

Validierung eines elektrokortikalen Lateralisierungsmaßes für semantische Wortverarbeitung

-Kumulative Arbeit-

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde

der

Philosophischen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt von

Judith Koppehele-Gossel

aus Siegburg

Bonn, 2019

Gedruckt mit der Genehmigung der Philosophischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Zusammensetzung der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Rainer Banse

(Vorsitzender)

Prof. Dr. Henning Gibbons

(Betreuer und Gutachter)

Prof. Dr. Ulrich Ettinger

(Gutachter)

PD Dr. Ina Grau

(weiteres prüfungsberechtigtes Mitglied)

Tag der mündlichen Prüfung: 26.02.2019

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	5
Zusammenfassung.....	7
Abstract	8
1 Einleitung.....	10
1.1 Anatomie semantischer Sprachverarbeitung.....	12
1.1.1 Läsionsstudien	12
1.1.2 PET- und fMRT-Studien	14
1.2 Der zeitliche Verlauf semantischer Sprachverarbeitung	18
1.2.1 EKP-Studien	18
1.2.2 MEG-Studien	24
1.3 Divergenz zwischen den methodischen Ansätzen und Ziele der Arbeit	26
2 Methode	30
2.1 Elektroenzephalographie, ereigniskorrelierte Potentiale und Komponenten.....	30
2.1.1 Neurophysiologische Basis des Elektroenzephalogramms	30
2.1.2 Aufzeichnung und Aufbereitung des EEGs.....	31
2.1.3 EKP-Komponenten	33
2.2 Current Source Density Transformation	36
2.3 Hauptkomponentenanalyse bei EKPs	37
2.4 Standardized Low-Resolution Electromagnetic Tomography (sLORETA)	38
3 Studien.....	39
3.1 Studie 1: Semantische Verarbeitung visueller Einzelwörter – die Entdeckung der posterioren semantische Asymmetrie	40
3.2 Studie 2: Semantische Verarbeitung visueller Einzelwörter und Bilder – Die PSA als Maß amodaler semantischer Verarbeitung?	43
3.3 Studie 3: Tritt die PSA bei semantischer Verarbeitung visueller und auditiver Einzelwörter auf?	48

3.4 Studie 4: Untersuchung der PSA im Rahmen eines Isolierungsparadigmas – Effekte der Stimulusdistinktheit und Erinnerung in lateralisierten und unlateralierten EKPs	51
3.5 Studie 5: Erprobung lateralisierter EKPs für die Untersuchung prä-semantischer Sprachverarbeitung.....	56
4 Diskussion.....	64
4.1 Integration der Studienergebnisse zur posterioren semantischen Asymmetrie.....	64
4.2 Mögliche konfundierende Variablen, Alternativerklärungen und Kontrollanalysen.....	67
4.3 Bewertung und Ausblick auf zukünftige Studien und mögliche Anwendungsbereiche	69
4.4 Fazit zur PSA und der Nützlichkeit von Lateralisierungsmaßen in der EKP-Sprachforschung.....	72
Literaturverzeichnis.....	74
Anhang.....	91

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Dr. Henning Gibbons bedanken, für die Möglichkeit bei ihm in einer großartigen Abteilung unter seiner Supervision mein Promotionsprojekt umsetzen zu dürfen. Danke, dass Du mich jederzeit mit großer fachlicher Kompetenz unterstützt hast, dass Du immer Lust hattest gemeinsam „auf Daten zu schauen“ und mich in den ersten zweieinhalb Jahren meiner Promotion so wunderbar zu motivieren wusstest als noch kein Reviewer oder Editor etwas von meiner Arbeit wissen wollte! Danke für die gute Zeit und die hervorragende Betreuung Henning!!

Mein besonderer Dank gilt außerdem Prof. Dr. Ulrich Ettinger für seine Bereitschaft die Zweitbegutachtung der vorliegenden Arbeit zu übernehmen! Außerdem möchte ich PD Dr. Ina Grau für ihre Bereitschaft danken, als weiteres prüfungsberechtigtes Mitglied an der Prüfungskommission teilzunehmen.

