tatsächlichen akustischen Stimulus, eine Aktivierung in linkshemisphärischen sekundären auditorischen Arealen hervor (Wheeler et al., 2000). Gedankliche Bilder als Form interner Reize können sogar die Wahrnehmung externer Reize modulieren (Tian et al., 2018). Zur Ermittlung einer begleitenden auditorischen Aktivierung durch impliziten Zugriff auf auditorisch konzeptuelles Wissen haben sich Studien visuelle Stimuli zu Nutze gemacht, die mit akustischen Merkmalen assoziiert sind. So konnte beispielsweise in einer fMRT Studie bei Musikern im Vergleich zu Nicht-Musikern bei der visuellen Präsentation von Musikinstrumenten die Involvierung

rechtsseitiger auditorischer Areale (pSTG/MTG) beobachtet werden, die für die Wahrnehmung von akustischen Stimuli zuständig sind (Hoenig et al., 2011).

Im Rahmen des Sprachverständnisses liefern eine Reihe von Studien Hinweise auf die Involvierung auditorischer Areale bei der semantischen Verarbeitung von Wörtern. Die im Rahmen meiner Studie beobachtete hier unterschiedliche N100m-Quellenaktivierung beim Lesen von akustisch assoziierten Wörtern abhängig von der Lautstärke spricht für eine entscheidende Rolle des auditorischen Kortex bei der Verarbeitung akustisch assoziierter konzeptioneller Informationen. Diese Erkenntnis lässt sich mit Befunden aus vorausgehenden Arbeiten in Einklang bringen und bestärkt den Erklärungsansatz der *Grounded Cognition*. In einer wichtigen Arbeit von Kiefer et al. (2008) wird die Rolle des auditorischen Kortex bei akustisch assoziierten Verben deutlich. Unter dem Ansatz mehr als nur eine anatomisch funktionelle Übereinstimmung bei konzeptionellem und perzeptuellem Wissen zu belegen, wurden vier Merkmale für einen hinreichenden Hinweis für *Grounded Cognition* definiert und überprüft. Die Verarbeitung von konzeptionellem Wissen (1) während einer impliziten Aufgabe sollte eine (2) kortikale Hirnregion der Wahrnehmung (3) zügig und (4) selektiv aktivieren. Die Aktivierung der lokalisierten auditorischen Quellen in einem Zeitfenster von 100 – 215 ms beim Lesen von Verben, die implizite Lautstärke vermitteln, treffen auf die genannten Kriterien zu. Da die Dipole nur für die auditorische Aktivierung um 100 ms modelliert wurden, kann keine Aussage bezüglich einer Aktivierung in anderen kortikalen Hirnregionen gemacht werden, womit das Kriterium der Selektivität durch die gewählte Methode nicht mit Sicherheit bestätigt werden kann. In einer kombinierten fMRT/ERP-Studie sollten Probanden, ähnlich wie in meiner Studie, zunächst visuell präsentierte Wörter lesen, bei denen es sich um alltägliche Gegenstände mit (z.B. Telefon) oder ohne akustische Assoziation (z.B. Tisch) handelt. In einem zweiten Experiment hörten die Probanden tatsächliche Töne. Der lediglich implizite Zugriff auf konzeptionelles Wissen durch eine lexikalische Entscheidungsaufgabe soll postkonzeptionelle Prozesse wie gedankliche Bilder (z.B. Machery, 2007) minimieren. Die Studie ergab eine Aktivierung im linken posterior superior und mittleren temporalen Gyrus (pSTG/ MTG) innerhalb von 150 ms nach Wortpräsentation. Da die Region Teil des auditorischen Assoziationskortex ist, wird in der Studie eine Überlappung zwischen perzeptueller und konzeptioneller akustischer Aktivierung demonstriert. Die Ergebnisse zeigen eine Rekrutierung auditorischer Areale auch durch implizit präsentierte konzeptuelle akustische Merkmale auf. In der Aufnahme

der ERP wurden bilateral stärkere negative Potentiale in fronto-zentralen Elektroden registriert, an denen akustisch evozierte Potentiale auch typischerweise gemessen werden können (Näätänen und Näätänen, 1992). Die frühe evozierte Antwort spiegelt den Zugriff auf konzeptionelle akustische Merkmale wider und nicht den Prozess von gedanklichen Bildern, die zeitlich später auftreten (Hauk et al., 2008, Kosslyn und Goodale, 1994, Kiefer et al., 2007, Machery, 2007). Die beobachteten Latenzen konnten auch in der vorliegenden MEG-Studie beobachtet werden, sodass auch hier ein Zugriff auf konzeptionell akustische Merkmale angenommen werden kann. Andere ERP-Studien konnten ebenfalls die Assoziation zwischen der Verarbeitung akustisch bezogener Nomen (Trumpp et al., 2013b, Trumpp et al., 2014) und Verben (Popp et al., 2016) mit einer verstärkten Negativierung in frontozentralen Hirnarealen verzeichnen. In einer rezenten MEG-Studie untersuchte Röders et al. (2022) den Effekt der Verarbeitung von onomatopoetischen Verben, deren Artikulation das Geräusch der beschriebenen Handlung reproduziert (z.B. „tröpfeln“), auf den auditorischen Kortex. Im Vergleich zu nicht-onomatopoetischen Verben konnte nach onomatopoetischen Verben eine linkstemporal lokalisierte stärkere Desynchronisation im Alpha-Frequenzband gemessen werden, die allerdings nicht das Signifikanzniveau erreichte.

Studien, die bildgebende Verfahren nutzen, deckten zuvor bereits Aktivierungen in auditorischen Arealen auf, die im Zusammenhang mit der Verarbeitung akustisch bezogener Konzepte stehen. Beispielsweise wurde in einer PET-Studie von (Kellenbach et al., 2001) untersucht, ob beim Zugriff auf sensorisches Wissen zu Objekten eine korrespondierende sensorische Aktivierung in verschiedenen kortikalen Arealen erfolgt. Die Bewertung von Objekten mit akustischem Gehalt rief eine selektive Aktivierung im linken pSTG, übereinstimmend mit Kiefer et al. (2008), sowie im parietalen Kortex hervor. Die selektiv verstärkte Aktivierung in auditorischen Arealen beim Lesen und Bewerten von Nomen mit akustischer Assoziation lässt sich ebenfalls mit der in meiner Studie beobachteten N100m-Dipolaktivierung beim Lesen von Verben, die mit Lautstärke assoziiert sind, in Einklang bringen. Bei Aufgaben, die auditorisches Wissen involvieren, konnte im fMRT eine verstärkte Aktivierung des linken superior temporalen Sulcus (STS) gefunden werden. Eine linkslateralisierte Aktivierung in auditorischen kortikalen Arealen steht im Einklang mit dem beobachteten Ergebnis einer linkshemisphärischen Aktivierung beim Lesen „lauter“ versus „leiser“ Worte in dieser Studie. Der Befund von Goldberg et al. (2006) lässt auf eine Beteiligung von sekundären

sensorischen Hirnregionen beim Abruf von perzeptuellem Wissen schließen und stützt die Theorie der multimodalen Verarbeitung und kortikalen Organisation bei der Verarbeitung von semantischem Wissen (Barsalou et al., 2008). James und Gauthier (2003) untersuchten mittels fMRT die Aktivierung in individuell bestimmten Zielregionen durch Wörter, die mit akustischen oder motorischen Merkmalen verknüpft sind. Um eine Aussage über die Rekrutierung spezifischer sensorischer Hirnareale beim Abruf von konzeptionellem Wissen zu machen, sollten Probanden visuell präsentierte Figuren mit Wörtern assoziieren, die entweder akustische (z.B. singen), motorische (z.B. hüpfen) oder abstrakte Merkmale (z.B. stark) aufwiesen. Dieser verbale Lernprozess wurde der Studie vorgeschaltet, um sicherzustellen, dass Objekte mit einer spezifischen Modalität assoziiert werden. Der STG wurde in dieser Studie bevorzugt durch Figuren aktiviert, die mit auditorischen im Vergleich zu motorischen Merkmalen assoziiert worden sind. Im Gegensatz zu meiner Studie wurde jedoch eine rechtslateralisierte Aktivierung sowohl in der auditorischen als auch in der motorischen Bedingung gemessen. Der Autor erklärt dies durch die assoziierten Figuren, die vornehmlich die rechte Hemisphäre beanspruchen. Auch Kiefer et al. (2012) stellte im fMRT entgegen seiner vorausgehenden Arbeit (Kiefer et al., 2008) eine rechtslateralisierte Aktivierung im anterioren Bereich des anterioren pMTG bei akustisch bezogenen Wörtern fest. Dies könnte an dem großem Anteil musikalischer Instrumente in den verwendeten Stimuli begründet liegen, wodurch eine rechtshemisphärische Lateralisierung erklärt werden könnte (Halpern et al., 2004). In der fMRT Studie von Popp et al. (2019) wurden erweiternd zu den vorausgehenden ERP Studien der Arbeitsgruppe (Popp et al., 2016, Trumpp et al., 2013b, Trumpp et al., 2014) akustisch und motorisch assoziierte Verben auf eine Aktivierung in perzeptuellen Hirnregionen untersucht. Es wurde eine partielle Überlappung von perzeptuell aktivierten Arealen mit Regionen beobachtet, die für die Verarbeitung von konzeptuellen Informationen herangezogen werden. Der Befund entspricht eher schwächeren *Embodiment*-Konzepten (Kiefer et al., 2008) und widerspricht der Annahme starker *Embodiment*-Theorien, die postulieren, dass konzeptuelle und sensomotorische Verarbeitungsprozesse eine identische neuronale Grundlage haben (Pulvermüller et al., 2001).