Weiter gilt mein Dank Prof. Dr. Rainer Banse und PD Dr. Ursula Voss, die meine Begeisterung für die psychologische Forschung geweckt und mir bereits während meines Studiums die Möglichkeit gegeben haben, Erfahrungen in der Forschung zu ganz unterschiedlichen Themenbereichen zu sammeln. Danke Ulla und Danke Rainer, dass ihr mich immer unterstützt, gefördert und an meine Fähigkeiten geglaubt habt!

Außerdem möchte ich mich bei Robert bedanken, für seine fortwährende Unterstützung sowie seine vielen Anregungen und Ideen, die er mit mir geteilt hat als er noch Teil unserer Abteilung war.

Zahlreiche Abschlussarbeitsschreibende und Studierende haben mir bei der Datenerhebung für meine Studien geholfen und deren Durchführung somit erst ermöglicht. An dieser Stelle möchte ich ganz besonders Alena, Annika, Caroline, Christina, Helen, Helena, Jan, Jennifer, Kristin, Lena, Luise, Rafaela, Rebekka und Zahra für ihre Unterstützung danken!

Bei meinen lieben Abteilungskolleginnen und Freundinnen Laura, Hannah und Marina möchte ich mich ebenfalls bedanken, für die zahlreichen geteilten Mittagspausen, die schönen Fahrten auf Tagungen und das immer angenehme Miteinander! Das gilt auch für die (z.T. ehemaligen) lieben Kolleginnen und Kollegen aus der Nachbarabteilung, insbesondere natürlich für Dich, Inga, was waren es noch für schöne Zeiten als wir morgens früh gemeinsam unsere Bahnen im Schwimmbad ziehen konnten.

Auch bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kolleginnen Kathi, Lisa und Verena möchte ich mich bedanken! Es ist schön, dass ihr allesamt Freunde für's Leben geworden seid und ich immer auf eure fachliche wie freundschaftliche Unterstützung zählen kann. Ganz besonders muss ich mich natürlich bei Dir bedanken liebe Verena! Dafür, dass ich jederzeit einen Schlafplatz bei Euch sicher wusste, für

die stabile Skypeverbindung, egal ob ins Erdgeschoss oder zum Chiemsee, unsere wöchentlichen Motivationstreffen und Deine immer so wertvollen Worte, eigentlich egal wozu!

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Wahlfamilie, Elisabeth und Christian sowie David und Antonina, bedanken: Ohne Euch wäre es mir niemals so gut ergangen und dafür bin ich Euch für immer und unendlich dankbar! Ihr habt mich immer unterstützt, an mich geglaubt und dafür interessiert, was ich mache. Das ist ein ganz großes Geschenk und es ist so gut, dass es Euch gibt!