Die domänenspezifische Beteiligung des sensomotorischen Kortex wird in einigen Arbeiten als unzureichend belegt postuliert, um eine kausale und notwendige Rolle in mentalen Repräsentationen und in der Sprachverarbeitung zu spielen. Es kann lediglich

von einer begleitenden Aktivierung bei amodaler Repräsentation von konzeptionellem Wissen ausgegangen werden (Mahon und Caramazza, 2009). Dem entgegen stehen einige, wenn auch wenige, Belege aus neuropsychologischen Studien mit Patienten, die an fokalen Läsionen in modalitätsspezifischen Hirnarealen leiden. Laut amodalen Theorien sollte eine solche fokale Läsion die Verarbeitung und den Abruf von konzeptionellem Wissen nicht beeinträchtigen. Gemäß des Erklärungsansatzes der *Grounded Cognition*, das domänenspezifische mentale Simulationen für die Verarbeitung von Sprache als essentiell ansieht, würde eine Läsion in modalitätsspezifischen Hirnarealen eine Beeinträchtigung hervorrufen. Klinische Studien thematisierten daher die Beeinträchtigung im Prozess der Sprachverarbeitung nach fokalen Läsionen im sensomotorischen Kortex. Bei Läsionen im oder um den motorischen Kortex war die Verarbeitung von Bewegungsverben selektiv beeinträchtigt, während Nomen unbeeinträchtigt verarbeitet werden konnten (z.B. Bak und Hodges, 2004). In auditorischen Arealen zeigten Probanden mit Läsionen im linken STG/MTG Defizite in der semantischen Zuordnung und dem Wiedererkennen von Geräuschen (Clarke et al., 2000). In einer Fallstudie von Trumpp et al. (2013a) wurden die Befunde von Clarke et al. (2000) erweitert und die Erschwernis auch bei der Verarbeitung von konzeptionell akustischen Informationen thematisiert. Hierzu wurde die semantische Wortverarbeitung mit akustischem Gehalt bei einem Patienten mit fokaler Läsion des linken posterior superioren und mittleren temporalen Gyrus untersucht. In vier Experimenten wurde geprüft, ob dieser Patient beim Prozessieren von Informationen mit akustischer Assoziation sowie in der Wahrnehmung von tatsächlichen Geräuschen alltäglicher Objekte beeinträchtigt ist. Die Studie ergab ein Defizit sowohl hinsichtlich des visuellen Sprachverständnisses als auch im Rahmen der Sprachproduktion und der Geräuscherkennung. Die Beeinträchtigung untermauert die kausale Rolle der modalitätsspezifischen mentalen Repräsentation bei der Verarbeitung von Sprache und stützt die in dieser Studie beobachtete linkslateralisierte Beteiligung des auditorischen Kortex bei der Wortverarbeitung.

Zusätzlich zur Beteiligung des auditorischen Kortex wurde eine differenzierte Aktivierung in Abhängigkeit von der impliziten Lautstärke angenommen. Eine unterschiedlich starke Involvierung des auditorischen System ließ sich auch in der Arbeit von Kiefer et al. (2008) andeuten. Sie konnten beobachten, dass die akustische Relevanz - ein anderer Parameter neben der Lautstärke - der präsentierten Nomen mit der

Aktivierung im fMRT korrelierte. Die Untersuchung des Aspekts der Lautstärke bei der Wortverarbeitung ergänzt kürzlich publizierte Ergebnisse von Niccolai et al. (2020). Niccolai et al. (2020) analysierten die Daten der vorliegenden Studie mittels frequenzbasierter Methoden. Lautstärkesensitive Areale wurden im Tonparadigma anhand einer Poweranalyse im Frequenzraum ermittelt und umfassten den STG (Brodmann Areale A22, A41/42) sowie den posterioren STS. Im Sprachparadigma zeigte sich 200 ms nach Wortbeginn eine signifikante linkstemporal verstärkte Powersuppression im 20-Hz Beta-Frequenzband beim Lesen von „lauten“ Wörtern. Diese Powersuppression wird als Indiz für eine stärkere Rekrutierung der entsprechenden Areale interpretiert. Meine Studie konnte die signifikant verstärkte Aktivierung des auditorischen Kortex beim Lesen „lauter“ Wörter mittels Quellenmodellierung der N100-Komponente des ereigniskorrelierten Feldes ebenfalls darstellen und eine begründete Annahme gemeinsamer neuronaler Repräsentationen von akustischen Reizen und visuellen Sprachreizen mit implizitem Lautstärkegehalt unterstützen. In dieser Studie nutzten wir Lautstärke als ein Attribut, welches wir variiert haben, um einen möglichen variierenden Effekt unterschiedlich implizit hoher Lautstärke im Rahmen der semantischen Sprachverarbeitung zu untersuchen. In der Literatur existieren weitere Beispiele, die einen modifizierten Einfluss auf die Verarbeitung von Sprache aufzeigten. In einer rezenten Arbeit von Sieksmeyer et al. (2021) wurde beispielsweise untersucht, ob Adverben, die ein nachgeschaltetes Bewegungsverb entweder verstärken (z.B. „stark boxen“) oder abschwächen (z.B. „zaghaft boxen“), einen Einfluss auf Reaktionszeiten bei einer darauffolgenden semantischen Entscheidungsaufgabe haben. Adverben, die das Verb verstärken, resultierten in schnelleren Antworten im Vergleich zu präsentierten abschwächenden Adverb-Verb Kombinationen. Die Ergebnisse sind somit ähnlich wie bei der variierenden Vorstellbarkeit des Bewegungsverbs (Klepp et al., 2015) und der variierenden Lautstärke eines akustisch assoziierten Verbes in der vorliegenden Arbeit, ein Hinweis darauf, dass semantische Merkmale, die mit dem zu verarbeitenden Verb zusammenhängen die Aktivierung im modalitätsspezifischen Areal modifizieren können. Eine weitere Variation, die einen Einfluss auf Simulationsprozesse beim Sprachverständnis aufwies, ist die Perspektive (Erste Person vs. Dritte Person Singular), in der das Verb präsentiert wird. In verschiedenen Hirnarealen, nicht jedoch im sensomotorischen Kortex, konnte in der Ich-Perspektive ein verstärktes ereignis-

korrelierte Feld gemessen werden, dessen Ursprung in okzipital, zentralen und linkstemporalen kortikalen Arealen liegt (Niccolai et al., 2021).

Ein weiterer Aspekt, der bei der Betrachtung der Ergebnisse aus dem Sprachparadigma nicht außer Acht gelassen werden sollte, ist die Tatsache, dass in dieser Arbeit die MEG-Daten aus dem Sprachparadigma selbst nicht analysiert wurden. Es wurden hypothesengeleitet Dipole aus dem Tonparadigma herangezogen, um die magnetische Aktivierung während der Wortaufgabe aufzuklären. Es könnte argumentiert werden, dass die Modellierung von Dipolen in der Wortaufgabe selbst diese Daten besser aufklären können. Dem würde ich nicht widersprechen, dies wäre eine weitere, eine andere Möglichkeit, die komplexen neurophysiologischen Daten auszuwerten. Die von mir gewählte, hypothesengeleitete Auswertung mit Dipolen aus dem Tonparadigma ist jedoch ebenfalls angemessen.

Zusammenfassend bestärken und ergänzen die Ergebnisse meiner Arbeit bestehende Befunde zur auditorischen Beteiligung im Rahmen der Verarbeitung akustisch assoziierter Wörter und liefern weitere Evidenz für die Verwurzelung von konzeptionellem Wissen auch in sensorischen Arealen. Beim Abruf dieses Wissens ist ein komplexes neuronales Netzwerk beteiligt. Auditorische Merkmale, wie implizite Lautstärke, die für das Verständnis von Wortbedeutungen essenziell sind, könnten bei der Wortverarbeitung in auditorischen Arealen simuliert werden und das könnte dazu führen, dass „laute“ Wörter analog zu lauten Tönen im Vergleich zu leisen Wörtern eine signifikant stärkere Aktivierung des linkshemisphärischen auditorischen Kortex hervorrufen.

4.3 Lateralisierung

Ausschließlich in linkshemisphärischen auditorischen Regionen konnte eine signifikant unterschiedlich starke Modulierung (Hypothese 2) und Aktivierung (Hypothese 3) durch das Lesen „lauter“ versus „leiser“ Verben beobachtet werden. In den entsprechenden Regionen der rechten Hemisphäre kam jeweils es zu keinem Unterschied im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Lautstärkebedingungen.

Diese Lateralisierung könnte auf die linksseitige Sprachdominanz bei Rechtshändern zurückgeführt werden (Démonet, 1992). Die Lexiko-semantische Prozessierung von Nomen zeigte im Vergleich zur phonologischen Verarbeitung von Tönen zusätzlich zu Aktivierungen in linken superioren temporalen Regionen, die das Wernicke-

Sprachzentrum umfassen, auch Aktivität im linken Gyrus temporalis medialis und inferior, sowie in inferioren parietalen und superioren präfrontalen Regionen (Démonet, 1992). Poeppel et al. (2004) untersuchten außerdem in einer PET-Studie das Lateralisationsverhalten in Abhängigkeit vom Stimulustyp. Während die Verarbeitung von Wörtern in einer lexikalischen Entscheidungsaufgabe eine verstärkte Aktivierung in linken auditorischen Arealen generierte, riefen im Vergleich dazu Töne in einer Frequenzdiskriminationsaufgabe rechtsseitig verstärkte Antworten auf. Die Lateralisierung der modalitätsspezifisch aktivierten Areale bei der Verarbeitung von konzeptuellem Wissen variiert in verschiedenen Studien. Die signifikant linkslateralisierte differenzierte Aktivierung des auditorischen Kortex bei der Verarbeitung von „lauten“ versus „leisen“ Wörtern in dieser Studie steht im Einklang mit den Ergebnissen aus Nicolai et al. (2020), die unter Verwendung einer Frequenzanalyse mit demselben Datensatz den Lautstärkeeffekt im Sprachparadigma in zuvor lokalisierten lautstärke-sensiblen Arealen untersuchte und ebenfalls linkshemisphärisch berichtet. Befunde aus bildgebenden und klinischen Studien zu konzeptioneller akustischer Prozessierung konnten ebenfalls eine vermehrt linkshemisphärische Aktivierung registrieren (Kiefer et al., 2008, Goldberg et al., 2006, Kellenbach et al., 2001, Trumpp et al., 2013b). Auch die alleinige Vorstellung von Tönen ohne einen tatsächlichen akustischen Stimulus rief in einer fMRT-Studie eine Aktivierung in linkshemisphärischen sekundären auditorischen Arealen hervor (Wheeler et al., 2000).

Die Aktivierung auditorischer Regionen im Rahmen von Geräuschen, die durch menschliche Bewegungen entstehen, wurde mit der Frage nach einem auditorischen Spiegelneuronensystem untersucht. Sowohl beim Ausüben von Bewegungen, die Geräusche produzieren (z.B. das Zerreißen von Papier), als auch das alleinige Hören dieser Geräusche, konnte eine Aktivierung in linken temporo-parieto-prämotorischen Arealen beobachtet werden (Gazzola et al., 2006, Pizzamiglio et al., 2005). Menschlich produzierte Bewegungs-laute zeigten außerdem eine effektor-spezifische verstärkte Powersuppression im Alpha-Frequenzband in der linken Hemisphäre, während Geräusche aus der Umwelt eine rechtslaterale Alpha-Suppression hervorriefen (Pineda et al., 2013, Specht und Reul, 2003). Andere Studien konnten allerdings bei akustisch assoziierter Wortverarbeitung eine Rekrutierung rechtshemisphärischer auditorischer Areale beobachten (James und Gauthier, 2003, Kiefer und Pulvermüller, 2012). Dies stimmt mit Arbeiten überein, die eine Dominanz der rechten Hemisphäre im Rahmen von

musikalischem Verständnis (Hoenig et al., 2011), sowie bei der Wahrnehmung von menschlichen (Belin et al., 2000) und tierischen Vokalisationen beobachtet (Lewis et al., 2005). Ein eindeutiges Muster für eine seitendifferente Verarbeitung akustischer Konzepte kann aus den bisherigen Befunden nicht abgeleitet werden. Sowohl der Stimulustyp (Wort vs. Nicht-Wort) als auch die Herkunft akustischer Signale und Wortstimuli scheinen jedoch einen großen Einfluss auf die hemisphärenspezifische Beteiligung auditorischer Areale zu haben. In der Literatur finden sich häufiger linkslateralisierte Befunde bei Wörtern mit akustischem Gehalt (Kiefer et al., 2008, Goldberg et al., 2006, Kellenbach et al., 2001, Trumpp et al., 2013b), während Laute je nach Herkunft unterschiedlich verteilte Aktivierungen hervorrufen.

In der Zusammenschau der Datenlage scheint die linke Hemisphäre im Zusammenhang mit dem Lautstärkeeffekt bei der Prozessierung akustisch assoziierter Bewegungsverben, ähnlich wie menschliche Bewegungslaute (Pineda et al., 2013, Specht und Reul, 2003) eine wichtige Rolle zu spielen. Die konsistente Linkslateralisierung des Lautstärkeeffekts sowohl bezüglich der N1-Suppression als Ausdruck reduzierter neuronaler Verfügbarkeit als auch im Rahmen der Wortverarbeitung selbst bestärkt die Annahme einer differenzierten, linksdominanten auditorischen Involvierung durch akustisch assoziierte Wörter.

4.4 *Grounded Cognition*

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie können mit der Theorie der *Grounded Cognition* zur Verarbeitung von Sprachkonzepten in Einklang gebracht werden. Die semantische Bedeutung von Wörtern ist vermutlich in einem multimodalen neuronalen Netzwerk gespeichert und bei der Verarbeitung der Verben werden die verschiedenen Modalitäten simuliert (Zwaan, 2004). Meine Studie beschäftigt sich ausschließlich mit der Beteiligung des auditorischen Systems bei der Verarbeitung von Wörtern mit akustischem Gehalt unterschiedlicher Lautstärke und dient der Untersuchung der lautstärkeabhängigen differenzierten Rekrutierung auditorischer Neurone.

Sowohl die modulierte auditorische Aktivierung in der zeitlich späteren Folge auf akustische Reize als auch die Beteiligung des auditorischen Kortex beim Lesen von Wörtern mit akustischem Gehalt selbst bekräftigen die Theorie der *Grounded Cognition*. Beim Verstehensprozess der akustisch assoziierten Verben werden auditorische Areale herangezogen, die auch beim Hören von Tonstimuli aktiviert werden. Die aktuelle Studie

legte ihr Augenmerk auf die differenzierte Beteiligung des auditorischen Kortex bei unterschiedlich impliziter Lautstärke. Nach der Verarbeitung „lauter“ Wörter zeigt der auditorische Kortex eine signifikant geringere Antwort auf einen Tonstimulus im Vergleich zu „leisen“ Wörtern. Dieser Befund lässt Hinweise auf eine stärkere Rekrutierung auditorischer Neurone bei der semantischen Prozessierung „lauter“ im Vergleich zu „leisen“ Verben zu. Bei der Verarbeitung von Wörtern selbst wird der auditorische Kortex durch „laute“ Verben analog zu lauten Tönen signifikant stärker aktiviert. Auch dieser Befund stimmt mit dem Erklärungsansatz der *Grounded Cognition* überein. Die signifikant unterschiedliche auditorische Involvierung bei „lauten“ und „leisen“ Verben kann auf eine Simulation der Lautstärke bei der semantischen Prozessierung der gelesenen Verben zurückgeführt werden. Die Simulierung von Modalitäten, die mit der Wortbedeutung zusammenhängen, ist eine zentrale Methode mentaler Repräsentationen (Zwaan, 2004).

Die Ergebnisse dieser Studie unterstützen folglich nicht nur die Annahme, dass Wortbedeutungen multimodal verwurzelt (Barsalou, 2008) sind und eine domänenspezifische Aktivierung bei der Verarbeitung von Wörtern eine Rolle spielen, sondern deuten speziell für das auditorische System auf eine anspruchsvollere, der Modalität entsprechenden semantischen Verarbeitung mit Blick auf die implizite Lautstärke von Wörtern hin.

4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage nach einer möglichen differenzierten Involvierung auditorischer Areale bei der Verarbeitung von Verben, die hohe oder niedrige Lautstärke implizieren. Zur Quantifizierung von Aktivität im auditorischen Kortex haben wir magnetisch evozierte Felder nach lauten und leisen Tönen abgeleitet und die N100-Komponente des ereigniskorrelierten Feldes in einer Stromdipol Analyse modelliert. Die N100m-Quellen repräsentierten dann eine mögliche auditorische Aktivierung im Sprachparadigma. In diesem haben Versuchspersonen „laute“ und „leise“ Verben visuell präsentiert bekommen und nach jedem Verb einen mittellauten Standardton gehört.

In unserer ersten Hypothese haben wir den Lautstärkeeffekt repliziert, und eine bilateral signifikant stärkere auditorische Aktivierung bei lauten im Vergleich zu leisen Tönen beobachtet. Im Sprachparadigma haben wir analog zum Repetitionseffekt eine

linkslateralisiert signifikant supprimierte auditorische Aktivierung auf einen Ton gefunden, die auf „laute“ im Vergleich zu „leisen“ Wörtern folgt. „Laute“ Verben selbst riefen im Vergleich zu „leisen“ Verben eine signifikant stärkere Aktivierung im linken auditorischen Kortex hervor.

Ich verstehe meine Ergebnisse im Einklang mit der Theorie der *Grounded Cognition*, die eine modalitätsspezifische Repräsentation von Wortbedeutungen postuliert. Anhand der aktuellen Datenlage und der vorliegenden Ergebnisse liegt es nahe, dass die Tonwahrnehmung und die Verarbeitung von Wörtern mit akustischem Gehalt auf einer in Teilen ähnlichen neuronalen Grundlage beruhen. Ich erweitere die Befunde aus vorausgehenden Arbeiten und konnte eine signifikante linkslateral differenzierte auditorische Rekrutierung durch Modulation der impliziten Lautstärke feststellen. Die gesteigerte Aktivierung des auditorischen Kortex durch implizit laute im Vergleich zu leisen Wörtern geht mit einer verstärkt supprimierten N1-Antwort zu einem Ton nach „lauten“ Wörtern einher. Das Ergebnis verhält sich analog zum Repetitionseffekt und Lautstärkeeffekt. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestärken bestehende Befunde zur auditorischen Beteiligung im Rahmen der Verarbeitung akustisch assoziierter Wörter und liefern weitere Evidenz für die Verwurzelung von konzeptuellem Wissen auch in sensorischen Arealen. Auditorische Merkmale wie implizite Lautstärke, die für das Verständnis von Wortbedeutungen essenziell sind, werden bei der Wortverarbeitung entsprechend in auditorischen Arealen simuliert. Beim Abruf von konzeptionellem Wissen nimmt somit der auditorische Kortex eine bedeutende Rolle ein.

Interessanterweise habe ich deskriptiv eine bihemisphärisch linksbetonte stärkere Antwort auf einen Tonstimulus beobachten können, wenn Versuchspersonen zuvor akustisch assoziierte Wörter lasen (Sprachparadigma) im Vergleich zu einer *Oddball*-Tonstimulation (Tonparadigma). Ich hypothesisiere, dass dies mit der semantischen Entscheidungsaufgabe bei der Bearbeitung sprachlicher Reize zu tun haben könnte, die von den Versuchspersonen erwartet wird, und auf die sich auf neuronaler Ebene durch erhöhte geforderte Aufmerksamkeit und kognitive Beanspruchung im Sinne einer Sensitivierung auf kortikaler Ebene unbewusst vorbereitet wird. Die linkslateralisierte Seitendifferenz der Ergebnisse führe ich auf die linkslokalisierte sprachliche Dominanz bei meinen rechtshändigen Probanden zurück. Die mögliche Sensitivierung des auditorischen Kortex sollte in zukünftigen Studien bezüglich ihrer Abhängigkeit von der Verarbeitung akustisch assoziierter Wörter, oder der semantischen

Aufgabenbearbeitung untersucht werden. Aufgaben mit mathematischem, figuralem oder emotionalem Gehalt könnten meiner Annahme zufolge eine rechtslateralisierte Sensitivierung kortikaler Areale mit verstärkter Reizantwort bedingen.

Weiterhin wurde in dieser Studie ein auditorisch lokalisierter Dipol um 100 ms je Hemisphäre mit Hinblick auf die N100-Komponente modelliert. In anderen Arbeiten ging die Lautstärkemodulation akustischer Stimuli mit einer gesteigerten Aktivierung in parietalen und frontalen Hirnregionen (Leske et al., 2014, Niccolai et al., 2020) sowie im primären visuellen und somatosensorischen Kortex (Wyss et al., 2014) einher. In Anbetracht dieser Befunde könnte ein Ansatzpunkt zukünftiger Studien die Modellierung von Dipolen anderer Lokalisationen oder anderer Zeitpunkte sein. Eine Beteiligung eines distributiven neuronalen Netzwerkes könnte dadurch noch eingehender erforscht werden.

5 Literaturverzeichnis

- ADLER, G. & ADLER, J. 1989. Influence of Stimulus Intensity on AEP Components in the 80- to 200-Millisecond Latency Range. *Audiology*, 28, 316-324.
- ADLER, G. & ADLER, J. 1991. Auditory stimulus processing at different stimulus intensities as reflected by auditory evoked potentials. *Biol Psychiatry*, 29, 347-56.
- AHONEN, A. I., HÄMÄLÄINEN, M. S., ILMONIEMI, R. J., KAJOLA, M. J., KNUUTILA, J. E., SIMOLA, J. T. & VILKMAN, V. A. 1993. Sampling theory for neuromagnetic detector arrays. *IEEE Trans Biomed Eng*, 40, 859-69.
- ALTMANN, C. F., DOEHRMANN, O. & KAISER, J. 2007. Selectivity for animal vocalizations in the human auditory cortex. *Cerebral Cortex*, 17, 2601-2608.
- AMUNTS, K. & ZILLES, K. 2013. Funktionelle Neuroanatomie. In: SCHNEIDER, F. & FINK, G. R. (eds.) *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ANDERSON, J. 1983. *The architecture of cognition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- AREZZO, J., PICKOFF, A. & VAUGHAN JR, H. G. 1975. The sources and intracerebral distribution of auditory evoked potentials in the alert rhesus monkey. *Brain research*, 90, 57-73.
- AZIZ-ZADEH, L., WILSON, S. M., RIZZOLATTI, G. & IACOBONI, M. 2006. Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions. *Current biology*, 16, 1818-1823.
- BAK, C., LEBECH, J. & SAERMARK, K. 1985. Dependence of the auditory evoked magnetic field (100 msec signal) of the human brain on the intensity of the stimulus. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 61, 141-149.
- BAK, T. H. & HODGES, J. R. 2004. The effects of motor neurone disease on language: further evidence. *Brain and language*, 89, 354-361.