Zusammenfassung

Läsionsstudien und Studien unter Verwendung bildgebender Verfahren haben wiederholt die Linkslateralisierung semantischer Sprachverarbeitung im Gehirn gezeigt. Interessanterweise gibt es bisher kaum Studien unter Verwendung ereigniskorrelierter Potentiale (EKPs), die eine solche Lateralisierung semantischer Sprachverarbeitung nahelegen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die Überlagerung sprachspezifischer und sprachunspezifischer EKP-Komponenten sein, die eine eindeutige Identifikation sprachbezogener lateralisierter Aktivität erschwert. Zur Herausarbeitung linkslateralisierter EKP-Aktivität wird ein neuer methodischer Ansatz vorgestellt und angewendet, bei dem ein Lateralisierungsmaß als die Differenz von linksseitiger abzüglich rechtsseitiger EKP-Aktivität berechnet wird. Im Rahmen von drei Studien zur semantischen Verarbeitung von Einzelwörtern wurde unter Zuhilfenahme dieses Ansatzes wiederholt eine temporoparietale Negativität mit einem Amplitudenmaximum bei 300 ms nach Wortbeginn gefunden. Die Komponente wies in Reaktion auf visuell präsentierte Wörter einen spezifischen Anstieg in einer semantischen Aufgabenbedingung im Vergleich zu zwei Kontrollbedingungen auf, die keine semantische Verarbeitung erforderten, und wurde dementsprechend als posteriore semantische Asymmetrie (PSA) benannt. Beobachtete Korrelationen zwischen dem bedeutungsspezifischen Anstieg der PSA und Maßen verbaler Intelligenz weisen auf die Sprachspezifität dieser Komponente hin. In zwei weiteren Studien trat die PSA bei ansonsten gleichen Aufgabenbedingungen nicht für Bilder und nicht für auditiv präsentierte Wörter auf, was als Evidenz für die Spezifität der PSA für die semantische Verarbeitung visueller Wörter angesehen wird. In zwei weiteren Studien wurde zum einen gezeigt, dass die PSA beim Erlernen von Wörtern deren Distinktheit im Lernkontext widerspiegelt. Zum anderen erwies sich das Lateralisierungsmaß auch für die Untersuchung prä-semantischer Sprachverarbeitungsprozesse visuellen Materials gegenüber klassischen unlateralierten EKP-Komponenten als vorteilhaft. So war es mit dem Lateralisierungsmaß beispielsweise möglich, gleichzeitig Effekte von Aufmerksamkeit und Lexikalität abzubilden.

Abstract

A consistent finding from lesion and imaging studies is the left-lateralization of semantic language processing in the brain. Interestingly, there is little evidence for such left-lateralized activity by studies using event-related potentials (ERPs) to investigate semantic processing. A possible explanation for this divergence could be the overlap of language-related and language-unrelated electrocortical activity, which complicates the identification of language-related, lateralized activity at the surface of the scalp. To carve out such activity we propose a new methodological approach: The computation of a lateralization-measure derived from the subtraction of right-side from left-side ERP waveforms of homologous electrodes. In three studies on the semantic processing of single visually presented words, a temporoparietal negativity with a maximum at 300 ms after word onset was repeatedly found. In response to visual words, the component showed a specific increase in a semantic task condition compared to two control conditions and was named posterior semantic asymmetry (PSA). The meaning-specific increase of the PSA correlated with measures of verbal intelligence, which is interpreted as evidence for the language specificity of the PSA. In two further studies the PSA did not occur for line-drawings or auditorily presented words under otherwise identical task conditions. This is discussed as evidence for the specificity of the PSA regarding the semantic processing of visual words. The fourth study of the present thesis showed that the PSA was able to reflect the distinctiveness of visual words during encoding in a learning context. In the fifth study of the present thesis, the lateralization-measure was used for the investigation of pre-semantic language processes and showed certain advantages compared with the classical unilateralized ERP components.

*Alle Sprache ist Bezeichnung der Gedanken,
und umgekehrt die vorzüglichste Art der Gedankenbezeichnung ist die durch Sprache,
dieses größte Mittel, sich selbst und andere zu verstehen.*

Immanuel Kant, 1798

1 Einleitung

Eine einzigartige, den Menschen auszeichnende Eigenschaft, ist sein elaboriertes Sprachsystem. Eine der wichtigsten Funktionen des menschlichen Sprachsystems stellt wohl die Repräsentation von Semantik dar, die vom Zugriff auf die Wortbedeutung bis zur Aktivierung von assoziierten Eigenschaften, übergeordneten Kategorien und zugehörigem Weltwissen reicht (Binder, Desai, Graves & Conant, 2009; Hagoort, Hald, Bastiaansen & Petersson, 2004). Die vorliegende Arbeit untersucht die Aktivierung von Semantik durch Einzelwörter, also eine basale Form semantischer Verarbeitung.