- BALDEWEG, T. 2006. Repetition effects to sounds: evidence for predictive coding in the auditory system. *Trends in cognitive sciences*.
- BARROS-LOSCERTALES, A., GONZÁLEZ, J., PULVERMÜLLER, F., VENTURA-CAMPOS, N., BUSTAMANTE, J. C., COSTUMERO, V., PARCET, M. A. & ÁVILA, C. 2012. Reading salt activates gustatory brain regions: fMRI evidence for semantic grounding in a novel sensory modality. *Cerebral Cortex*, 22, 2554-2563.
- BARRY, R. J., COCKER, K. I., ANDERSON, J. W., GORDON, E. & RENNIE, C. 1992. Does the N100 evoked potential really habituate? Evidence from a paradigm appropriate to a clinical setting. *International Journal of Psychophysiology*, 13, 9-16.
- BARSALOU, L. W. 1999. Perceptual symbol systems. *Behavioral and brain sciences*, 22, 577-660.
- BARSALOU, L. W. 2008. Grounded cognition. *Annu. Rev. Psychol.*, 59, 617-645.
- BARSALOU, L. W., KYLE SIMMONS, W., BARBEY, A. K. & WILSON, C. D. 2003. Grounding conceptual knowledge in modality-specific systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 84-91.
- BARSALOU, L. W., SANTOS, A., SIMMONS, W. K. & WILSON, C. D. 2008. Language and simulation in conceptual processing. *Symbols, embodiment, and meaning*, 245-283.
- BELIN, P., ZATORRE, R. J., LAFAILLE, P., AHAD, P. & PIKE, B. 2000. Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature*, 403, 309-312.
- BENDIXEN, A., SANMIGUEL, I. & SCHRÖGER, E. 2012. Early electrophysiological indicators for predictive processing in audition: A review. *International Journal of Psychophysiology*, 83, 120-131.
- BESLE, J., FORT, A., DELPUECH, C. & GIARD, M. H. 2004. Bimodal speech: early suppressive visual effects in human auditory cortex. *European journal of Neuroscience*, 20, 2225-2234.
- BIERMANN-RUBEN, K., KESSLER, K., JONAS, M., SIEBNER, H. R., BÄUMER, T., MÜNCHAU, A. & SCHNITZLER, A. 2008. Right hemisphere contributions to imitation tasks. *European Journal of Neuroscience*, 27, 1843-1855.
- BINDER, J. R. & DESAI, R. H. 2011. The neurobiology of semantic memory. *Trends in cognitive sciences*, 15, 527-536.
- BINDER, J. R., FROST, J. A., HAMMEKE, T. A., COX, R. W., RAO, S. M. & PRIETO, T. 1997. Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 17, 353-362.
- BOULENGER, V., ROY, A. C., PAULIGNAN, Y., DEPREZ, V., JEANNEROD, M. & NAZIR, T. A. 2006. Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. *Journal of cognitive neuroscience*, 18, 1607-1615.
- BOURBON, W. T., WILL, K. W., GARY JR, H. E. & PAPANICOLAOU, A. C. 1987. Habituation of auditory event-related potentials: a comparison of self-initiated and automated stimulus trains. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 66, 160-166.
- BUCCINO, G., RIGGIO, L., MELLI, G., BINKOFSKI, F., GALLESE, V. & RIZZOLATTI, G. 2005. Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: a combined TMS and behavioral study. *Cognitive Brain Research*, 24, 355-363.

- BUDD, T. W., BARRY, R. J., GORDON, E., RENNIE, C. & MICHIE, P. T. 1998. Decrement of the N1 auditory event-related potential with stimulus repetition: habituation vs. refractoriness. *International Journal of Psychophysiology*, 31, 51-68.
- BUTLER, R. A. 1968. Effect of changes in stimulus frequency and intensity on habituation of the human vertex potential. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44, 945-950.
- CALVERT, G. A., BULLMORE, E. T., BRAMMER, M. J., CAMPBELL, R., WILLIAMS, S. C., MCGUIRE, P. K., WOODRUFF, P. W., IVERSEN, S. D. & DAVID, A. S. 1997. Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, 276, 593-6.
- CAO, L., KLEPP, A., SCHNITZLER, A., GROSS, J. & BIERMANN-RUBEN, K. 2016. Auditory perception modulated by word reading. *Experimental Brain Research*, 234, 3049-3057.
- CARAMAZZA, A. & MAHON, B. Z. 2003. The organization of conceptual knowledge: the evidence from category-specific semantic deficits. *Trends in cognitive sciences*, 7, 354-361.
- CATANI, M. & MESULAM, M. 2008. The arcuate fasciculus and the disconnection theme in language and aphasia: history and current state. *cortex*, 44, 953-961.
- CHAO, L. L., HAXBY, J. V. & MARTIN, A. 1999. Attribute-based neural substrates in temporal cortex for perceiving and knowing about objects. *Nature neuroscience*, 2, 913-919.
- CHAO, L. L. & MARTIN, A. 1999. Cortical regions associated with perceiving, naming, and knowing about colors. *Journal of cognitive neuroscience*, 11, 25-35.
- CLARKE, S., BELLMANN, A., MEULI, R. A., ASSAL, G. & STECK, A. J. 2000. Auditory agnosia and auditory spatial deficits following left hemispheric lesions: evidence for distinct processing pathways. *Neuropsychologia*, 38, 797-807.
- COHEN, L., KEYNES, R. & LANDOWNE, D. 1972. Changes in light scattering that accompany the action potential in squid giant axons: potential-dependent components. *The Journal of Physiology*, 224, 701.
- COWAN, N. 2001. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and brain sciences*, 24, 87-114.
- DA SILVA, F. L., HANSEN, P., KRINGELBACH, M. & SALMELIN, R. 2010. *Electrophysiological basis of MEG signals*, London, UK: Oxford Univ. Press.
- DAMASIO, A. R. 1992. Aphasia. *New England Journal of Medicine*, 326, 531-539.
- DAVIS, H., MAST, T., YOSHIE, N. & ZERLIN, S. 1966. The slow response of the human cortex to auditory stimuli: Recovery process. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 21, 105-113.
- DECETY, J. & GRÈZES, J. 2006. The power of simulation: imagining one's own and other's behavior. *Brain research*, 1079, 4-14.
- DÉMONET, J.-F., CHOLLET, F., RAMSAY, S., CARDEBAT, D., NESPOULOUS, J.-L., WISE, R., RASCOL, A. & FRACKOWIAK, R. 1992. THE ANATOMY OF PHONOLOGICAL AND SEMANTIC PROCESSING IN NORMAL SUBJECTS. *Brain*, 115, 1753-1768.
- ELBERLING, C., BAK, C., KOFOED, B., LEBECH, J. & SAERMARK, K. 1980. Magnetic auditory responses from the human brain a preliminary report. *Scandinavian Audiology*, 9, 185-190.

- ELBERLING, C., BAK, C., KOFOED, B., LEBECH, J. & SAERMARK, K. 1981. Auditory magnetic fields from the human cortex influence of stimulus intensity. *Scandinavian audiology*, 10, 203-207.
- FERNANDINO, L., CONANT, L. L., BINDER, J. R., BLINDAUER, K., HINER, B., SPANGLER, K. & DESAI, R. H. 2013. Parkinson's disease disrupts both automatic and controlled processing of action verbs. *Brain and language*, 127, 65-74.
- FODOR, J. 2001. Language, thought and compositionality. *Royal Institute of Philosophy Supplements*, 48, 227-242.
- FRUHSTORFER, H., SOVERI, P. & JÄRVILEHTO, T. 1970. Short-term habituation of the auditory evoked response in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 28, 153-161.
- GABELENTZ, G. V. D. 1891. Die Sprachwissenschaft, ihre Aufgaben, Methoden und bisherigen Ergebnisse. *T'Oung Pao*, 2, 260.
- GALABURDA, A. M., LEMAY, M., KEMPER, T. L. & GESCHWIND, N. 1978. Right-left asymmetries in the brain. *Science*, 199, 852-856.
- GAZZOLA, V., AZIZ-ZADEH, L. & KEYSERS, C. 2006. Empathy and the somatotopic auditory mirror system in humans. *Current biology*, 16, 1824-1829.
- GESCHWIND, N. 1971. Aphasia. *New England Journal of Medicine*, 284, 654-656.
- GESCHWIND, N. & LEVITSKY, W. 1968. Human brain: left-right asymmetries in temporal speech region. *Science*, 161, 186-187.
- GLENBERG, A. M. & KASCHAK, M. P. 2003. The body's contribution to language. *Psychology of learning and motivation*, 43, 93-126.
- GLENBERG, A. M. & ROBERTSON, D. A. 2000. Symbol grounding and meaning: A comparison of high-dimensional and embodied theories of meaning. *Journal of memory and language*, 43, 379-401.
- GODEY, B., SCHWARTZ, D., DE GRAAF, J. B., CHAUVEL, P. & LIÉGEOIS-CHAUVEL, C. 2001. Neuromagnetic source localization of auditory evoked fields and intracerebral evoked potentials: a comparison of data in the same patients. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1850-1859.
- GOLDBERG, R. F., PERFETTI, C. A. & SCHNEIDER, W. 2006. Perceptual knowledge retrieval activates sensory brain regions. *Journal of Neuroscience*, 26, 4917-4921.
- GONZÁLEZ, J., BARROS-LOSCERTALES, A., PULVERMÜLLER, F., MESEGUER, V., SANJUÁN, A., BELLOCH, V. & ÁVILA, C. 2006. Reading cinnamon activates olfactory brain regions. *Neuroimage*, 32, 906-912.
- HACKETT, T. A. & KAAS, J. H. 2004. Auditory Cortex in Primates: Functional Subdivisions and Processing Streams.
- HAENSCHEL, C., VERNON, D. J., DWIVEDI, P., GRUZELIER, J. H. & BALDEWEG, T. 2005. Event-related brain potential correlates of human auditory sensory memory-trace formation. *Journal of Neuroscience*, 25, 10494-10501.
- HALPERN, A. R., ZATORRE, R. J., BOUFFARD, M. & JOHNSON, J. A. 2004. Behavioral and neural correlates of perceived and imagined musical timbre. *Neuropsychologia*, 42, 1281-1292.
- HÄMÄLÄINEN, M., HARI, R., ILMONIEMI, R. J., KNUUTILA, J. & LOUNASMAA, O. V. 1993. Magnetoencephalography—theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of modern Physics*, 65, 413.

- HÄNSEL, F., BAUMGÄRTNER, S. D., KORNMANN, J. M. & ENNIGKEIT, F. 2016. Kognition. *Sportpsychologie*. Springer.
- HARI, R. 1991. On brain's magnetic responses to sensory stimuli. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 8, 157-169.
- HARI, R., AITTONIEMI, K., JÄRVINEN, M.-L., KATILA, T. & VARPULA, T. 1980. Auditory evoked transient and sustained magnetic fields of the human brain localization of neural generators. *Experimental Brain Research*, 40, 237-240.
- HARI, R., ILMONIEMI, R. & WILLIAMSON, J. 1986. Cerebral magnetic fields. *CRC Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 14, 93-126.
- HARI, R., KAILA, K., KATILA, T., TUOMISTO, T. & VARPULA, T. 1982. Interstimulus interval dependence of the auditory vertex response and its magnetic counterpart: Implications for their neural generation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 54, 561-569.
- HART, H. C., PALMER, A. R. & HALL, D. A. 2002. Heschl's gyrus is more sensitive to tone level than non-primary auditory cortex. *Hearing research*, 171, 177-190.
- HAUK, O., DAVIS, M. H., KHERIF, F. & PULVERMÜLLER, F. 2008. Imagery or meaning? Evidence for a semantic origin of category-specific brain activity in metabolic imaging. *European Journal of Neuroscience*, 27, 1856-1866.
- HAUK, O., JOHNSRUDE, I. & PULVERMÜLLER, F. 2004. Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41, 301-307.
- HAVAS, D. A., GLENBERG, A. M. & RINCK, M. 2007. Emotion simulation during language comprehension. *Psychonomic bulletin & review*, 14, 436-441.
- HAYES, T. L. & LEWIS, D. A. 1993. Hemispheric differences in layer III pyramidal neurons of the anterior language area. *Archives of neurology*, 50, 501-505.
- HEBB, D. 1949. *The organization of behavior*. New York: Wiley.
- HEGERL, U., GALLINAT, J. & MROWINSKI, D. 1994. Intensity dependence of auditory evoked dipole source activity. *International Journal of Psychophysiology*, 17, 1-13.
- HELBIG, H. B., GRAF, M. & KIEFER, M. 2006. The role of action representations in visual object recognition. *Experimental Brain Research*, 174, 221-228.
- HERRMANN, B., HENRY, M. J., JOHNSRUDE, I. S. & OBLESER, J. 2016. Altered temporal dynamics of neural adaptation in the aging human auditory cortex. *Neurobiology of Aging*, 45, 10-22.
- HERRMANN, B., SCHLICHTING, N. & OBLESER, J. 2014. Dynamic Range Adaptation to Spectral Stimulus Statistics in Human Auditory Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 34, 327-331.
- HILLIS, A. E., KLEINMAN, J. T., NEWHART, M., HEIDLER-GARY, J., GOTTESMAN, R., BARKER, P. B., ALDRICH, E., LLINAS, R., WITYK, R. & CHAUDHRY, P. 2006. Restoring cerebral blood flow reveals neural regions critical for naming. *Journal of Neuroscience*, 26, 8069-8073.
- HILLIS, A. E., WITYK, R. J., TUFFIASH, E., BEAUCHAMP, N. J., JACOBS, M. A., BARKER, P. B. & SELNES, O. A. 2001. Hypoperfusion of Wernicke's area predicts severity of semantic deficit in acute stroke. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, 50, 561-566.
- HILLYARD, S. A., HINK, R. F., SCHWENT, V. L. & PICTON, T. W. 1973. Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*, 182, 177-180.

- HINRICHS, H. 2012. Magnetenzephalographie (MEG). *Klinische Elektroenzephalographie*. Springer.
- HOENIG, K., MÜLLER, C., HERRNBERGER, B., SIM, E.-J., SPITZER, M., EHRET, G. & KIEFER, M. 2011. Neuroplasticity of semantic representations for musical instruments in professional musicians. *NeuroImage*, 56, 1714-1725.
- HOENIG, K., SIM, E.-J., BOCHEV, V., HERRNBERGER, B. & KIEFER, M. 2008. Conceptual flexibility in the human brain: dynamic recruitment of semantic maps from visual, motor, and motion-related areas. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 1799-1814.
- HSU, Y.-F., HÄMÄLÄINEN, J. A. & WASZAK, F. 2016. The auditory N1 suppression rebounds as prediction persists over time. *Neuropsychologia*, 84, 198-204.
- JÄÄSKELÄINEN, I. P., KAURAMÄKI, J., TUJUNEN, J. & SAMS, M. 2008. Formant transition-specific adaptation by lipreading of left auditory cortex N1m. *Neuroreport*, 19, 93-7.
- JÄÄSKELÄINEN, I. P., OJANEN, V., AHVENINEN, J., AURANEN, T., LEVÄNEN, S., MÖTTÖNEN, R., TARNANEN, I. & SAMS, M. 2004. Adaptation of neuromagnetic N1 responses to phonetic stimuli by visual speech in humans. *Neuroreport*, 15, 2741-4.
- JAMES, T. W. & GAUTHIER, I. 2003. Auditory and action semantic features activate sensory-specific perceptual brain regions. *Current Biology*, 13, 1792-1796.
- JÄNCKE, L., SHAH, N., POSSE, S., GROSSE-RYUKEN, M. & MÜLLER-GÄRTNER, H.-W. 1998. Intensity coding of auditory stimuli: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 36, 875-883.
- JAVITT, D. C., JAYACHANDRA, M., LINDSLEY, R. W., SPECHT, C. M. & SCHROEDER, C. E. 2000. Schizophrenia-like deficits in auditory P1 and N1 refractoriness induced by the psychomimetic agent phencyclidine (PCP). *Clinical Neurophysiology*, 111, 833-836.
- JESSEN, M., BLOMBERG, J. & ROCHE, J. 2018. *Kognitive Linguistik*, Narr Francke Attempto Verlag.
- JIRAK, D., MENZ, M. M., BUCCINO, G., BORGHI, A. M. & BINKOFSKI, F. 2010. Grasping language—a short story on embodiment. *Consciousness and cognition*, 19, 711-720.
- JOHANSSON, S. 2005. *Origins of language: Constraints on hypotheses*, John Benjamins Publishing.
- JOSEPHSON, B. 1962. Possible new effect in superconducting tunneling. *Phys. Lett.*, 1, 251-253.
- KAAS, J. H. 2013. The evolution of brains from early mammals to humans. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*, 4, 33-45.
- KAUP, B. 2017. Die Beziehung zwischen sprachlicher und nicht-sprachlicher Kognition. *Psychologische Rundschau*.
- KAURAMÄKI, J., JÄÄSKELÄINEN, I. P., HARI, R., MÖTTÖNEN, R., RAUSCHECKER, J. P. & SAMS, M. 2010. Lipreading and covert speech production similarly modulate human auditory-cortex responses to pure tones. *J Neurosci*, 30, 1314-21.
- KELLENBACH, M. L., BRETT, M. & PATTERSON, K. 2001. Large, colorful, or noisy? Attribute-and modality-specific activations during retrieval of perceptual attribute knowledge. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 1, 207-221.

- KIEFER, M. 2001. Perceptual and semantic sources of category-specific effects: Event-related potentials during picture and word categorization. *Memory & Cognition*, 29, 100-116.
- KIEFER, M. 2005. Repetition-priming modulates category-related effects on event-related potentials: further evidence for multiple cortical semantic systems. *Journal of cognitive neuroscience*, 17, 199-211.
- KIEFER, M. & BARSALOU, L. W. 2013. 15 grounding the human conceptual system in perception, action, and internal states. *Action science: Foundations of an emerging discipline*, 381-401.
- KIEFER, M. & PULVERMÜLLER, F. 2012. Conceptual representations in mind and brain: theoretical developments, current evidence and future directions. *cortex*, 48, 805-825.
- KIEFER, M., SIM, E.-J., HERRNBERGER, B., GROTHE, J. & HOENIG, K. 2008. The sound of concepts: four markers for a link between auditory and conceptual brain systems. *Journal of Neuroscience*, 28, 12224-12230.
- KIEFER, M., SIM, E.-J., LIEBICH, S., HAUKE, O. & TANAKA, J. 2007. Experience-dependent plasticity of conceptual representations in human sensory-motor areas. *Journal of cognitive neuroscience*, 19, 525-542.
- KIEFER, M., TRUMPP, N., HERRNBERGER, B., SIM, E.-J., HOENIG, K. & PULVERMÜLLER, F. 2012. Dissociating the representation of action- and sound-related concepts in middle temporal cortex. *Brain and Language*, 122, 120-125.
- KINTSCH, W. & VAN DIJK, T. A. 1978. Toward a model of text comprehension and production. *Psychological review*, 85.
- KLEPP, A., NICCOLAI, V., BUCCINO, G., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2015. Language-motor interference reflected in MEG beta oscillations. *Neuroimage*, 109, 438-48.
- KLEPP, A., NICCOLAI, V., SIEKSMAYER, J., ARNZEN, S., INDEFREY, P., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2017. Body-part specific interactions of action verb processing with motor behaviour. *Behavioural brain research*, 328, 149-158.
- KLEPP, A., VAN DIJK, H., NICCOLAI, V., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2019. Action verb processing specifically modulates motor behaviour and sensorimotor neuronal oscillations. *Sci Rep*, 9, 15985.
- KLEPP, A., WEISSLER, H., NICCOLAI, V., TERHALLE, A., GEISLER, H., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2014. Neuromagnetic hand and foot motor sources recruited during action verb processing. *Brain and Language*, 128, 41-52.
- KLINKE, R., PAPE, H.-C. & SILBERNAGL, S. 2005. *Physiologie*, Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
- KNECHT, S., DRÄGER, B., DEPPE, M., BOBE, L., LOHMANN, H., FLÖEL, A., RINGELSTEIN, E.-B. & HENNINGSSEN, H. 2000. Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, 123, 2512-2518.
- KNIGHT, R. T., SCABINI, D., WOODS, D. L. & CLAYWORTH, C. 1988. The effects of lesions of superior temporal gyrus and inferior parietal lobe on temporal and vertex components of the human AEP. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 70, 499-509.
- KOSSLYN, S. M. & GOODALE, M. A. 1994. *Image and brain: The resolution of the imagery debate*, MIT press Cambridge, MA.