Ein etablierter Befund von Läsions- und Bildgebungsstudien ist, dass Sprachverarbeitung im Allgemeinen (zumindest bei Rechtshändern) mit linksdominanter Gehirnaktivität einhergeht (Knecht et al., 2000; Ocklenburg, Beste, Arning, Peterburs & Güntürkün, 2014; Pujol, Deus, Losilla & Capdevila, 1999). Auch für semantische Sprachverarbeitung legen Übersichtsarbeiten, welche die Befunde einer Vielzahl von Läsions- und Bildgebungsstudien berücksichtigen, die Beteiligung eines weitläufigen, linksdominanten Netzwerks von Gehirnregionen nahe (Binder et al., 2009; Cabeza & Nyberg, 2000; Dronkers, Wilkins, Van Valin, Redfern & Jaeger, 2004; Price, 2000, 2012; Turken & Dronkers, 2011; Visser, Jefferies & Ralph, 2010). Unter anderem umfasst dieses Netzwerk den linken temporalen Kortex, dem eine besonders wichtige Rolle für die semantische Verarbeitung von auditivem sowie visuellem sprachlichen Material zugesprochen wird (Binder et al., 2009; Dronkers et al., 2004; Price, 2000, 2012; Turken & Dronkers, 2011; Visser et al., 2010).

Interessanterweise untersuchen Studien mit dem Elektroenzephalogramm (EEG) unter Verwendung ereigniskorrelierter Potentiale (EKPs), die sich durch ihre besonders gute zeitliche Auflösung auszeichnen (Luck, Woodman & Vogel, 2000) und die Echtzeituntersuchung von Sprachprozessen erlauben (Kutas & Van Petten, 1988), semantische Sprachverarbeitung zumeist anhand der bilateralen N400-Komponente (Kutas & Federmeier, 2011; Kutas & Hillyard, 1980). Somit legen Läsions- und Bildgebungsstudien die Linkslateralisierung semantischer Sprachverarbeitung nahe, wohingegen EKP-Studien eher auf bilaterale Aktivität hinweisen. Da anzunehmen ist, dass die unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen die gleichen Gehirnprozesse untersuchen, erscheint es naheliegend die Erklärung dieser Divergenz in den Methoden selbst zu suchen. Anders als das EEG zeichnen sich funktionelle Bildgebungsverfahren (hier beschränkt auf die sehr häufig verwendete Positronen-Emission-Tomographie [PET] und die funktionelle Magnetresonanztomographie [fMRT]) durch eine hohe räumliche Auflösung aus (Rorden & Karnath, 2004; Vitacco, Brandeis, Pascual-Marqui & Martin, 2002). Die bilaterale Topographie semantischer EKP-Komponenten ist womöglich das Resultat der Messeigenschaften des EEGs, vor allem dessen

weniger genaue räumliche Auflösung. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen Bildgebungsstudien und EEG-Studien könnte darin liegen, dass in den EKPs frühe linkshemisphärische semantische Aktivität von ebenfalls früher, aber bilateraler aufmerksamkeits- oder anderer aufgabenbezogener Aktivität überlagert wird (Gibbons, Bachmann & Stahl, 2014).

In der vorliegenden Arbeit wird als ein neuer Ansatz in der EKP-Sprachforschung ein EKP-Lateralisierungsmaß zur Untersuchung semantischer Sprachverarbeitung vorgeschlagen und angewendet. Dieses wird als die Differenz von linkshemisphärischer abzüglich rechtshemisphärischer Aktivität homologer Elektroden berechnet. Der maßgebliche Nutzen eines solchen Lateralisierungs- oder auch Asymmetriemaßes sollte darin bestehen, durch die Differenzbildung sprachspezifische bilaterale Aktivität zu eliminieren und lateralisierte sprachspezifische Aktivität herauszuarbeiten. Die Idee der Bestimmung von Hemisphärendifferenzen in EKPs ist in anderen Forschungsbereichen zwar gut etabliert (Eimer, 1998; Luck et al., 2009; Smulders & Miller, 2012), wurde aber bisher nicht eingesetzt, um lateralisierte Sprachverarbeitungsprozesse sichtbar zu machen. Auf diesen Umstand wird in Abschnitt 1.3 der vorliegenden Arbeit genauer eingegangen.