- KREISLER, A., GODEFROY, O., DELMAIRE, C., DEBACHY, B., LECLERCQ, M., PRUVO, J.-P. & LEYS, D. 2000. The anatomy of aphasia revisited. *Neurology*, 54, 1117-1123.
- KUJALA, J., VARTIAINEN, J., LAAKSONEN, H. & SALMELIN, R. 2012. Neural interactions at the core of phonological and semantic priming of written words. *Cerebral Cortex*, 22, 2305-2312.
- LAKOFF, G. & JOHNSON, M. 1980. Conceptual Metaphor in Everyday Language. *The Journal of Philosophy*, 77, 453-486.
- LESKE, S., TSE, A., OOSTERHOF, N. N., HARTMANN, T., MÜLLER, N., KEIL, J. & WEISZ, N. 2014. The strength of alpha and beta oscillations parametrically scale with the strength of an illusory auditory percept. *Neuroimage*, 88, 69-78.
- LEVELT, W. J., ROELOFS, A. & MEYER, A. S. 1999. A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and brain sciences*, 22, 1-38.
- LEWIS, J. W., BREFCZYNSKI, J. A., PHINNEY, R. E., JANIK, J. J. & DEYOE, E. A. 2005. Distinct cortical pathways for processing tool versus animal sounds. *Journal of Neuroscience*, 25, 5148-5158.
- MACHERY, E. 2007. Concept empiricism: A methodological critique. *Cognition*, 104, 19-46.
- MADHERO88. 2009. *Organ of Corti* [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Organ_of_corti.svg [Accessed].
- MAHON, B. Z. & CARAMAZZA, A. 2009. Concepts and categories: a cognitive neuropsychological perspective. *Annual review of psychology*, 60, 27-51.
- MARTIN, A. & CHAO, L. L. 2001. Semantic memory and the brain: structure and processes. *Current opinion in neurobiology*, 11, 194-201.
- METEYARD, L., CUADRADO, S. R., BAHRAMI, B. & VIGLIOCCO, G. 2012. Coming of age: A review of embodiment and the neuroscience of semantics. *Cortex*, 48, 788-804.
- MEYER, M. 2008. Functions of the left and right posterior temporal lobes during segmental and suprasegmental speech perception. *Zeitschrift für Neuropsychologie*, 19, 101-115.
- MEYER, M., ELMER, S. & JÄNCKE, L. 2012. Musical expertise induces neuroplasticity of the planum temporale. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252, 116-123.
- MEYER, M., PROF. DR. 2013. Auditorisches System. In: SCHNEIDER, P. D. D. F. & FINK, P. D. G. R. (eds.) *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*. Berlin Heidelberg Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- MILLIGAN, G. W. & COOPER, M. C. 1988. A study of standardization of variables in cluster analysis. *Journal of classification*, 5, 181-204.
- MIRABELLA, G., IACONELLI, S., SPADACENTA, S., FEDERICO, P. & GALLESE, V. 2012. Processing of hand-related verbs specifically affects the planning and execution of arm reaching movements. *PLoS One*, 7, e35403.
- MULERT, C., JÄGER, L., PROPP, S., KARCH, S., STÖRMANN, S., POGARELL, O., MÖLLER, H.-J., JUCKEL, G. & HEGERL, U. 2005. Sound level dependence of the primary auditory cortex: Simultaneous measurement with 61-channel EEG and fMRI. *NeuroImage*, 28, 49-58.
- NAATANEN, R. & NÄÄTÄNEN, R. 1992. *Attention and brain function*, Psychology Press.

- 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*, 24, 375-425.
- NÄÄTÄNEN, R., SAMS, M., ALHO, K., PAAVILAINEN, P., REINIKAINEN, K. & SOKOLOV, E. N. 1988. Frequency and location specificity of the human vertex N1 wave. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 69, 523-531.
- NEUKIRCH, M., HEGERL, U., KÖTITZ, R., DORN, H., GALLINAT, U. & HERRMANN, W. 2002. Comparison of the amplitude/intensity function of the auditory evoked N1m and N1 components. *Neuropsychobiology*, 45, 41-48.
- NICCOLAI, V., KLEPP, A., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2021. Neurophysiological mechanisms of perspective-taking: An MEG investigation of agency. *Social Neuroscience*, 16, 584-593.
- NICCOLAI, V., KLEPP, A., VAN DIJK, H., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2020. Auditory cortex sensitivity to the loudness attribute of verbs. *Brain and language*, 202, 104726.
- NICCOLAI, V., KLEPP, A., WEISSLER, H., HOOGENBOOM, N., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2014. Grasping hand verbs: oscillatory beta and alpha correlates of action-word processing. *PloS one*, 9, e108059.
- OLDFIELD, R. C. 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- PANTEV, C., HOKE, M., LEHNERTZ, K., LÜTKENHÖNER, B., FAHRENDORF, G. & STÖBER, U. 1990. Identification of sources of brain neuronal activity with high spatiotemporal resolution through combination of neuromagnetic source localization (NMSL) and magnetic resonance imaging (MRI). *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 75, 173-184.
- PANTEV, C., HOKE, M., LÜTKENHÖNER, B., LEHNERTZ, K. & SPITTKA, J. 1986. Causes of Differences in the Input-Output Characteristics of Simultaneously Recorded Auditory Evoked Magnetic Fields and Potentials: Causes de différences dans les caractéristiques d'entrée-sortie des champs magnétiques évoqués et des potentiels évoqués auditifs enregistrés simultanément. *Audiology*, 25, 263-276.
- PARKKONEN, L. 2010. Instrumentation and data preprocessing. *MEG: An introduction to methods*, 29-69.
- PARKKONEN, L. 2010. Instrumentation and data preprocessing. *MEG: An introduction to methods*, p. 29 Fig. 2-2, Order License ID 1326728-1.
- PEKKOLA, J., OJANEN, V., AUTTI, T., JÄÄSKELÄINEN, I. P., MÖTTÖNEN, R., TARKIAINEN, A. & SAMS, M. 2005. Primary auditory cortex activation by visual speech: an fMRI study at 3 T. *Neuroreport*, 16, 125-128.
- PEPE, M. S. 2003. *The statistical evaluation of medical tests for classification and prediction*, Medicine.
- PEREIRA, D. R., CARDOSO, S., FERREIRA-SANTOS, F., FERNANDES, C., CUNHA-REIS, C., PAIVA, T. O., ALMEIDA, P. R., SILVEIRA, C., BARBOSA, F. & MARQUES-TEIXEIRA, J. 2014. Effects of inter-stimulus interval (ISI) duration on the N1 and P2 components of the auditory event-related potential. *International Journal of Psychophysiology*, 94, 311-318.
- PICKLES, J. 2012. *An Introduction to the Physiology of Hearing*. Bradford. United Kingdom: Emerald Group Publishing Ltd.

- PINEDA, J. A., GRICHANIK, M., WILLIAMS, V., TRIEU, M., CHANG, H. & KEYSERS, C. 2013. EEG sensorimotor correlates of translating sounds into actions. *Frontiers in neuroscience*, 7, 203.
- PINEDA, J. A., HOLMES, T. & FOOTE, S. 1991. Intensity-amplitude relationships in monkey event-related potentials: parallels to human augmenting-reducing responses. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 78, 456-465.
- PIZZAMIGLIO, L., APRILE, T., SPITONI, G., PITZALIS, S., BATES, E., D'AMICO, S. & DI RUSSO, F. 2005. Separate neural systems for processing action-or non-action-related sounds. *Neuroimage*, 24, 852-861.
- POEPEL, D. 2003. The analysis of speech in different temporal integration windows: cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'. *Speech communication*, 41, 245-255.
- POEPEL, D., GUILLEMIN, A., THOMPSON, J., FRITZ, J., BAVELIER, D. & BRAUN, A. R. 2004. Auditory lexical decision, categorical perception, and FM direction discrimination differentially engage left and right auditory cortex. *Neuropsychologia*, 42, 183-200.
- POPP, M., TRUMPP, N. M. & KIEFER, M. 2016. Feature-Specific Event-Related Potential Effects to Action- and Sound-Related Verbs during Visual Word Recognition. *Front Hum Neurosci*, 10, 637.
- POPP, M., TRUMPP, N. M., SIM, E. J. & KIEFER, M. 2019. Brain Activation During Conceptual Processing of Action and Sound Verbs. *Adv Cogn Psychol*, 15, 236-255.
- PULVERMÜLLER, F. 1999. Words in the brain s language. *Behavioral and brain sciences*, 22, 253-279.
- PULVERMÜLLER, F. 1999. Words in the brain s language. *Behavioral and brain sciences*, 22, p. 258, Fig.2 Lateral view of the left hemisphere, Order License ID 1326740-1.
- PULVERMÜLLER, F. 2005. Brain mechanisms linking language and action. *Nature reviews neuroscience*, 6, 576-582.
- PULVERMÜLLER, F., HÄRLE, M. & HUMMEL, F. 2001. Walking or talking?: Behavioral and neurophysiological correlates of action verb processing. *Brain and language*, 78, 143-168.
- PULVERMÜLLER, F., HAUKE, O., NIKULIN, V. V. & ILMONIEMI, R. J. 2005. Functional links between motor and language systems. *European Journal of Neuroscience*, 21, 793-797.
- RADEMACHER, J., MOROSAN, P., SCHORMANN, T., SCHLEICHER, A., WERNER, C., FREUND, H.-J. & ZILLES, K. 2001. Probabilistic mapping and volume measurement of human primary auditory cortex. *Neuroimage*, 13, 669-683.
- RASMUSSEN, T. & MILNER, B. 1977. The role of early left-brain injury in determining lateralization of cerebral speech functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 299, 355-369.
- REITE, M., ZIMMERMAN, J. T., EDRICH, J. & ZIMMERMAN, J. E. 1982. Auditory evoked magnetic fields: response amplitude vs. stimulus intensity. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 54, 147-152.
- RITTER, W., VAUGHAN, H. G. & COSTA, L. D. 1968. Orienting and habituation to auditory stimuli: A study of short terms changes in average evoked responses. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 25, 550-556.

- RÖDERS, D., KLEPP, A., SCHNITZLER, A., BIERMANN-RUBEN, K. & NICCOLAI, V. 2022. Induced and Evoked Brain Activation Related to the Processing of Onomatopoeic Verbs. *Brain Sciences*, 12, 481.
- ROGERS, R. L., PAPANICOLAOU, A. C., BAUMANN, S. B., SAYDJARI, C. & EISENBERG, H. M. 1990. Neuromagnetic evidence of a dynamic excitation pattern generating the N100 auditory response. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 77, 237-240.
- ROSBURG, T. & MAGER, R. 2021. The reduced auditory evoked potential component N1 after repeated stimulation: Refractoriness hypothesis vs. habituation account. *Hearing Research*, 400, 108140.
- ROSBURG, T. & SÖRÖS, P. 2016. The response decrease of auditory evoked potentials by repeated stimulation—Is there evidence for an interplay between habituation and sensitization? *Clinical Neurophysiology*, 127, 397-408.
- ROSBURG, T., ZIMMERER, K. & HUONKER, R. 2010. Short-term habituation of auditory evoked potential and neuromagnetic field components in dependence of the interstimulus interval. *Experimental brain research*, 205, 559-570.
- RUUSUVIRTA, T. 2021. The release from refractoriness hypothesis of N1 of event-related potentials needs reassessment. *Hearing Research*, 399, 107923.
- SAHIN, N. T., PINKER, S., CASH, S. S., SCHOMER, D. & HALGREN, E. 2009. Sequential processing of lexical, grammatical, and phonological information within Broca's area. *Science*, 326, 445-449.
- SALMELIN, R. & HELENIUS, P. 2000. Neurophysiology of fluent and impaired reading: a magnetoencephalographic approach. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 17, 163-174.
- SAMS, M., AULANKO, R., HÄMÄLÄINEN, M., HARI, R., LOUNASMAA, O. V., LU, S. T. & SIMOLA, J. 1991. Seeing speech: visual information from lip movements modifies activity in the human auditory cortex. *Neurosci Lett*, 127, 141-5.
- SCHACTER, D. L., WIG, G. S. & STEVENS, W. D. 2007. Reductions in cortical activity during priming. *Current opinion in neurobiology*, 17, 171-176.
- SCHERG, M., VAJSAR, J. & PICTON, T. W. 1989. A source analysis of the late human auditory evoked potentials. *Journal of cognitive neuroscience*, 1, 336-355.
- SCHERG, M. & VON CRAMON, D. 1985. Two bilateral sources of the late AEP as identified by a spatio-temporal dipole model. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 62, 32-44.
- SCHERG, M. & VON CRAMON, D. 1986. Evoked dipole source potentials of the human auditory cortex. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 65, 344-360.
- SCHERG, M. & VON CRAMON, D. 1990. Dipole source potentials of the auditory cortex in normal subjects and in patients with temporal lobe lesions. *Advances in audiology*, 6, 165-193.
- SCHMIDT, R. F., LANG, F. & HECKMANN, M. 2011. *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*, Springer-Verlag.
- SCHÜNKE, M. S., ERIK; SCHUMACHER, UDO 2009. Prometheus Kopf, Hals und Neuroanatomie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- SHTYROV, Y., BUTORINA, A., NIKOLAEVA, A. & STROGANOVA, T. 2014. Automatic ultrarapid activation and inhibition of cortical motor systems in spoken

- word comprehension. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, E1918-E1923.
- SIEKSMEYER, J., KLEPP, A., NICCOLAI, V., METZLAFF, J., SCHNITZLER, A. & BIERMANN-RUBEN, K. 2021. Influence of Manner Adverbs on Action Verb Processing. *Concepts, Frames and Cascades in Semantics, Cognition and Ontology*. Springer, Cham.
- SIMMONS, W. K., MARTIN, A. & BARSALOU, L. W. 2005. Pictures of appetizing foods activate gustatory cortices for taste and reward. *Cerebral Cortex*, 15, 1602-1608.
- SPECHT, K. & REUL, J. 2003. Functional segregation of the temporal lobes into highly differentiated subsystems for auditory perception: an auditory rapid event-related fMRI-task. *Neuroimage*, 20, 1944-1954.
- STEINMETZ, H., RADEMACHER, J., JÄNCKE, L., HUANG, Y., THRON, A. & ZILLES, K. 1990. Total surface of temporoparietal intrasylvian cortex: diverging left-right asymmetries. *Brain and language*, 39, 357-372.
- SWEET, R. A., DORPH-PETERSEN, K. A. & LEWIS, D. A. 2005. Mapping auditory core, lateral belt, and parabelt cortices in the human superior temporal gyrus. *Journal of Comparative Neurology*, 491, 270-289.
- TALAIRACH, J. & TOURNOUX, P. 1988. Co-planar stereotactic atlas of the human brain: 3-dimensional proportional system: an approach to cerebral imaging. 1988. Stuttgart: Thieme.
- TEICHERT, T., GURNSEY, K., SALISBURY, D. & SWEET, R. A. 2016. Contextual processing in unpredictable auditory environments: the limited resource model of auditory refractoriness in the rhesus. *Journal of Neurophysiology*, 116, 2125-2139.
- THOMPSON, R. F. 2009. Habituation: a history. *Neurobiology of learning and memory*, 92, 127.
- THOMPSON, R. F. & SPENCER, W. A. 1966. Habituation: a model phenomenon for the study of neuronal substrates of behavior. *Psychological review*, 73, 16.
- TIAN, X., DING, N., TENG, X., BAI, F. & POEPEL, D. 2018. Imagined speech influences perceived loudness of sound. *Nature Human Behaviour*, 2, 225-234.
- TRUMPP, N. M., KLIESE, D., HOENIG, K., HAARMEIER, T. & KIEFER, M. 2013a. Losing the sound of concepts: Damage to auditory association cortex impairs the processing of sound-related concepts. *Cortex*, 49, 474-486.
- TRUMPP, N. M., TRAUB, F. & KIEFER, M. 2013b. Masked priming of conceptual features reveals differential brain activation during unconscious access to conceptual action and sound information. *PLoS One*, 8, e65910.
- TRUMPP, N. M., TRAUB, F., PULVERMÜLLER, F. & KIEFER, M. 2014. Unconscious automatic brain activation of acoustic and action-related conceptual features during masked repetition priming. *Journal of cognitive neuroscience*, 26, 352-364.
- VALTONEN, J., MAY, P., MÄKINEN, V. & TIITINEN, H. 2003. Visual short-term memory load affects sensory processing of irrelevant sounds in human auditory cortex. *Brain Res Cogn Brain Res*, 17, 358-67.
- VAN CASTEREN, M. & DAVIS, M. H. 2007. Match: A program to assist in matching the conditions of factorial experiments. *Behavior Research Methods*, 39, 973-978.

- VAN WASSENHOVE, V., GRANT, K. W. & POEPPPEL, D. 2005. Visual speech speeds up the neural processing of auditory speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 1181-1186.
- VARTIAINEN, J., LILJESTRÖM, M., KOSKINEN, M., RENVALL, H. & SALMELIN, R. 2011. Functional magnetic resonance imaging blood oxygenation level-dependent signal and magnetoencephalography evoked responses yield different neural functionality in reading. *J Neurosci*, 31, 1048-58.
- VASAMA, J.-P., MÄKELÄ, J. P., TISSARI, S. O. & HÄMÄLÄINEN, M. S. 1995. Effects of intensity variation on human auditory evoked magnetic fields. *Acta otolaryngologica*, 115, 616-621.
- VAUGHAN, H. G. & RITTER, W. 1970. The sources of auditory evoked responses recorded from the human scalp. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 28, 360-367.
- WARREN, J. E., CRINION, J. T., LAMBON RALPH, M. A. & WISE, R. J. 2009. Anterior temporal lobe connectivity correlates with functional outcome after aphasic stroke. *Brain*, 132, 3428-3442.
- WARRINGTON, E. K. & MCCARTHY, R. A. 1987. Categories of knowledge: Further fractionations and an attempted integration. *Brain*, 110, 1273-1296.
- WARRINGTON, E. K. & SHALLICE, T. 1984. Category specific semantic impairments. *Brain*, 107, 829-853.
- WHEELER, M. E., PETERSEN, S. E. & BUCKNER, R. L. 2000. Memory's echo: vivid remembering reactivates sensory-specific cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 11125-11129.
- WILDGEN, W. 2012. *Kognitive Grammatik*, de Gruyter.
- WOODS, B. 1983. Is the left hemisphere specialized for language at birth? *Trends in Neurosciences*, 6, 115-117.
- WOODS, D. L., CLAYWORTH, C., KNIGHT, R. T., SIMPSON, G. & NAESER, M. 1987. Generators of middle-and long-latency auditory evoked potentials: implications from studies of patients with bitemporal lesions. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 68, 132-148.
- WOODS, D. L. & ELMASIAN, R. 1986. The habituation of event-related potentials to speech sounds and tones. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 65, 447-459.
- WYSS, C., BOERS, F., KAWOHL, W., ARRUBLA, J., VAHEDIPOUR, K., DAMMERS, J., NEUNER, I. & SHAH, N. J. 2014. Spatiotemporal properties of auditory intensity processing in multisensor MEG. *Neuroimage*, 102, 465-473.
- YAGCIOGLU, S. & UNGAN, P. 2008. Refractoriness, habituation, and mismatch effects in the auditory event-related potential to alternating stimuli. *Neuroreport*, 19, 49-53.
- YEH, W. & BARSALOU, L. W. 2006. The situated nature of concepts. *The American journal of psychology*, 349-384.
- YUE, J., ALTER, K., HOWARD, D. & BASTIAANSE, R. 2017. Early access to lexical-level phonological representations of Mandarin word-forms: evidence from auditory N1 habituation. *Language, Cognition and Neuroscience*, 32, 1148-1163.
- ZAIDEL, E. 1998. Language in the right hemisphere following callosal disconnection. *Handbook of neurolinguistics*. Elsevier.

- ZATORRE, R. J. & BELIN, P. 2001. Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral cortex*, 11, 946-953.
- ZATORRE, R. J., EVANS, A. C., MEYER, E. & GJEDDE, A. 1992. Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256, 846-849.
- ZENNER, H.-P. 2011. Die Kommunikation des Menschen: Hören und Sprechen. In: SCHMIDT, R. F., LANG, F. & HECKMANN, M. (eds.) *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie* Springer-Verlag.
- ZHOU, X.-H., MCCLISH, D. K. & OBUCHOWSKI, N. A. 2009. *Statistical methods in diagnostic medicine*, John Wiley & Sons.
- ZWAAN, R. A. 2001. Situation Model: Psychological. In: SMELSER, N. J. & BALTES, P. B. (eds.) *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Oxford: Pergamon.
- ZWAAN, R. A. 2004. The immersed experiencer: Toward an embodied theory of language comprehension. *Psychology of learning and motivation*, 44, 35-62.
- ZWAAN, R. A. & MADDEN, C. J. 2005. Embodied sentence comprehension. *Grounding cognition: The role of perception and action in memory, language, and thinking*, 22.