Im Folgenden soll die Befundlage zu semantischer Sprachverarbeitung aus Läsions- und funktionellen Bildgebungsstudien auf der einen und EKP- sowie Magnetoenzephalographie (MEG)-Studien auf der anderen Seite vorgestellt werden¹. Einer zeitlichen Chronologie der Erforschung von Sprache und Gehirn folgend, werden zunächst kurz die Befunde früher sowie neuerer Patientenstudien zu den Zusammenhängen zwischen Läsionen und Einbußen in ausgewählten sprachlichen Fertigkeiten vorgestellt. In der Struktur-Funktions-Perspektive verbleibend, werden nachfolgend Befunde aus funktionellen Bildgebungsstudien mit gesunden Probanden präsentiert, wobei aufgrund der Vielzahl von Studien in erster Linie die Ergebnisse von Reviews und Metaanalysen berücksichtigt werden. Hierbei werden insbesondere solche Ergebnisse fokussiert, die sich auf die semantische Verarbeitung von Einzelwörtern beziehen. Auch die Vorstellung der EKP- und MEG-Befunde zum zeitlichen Verlauf und der Topographie semantischer Sprachverarbeitung richtet ihr Augenmerk insbesondere auf die Verarbeitung von Einzelwörtern. Es folgt eine abschließende Integration und Kontrastierung der Befunde zu Anatomie und zeitlicher Dynamik semantischer Einzelwortverarbeitung. Eine aussichtsreiche Möglichkeit zur Lösung der herausgearbeiteten Divergenzen bietend, wird die Entwicklung, Anwendung und Validierung des elektrokortikalen Lateralisierungsmaßes als zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit motiviert.

¹ Natürlich können auch mit EKPs topographische Bilder von Gehirnaktivität erzeugt werden. Mit der Betonung der guten räumlichen Auflösung von PET und fMRT und der guten zeitlichen Auflösung von EEG und EKPs werden jedoch die beiden ersteren als funktionelle Bildgebungsstudien, die ein Aktivitätsbild vom Gehirn liefern, zusammengefasst (Luck, 2014). MEG-Studien nehmen hierbei gewissermaßen eine Sonderrolle ein, da sie sowohl eine gute zeitliche Auflösung aufweisen als auch die Möglichkeit einer vergleichsweise genauen Lokalisation von Gehirnaktivität bieten.

1.1 Anatomie semantischer Sprachverarbeitung

1.1.1 Läsionsstudien

Bereits vor über 100 Jahren interessierten sich Wissenschaftler für die gehirnanatomischen Strukturen, die mit sprachlichen Funktionen in Zusammenhang stehen. In Ermangelung methodischer Alternativen beschränkten sich frühe Untersuchungen auf die Betrachtung der Zusammenhänge zwischen sprachlichen Defiziten zu Lebzeiten und nach dem Tod feststellbaren Gehirnläsionen (Broca, 1861; Dejerine, 1891, 1892; Lichtheim, 1885; Wernicke, 1874). Trotz einiger, den post mortem Läsionsstudien inhärenten Probleme (siehe z. B. Démonet, Thierry & Cardebat, 2005; Price, 2000; Rorden & Karnath, 2004), entstanden so die ersten Modelle zu Struktur-Funktions-Zusammenhängen der Sprachverarbeitung (z. B. Lichtheim, 1885).