6 Anhang

Anhang A Wortstimuli

Wort "laut"	Mittelwert(Lautstärke)	Varianz	Wort "leise"	Mittelwert(Lautstärke)	Varianz
schimpfen	4,63	0,24	schlucken	2,5	0,47
stöhnen	3,83	0,35	grinsen	1,37	0,31
husten	4,27	0,27	tasten	1,73	0,41
klopfen	3,97	0,38	knüpfen	2,07	0,89
flöten	4,13	0,4	zucken	1,53	0,46
brüllen	4,9	0,16	flicken	1,9	0,71
läuten	4,4	0,25	fassen	1,73	0,75
schnaufen	3,5	0,33	schmollen	1,6	0,66
reden	3,93	0,41	legen	1,67	0,51
klatschen	4,37	0,31	schnüren	1,87	0,26
johlen	4,57	0,46	zwicken	1,63	0,79
bohren	4,83	0,14	biegen	1,83	0,83
stampfen	4,07	0,55	flechten	1,9	0,85
kehren	3,33	0,78	formen	1,67	0,78
plaudern	4	0,28	lächeln	1,37	0,45
knackern	3,43	0,46	drücken	1,73	0,55
ächzen	3,6	0,32	knien	1,33	0,44
trällern	4,27	0,34	flüstern	2,4	0,25
räuspern	3,47	0,46	wispern	2,33	0,51
sagen	3,83	0,35	zeigen	1,3	0,36
lachen	4,4	0,25	binden	1,77	0,6
hupen	4,93	0,06	ducken	1,3	0,29
klingeln	4,27	0,34	fächeln	2,4	0,52
keuchen	3,6	0,59	hauchen	2,3	0,29
rufen	4,47	0,26	atmen	2,37	0,31
föhnen	4,53	0,46	falten	2,03	0,45
fluchen	4,6	0,25	kneifen	1,73	0,75
schellen	4,27	0,82	stupsen	1,7	0,56
klimpern	3,5	0,81	fuchteln	2,07	0,89
steppen	3,97	0,59	knicken	2,3	0,49
nörgeln	3,97	0,31	bummeln	1,6	0,66
schlüpfen	3,67	0,57	streicheln	1,87	0,33
fegen	3,33	0,37	heben	1,77	0,81
singen	4,4	0,25	winken	1,3	0,36
pfeifen	4,13	0,4	zupfen	2,27	0,55
weinen	3,67	0,57	dehnen	1,73	0,75
sprechen	4	0,34	öffnen	2,47	0,67
boxen	3,9	0,78	tragen	1,57	0,46
schreien	5	0	greifen	1,77	0,81
schwätzen	4,03	0,24	schmunzeln	1,63	0,65

Anhang B Auditorische Dipole

Linke Hemisphäre					
Proband	Zeit (ms)	x-Koordinate	y-Koordinate	z-Koordinate	goodness of fit (%)
689	126	-46	12	69	91
690	119	-49	12	55	79
691	142	-40	6	58	93
693	127	-53	-2	66	91
694	113	-53	10	62	97
695	114	-53	3	64	96
697	125	-54	7	64	91
698	120	-60	-8	52	95
706	133	-40	10	57	81
708	119	-56	3	81	76
712	105	-48	1	82	98
715	133	-55	1	54	96
723	111	-59	-16	74	77
727	129	-58	8	50	95
728	115	-49	-7	61	96
730	129	-47	1	67	90
731	129	-59	17	73	91
745	122	-59	-3	55	98
748	112	-46	0	69	94
752	115	-53	5	64	98

Rechte Hemisphäre					
Proband	Zeit (ms)	x-Koordinate	y-Koordinate	z-Koordinate	goodness of fit (%)
689	111	53	10	69	95
690	114	49	7	53	97
691	128	55	15	56	80
693	121	57	3	61	99
694	111	56	17	58	97
695	118	49	14	64	98
697	110	57	8	65	89
698	108	45	9	62	87
706	117	61	21	58	88
708	123	58	16	67	86
712	104	54	13	72	97
715	117	48	11	56	96
723	125	48	4	62	94
727	133	57	7	46	93
728	107	53	-1	63	94
730	116	41	2	66	99
731	124	46	20	64	90
745	133	53	9	53	98
748	101	54	6	57	90
752	126	52	8	52	97

Anhang C Explorative Ausmessung der Dipolmaxima („laute“ und „leise“ Wortbedingung), ZF1: 100-155 ms; ZF 2: 155-215 ms

"Laute" Wörter linke Hemisphäre				
Proband	ZF 1: Zeit (ms)	ZF 1: Dipolstärke (nA)	ZF 2: Zeit (ms)	ZF 2: Dipolstärke (nA)
0689	135	15	185	9
0690	145	1	180	4
0691	-	-	185	25
0693	145	10	-	-
0694	105	3	175	10
0695	115	11	190	9
0697	155	2	-	-
0698	155	4	198	9
0706	129	15	205	14
0708	145	7	-	-
0712	141	18	-	-
0715	145	7	-	-
0723	120	1	-	-
0727	-	-	175	9
0728	-	-	185	25
0730	110	16	-	-
0731	135	5	195	0
0745	108	1	170	7
0748	130	4	165	7
0752	-	-	180	16
Mittelwert	132	7	184	11
Standardabweichung	16	6	11	7
Minimum	105	1	165	0
Maximum	155	18	205	25

"Laute" Wörter rechte Hemisphäre				
Proband	ZF 1: Zeit (ms)	ZF 1: Dipolstärke (nA)	ZF 2: Zeit (ms)	ZF 2: Dipolstärke (nA)
0689	140	12	180	14
0690	-	-	185	8
0691	140	6	175	6
0693	140	15	-	-
0694	-	-	180	11
0695	155	7	190	14
0697	115	1	175	7
0698	135	5	210	17
0706	123	4	215	4
0708	140	4	190	7
0712	150	21	-	-
0715	130	7	190	3
0723	145	6	180	7
0727	155	5	175	8
0728	-	-	163	18
0730	110	16	-	-
0731	-	-	164	4
0745	155	6	175	9
0748	153	5	-	-
0752	140	9	205	7
Mittelwert	139	8	185	9
Standardabweichung	14	5	15	5
Minimum	110	1	163	3
Maximum	155	21	215	18

"Leise" Wörter linke Hemisphäre

Proband	ZF 1: Zeit (ms)	ZF 1: Dipolstärke (nA)	ZF 2: Zeit (ms)	ZF 2: Dipolstärke (nA)
0689	140	12,1	185	6,6
0690	145	5,6	185	8,8
0691	-	-	190	23,3
0693	140	10,0	-	-
0694	115	2,5	168	7,3
0695	120	5,7	200	13,1
0697	149	3,0	-	-
0698	135	0,8	194	9,6
0706	120	9,2	194	1,0
0708	145	7,5	-	-
0712	140	18,5	-	-
0715	140	5,8	-	-
0723	145	2,3	167	2,0
0727	105	2,2	178	5,6
0728	-	-	190	19,6
0730	105	15,2	-	-
0731	130	6,5	210	5,0
0745	103	1,8	164	4,3
0748	125	4,6	165	5,7
0752	150	13,5	184	15,4
Mittelwert	130,7	7,0	183,9	9,1
Standardabweichung	15,9	5,1	14,0	6,5
Minimum	103,0	0,8	164,0	1,0
Maximum	150,0	18,5	210,0	23,3

"Leise" Wörter rechte Hemisphäre

Proband	ZF 1: Zeit (ms)	ZF 1: Dipolstärke (nA)	ZF 2: Zeit (ms)	ZF 2: Dipolstärke (nA)
0689	145	14,3	175	10,3
0690	-	-	185	6,9
0691	140	7,2	170	6,4
0693	140	15,7	-	-
0694	-	-	174	9,1
0695	105	1,1	195	15,3
0697	123	2,7	175	4,7
0698	135	6,7	200	18,3
0706	103	3,1	215	4,9
0708	142	2,7	180	7,4
0712	150	25,4	-	-
0715	135	7,2	215	1,1
0723	147	5,1	180	6,3
0727	155	4,9	178	7,1
0728	-	-	163	14,4
0730	110	16,5	-	-
0731	105	3,9	165	6,0
0745	-	-	160	8,2
0748	155	4,9	-	-
0752	140	11,2	210	5,8
Mittelwert	133,1	8,3	183,8	8,3
Standardabweichung	18,1	6,6	18,0	4,4
Minimum	103,0	1,1	160,0	1,1
Maximum	155,0	25,4	215,0	18,3

Anhang D Area under the curve

Area under the curve (FE)				
Proband	"laute" Wörter links	"leise" Wörter links	"laute" Wörter rechts	"leise" Wörter rechts
0689	32,7	32,5	58,9	51,4
0690	35,7	55,3	63,4	59,3
0691	169,5	167,6	38,2	45,2
0693	146,4	123,1	193,8	198,8
0694	50,1	42,6	65,4	52,7
0695	72,2	67,2	88,7	87,2
0697	72,9	94,0	61,3	53,7
0698	69,7	68,0	147,1	150,2
0706	90,0	61,2	23,2	39,2
0708	70,6	74,0	80,4	86,5
0712	103,0	104,7	144,1	154,4
0715	44,0	42,1	41,0	33,3
0723	40,5	41,6	123,3	96,7
0727	81,4	56,7	77,4	75,2
0728	157,0	124,4	139,1	115,2
0730	89,6	74,6	100,2	105,8
0731	35,0	53,4	29,6	44,9
0745	30,3	23,0	51,7	49,5
0748	53,2	49,1	41,9	39,4
0752	177,9	155,6	77,6	67,8
Mittelwert	81,1	75,5	82,3	80,3
Standardabweichung	47,1	40,4	45,8	45,0
Minimum	30,3	23,0	23,2	33,3
Maximum	177,9	167,6	193,8	198,8

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben, herzlich danken.

Mein Dank gilt zunächst meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Katja Biermann-Ruben ohne deren stetiges Verständnis und Mühe diese Arbeit nicht gelungen wäre. Ihr habe ich neben dem Thema und der Betreuung meiner Arbeit auch die zeitintensiven praktischen Anleitungen der einzelnen Analyseschritte und der Datenauswertung zu verdanken. Die zahlreichen Gespräche und der konstruktive Austausch haben mich stets motiviert und bereichert.

Ich möchte auch Herrn Prof. Dr. Alfons Schnitzler danken, dem Leiter des Instituts für Medizinische Psychologie und Klinische Neurowissenschaften, für seine wertvolle Unterstützung und die Bereitstellung der Ressourcen, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich danke Frau Prof. Dr. Charlotte von Gall herzlich für die gute wissenschaftliche Betreuung.

An zweiter Stelle danke ich der Arbeitsgemeinschaft Sprache, auf deren kompetente Unterstützung und Beistand stets Verlass war. Insbesondere möchte ich PD Dr. Valentina Nicolai danken, die die Studie durchführte und mir neben zahlreichen Daten auch ausnahmslos ihren wertvollen Rat und ihre Hilfe zur Verfügung stellte. Für die tatkräftige Unterstützung und Beratung bei der statistischen Auswertung möchte ich meinen Dank an Jennifer Schuffelen und Susanne Weis aussprechen. Bei technischen Angelegenheiten war Holger Krause häufig Ansprechpartner. Dank seiner Hilfe konnten viele Fragen umgehend geklärt werden. An dieser Stelle möchte ich auch den motivierten Probanden und Probandinnen danken, ohne die die Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Ich danke meinen Geschwistern Marcel, Salih und Sammy sowie meinen besten Freunden, die mir mit liebevollem Verständnis und Rat bei der Anfertigung der Arbeit unermüdlich zur Seite standen.

Ein besonderer Dank gilt aber meinen wundervollen Eltern. Diese Arbeit widme ich euch, in Anerkennung eures Mutes, eurer Liebe und eurer bedingungslosen Unterstützung.