Zwei Gehirnregionen, die von diesen frühen post mortem Studien als sprachrelevant identifiziert und später nach ihren Entdeckern benannt wurden, sind das Broca-Areal im inferioren frontalen Gyrus (IFG; Amunts & Zilles, 2012; Broca, 1861; Rorden & Karnath, 2004) und das Wernicke-Areal, das eine Region im posterioren Teil des linken superioren Temporallappens (Brodmann Areal [BA] 22) beschreibt (Dronkers et al., 2004; Price, 2000; Wernicke, 1874). Neben massiven Einschränkungen in der Sprachproduktion gehen Läsionen des Broca-Areals auch mit Einschränkungen im Sprachverständnis einher, insbesondere auf Satzebene, wenn es sich um syntaktisch komplexere Satzgefüge handelt (Bookheimer, 2002; Caramazza & Zurif, 1976; Friederici & Kilborn, 1989; Webb, 2017). Läsionen des Wernicke-Areals führen hingegen in erster Linie zu starken Einschränkungen im Sprachverständnis, bei größtenteils erhaltener Fähigkeit zu Sprachproduktion (Robson et al., 2017; Robson, Sage & Lambon Ralph, 2012; Tremblay & Dick, 2016; Wernicke, 1874). Diese läsionsbedingten Einschränkungen werden als *Wernicke-Aphasie*, *sensorische Aphasie* oder auch *Worttaubheit* bezeichnet. Neben Läsionen im linken superioren Temporallappen werden außerdem Läsionen im mittleren temporalen Gyrus (MTG; BA 21), in Heschl's Gyrus als Teil des primären auditiven Kortex (BA 41), sowie im linken Planum temporale (BA 42) mit den typischen Symptomen der Wernicke-Aphasie in Verbindung gebracht (Ardila, Bernal & Rosselli, 2016). Die Arbeiten von Broca und Wernicke befassten sich zwar in erster Linie mit Einschränkungen in der Produktion und im Verständnis *gesprochener* Sprache, die diesen Störungen immanenten Verständnisdefizite beziehen sich aber immer auch auf das Verständnis geschriebener Sprache (Webb, 2017), welches für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse ist.

Joseph Jules Dejerine integrierte die Befunde von Broca und Wernicke und erweiterte sie um die visuelle Sprachverarbeitung (Ardila et al., 2016). Dejerine ergänzte die zwei zentralen Sprachregionen um den angulären Gyrus (BA 39), welchen er als das Sprachzentrum für geschriebene Sprache annahm (Ardila et al., 2016; Dejerine, 1891, 1892). Diese Erweiterung der sprachrelevanten Regionen

resultierte ebenfalls aus post mortem Untersuchungen der Gehirne von Patienten mit *Alexie*, eine Form der Aphasie, die sich durch die Unfähigkeit zu lesen ausdrückt, wobei andere sprachliche Fähigkeiten und auch die Fähigkeit Objekte zu benennen weitgehend unbeeinträchtigt sind (Dejerine, 1891, 1892; Levelt, 2013). Weitere Aphasien, die nach dem Bostoner Klassifizierungssystem mit erheblichen Einschränkungen im Sprachverständnis einhergehen, sind die *globale Aphasie*, die *transkortikale sensorische Aphasie* und die *isolierte Aphasie* (Murdoch, 1990; Webb, 2017).

Neuere Studien mit größeren Stichproben von Aphasie-Patienten können auf elaboriertere methodische Ansätze wie Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT) zurückgreifen. Diese ermöglichen die Betrachtung von Läsionen im lebenden Individuum und konvergieren dahingehend, dass Einbußen im Sprachverständnis mit Läsionen in vielen linkshemisphärischen Regionen einhergehen. Die als relevant identifizierten Regionen umfassen dabei sowohl Bereiche im frontalen Kortex, als auch im temporalen Kortex und stimmen zumindest grob mit den Regionen überein, die von den anfänglichen post mortem Untersuchungen als bedeutsam für das Verständnis von Sprache nahegelegt wurden (Bates et al., 2003; Boatman, 2000; Dronkers et al., 2004; Jefferies & Lambon Ralph, 2006; Pillay, Binder, Humphries, Gross & Book, 2017; Turken & Dronkers, 2011; Webb, 2017; Yourganov, Smith, Fridriksson & Rorden, 2015). Besondere Bedeutung für das Verständnis gesprochener und geschriebener Einzelwörter kommt hierbei dem linken temporalen Kortex zu (Dronkers et al., 2004; Hart & Gordon, 1990; L. K. Tyler & Marslen-Wilson, 2008).

Auch Studien mit Patienten, die spezifische Defizite im semantischen Gedächtnis zeigen, weisen auf die Bedeutung des linken Temporallappens hin (Davies et al., 2005; Hodges, Salmon & Butters, 1992; Jefferies & Lambon Ralph, 2006; Levy, Bayley & Squire, 2004; Noppeney et al., 2007). Ein Großteil dieser Studien wurde mit Patienten durchgeführt, die an einer semantischen Demenz oder an den Folgen einer Herpes Simplex Virus Enzephalitis leiden. Im Verhalten manifestiert sich eine semantische Demenz in abnehmendem konzeptuellen Wissen (nicht nur sprachbezogen), Anomie (der Unfähigkeit Dinge korrekt zu benennen) und erheblichen Verständnisdefiziten, bei erhaltener, wenn auch größtenteils bedeutungsloser, Sprachproduktion (Davies et al., 2005; Noppeney et al., 2007; Shebani et al., 2017). Im Gehirn geht semantische Demenz in der Regel mit Atrophien in *beiden* Hemisphären einher, die jedoch häufig stärker in der linken Hemisphäre auftreten und ein großes Netzwerk von Regionen umfassen, wobei insbesondere der linke Temporallappen betroffen ist (Chan, Whitwell, Leschziner, Cipolotti & Rossor, 2001; Davies et al., 2005; Galton et al., 2001; Hodges et al., 1992; Jefferies & Lambon Ralph, 2006; Levy et al., 2004; Mummery et al., 2000; Noppeney et al., 2007; Shebani et al., 2017). Stärkere linkshemisphärische Schädigungen sind hierbei zumeist mit stärker ausgeprägten Wortfindungsstörungen assoziiert (Ralph, McClelland, Patterson, Galton & Hodges, 2001). Auch Patienten mit Herpes Simplex Virus Enzephalitis weisen Einbußen im

semantischen Gedächtnis auf. Neuroanatomisch werden diese zumeist durch virusbedingte Veränderungen des Temporallappens, insbesondere des MTG, begleitet (Kapur et al., 1994; Noppeney et al., 2007; Pietrini et al., 1988; K. L. Tyler, 2004).

Insgesamt deuten frühe, sowie aktuelle Patientenstudien darauf hin, dass Läsionen und Dysfunktionen in vielen Regionen der linken Hemisphäre mit Beeinträchtigungen im Sprachverständnis einhergehen (Price, 2000). Hierbei kommt dem linken Temporallappen eine besonders wichtige Rolle für das Sprachverständnis und das semantische Gedächtnis zu.

1.1.2 PET- und fMRT-Studien

Einige der Probleme, die mit Läsions- und Patientenstudien einhergehen (Démonet et al., 2005; Price, 2000; Rorden & Karnath, 2004), werden durch die Untersuchung gesunder Probanden unter Verwendung bildgebender Verfahren (wie z. B. PET und fMRT) weitestgehend behoben (Price, 2000). Seit einer der ersten wegweisenden Arbeiten in der sich Petersen und Kollegen (1988) mittels PET der semantischen Verarbeitung auditiver und visueller Einzelwörter annäherten, haben sich zahlreiche weitere Studien mit der Lokalisation semantischer Sprachverarbeitung im Gehirn befasst und wurden in Reviews und Metaanalysen integriert. Im Einklang mit den Befunden aus Läsionsstudien weisen auch diese Bildgebungsstudien mit gesunden Probanden darauf hin, dass Sprachverständnis auf einem weitläufigen Netzwerk von Gehirnregionen basiert, die für Sprachverarbeitung, insbesondere von Einzelwörtern, linkshemisphärisch dominant aktiviert sind, wohingegen die rechte Hemisphäre eine geringere Rolle spielt (Binder et al., 2009; Bookheimer, 2002; Price, 2000; Vigneau et al., 2006). Diese markante Lateralisierung wird für das Sprachverständnis auditiver Wörter teilweise als weniger stark ausgeprägt beschrieben (Hickok & Poeppel, 2007; Petersen et al., 1988; Price, 2000).

In die initialen, der semantischen Verarbeitung vorausgehenden Verarbeitungsprozesse visueller und auditiver Wörter sind entsprechend der Lage der sensorischen Kortizes zunächst sehr unterschiedliche Gehirnregionen involviert (Gernsbacher & Kaschak, 2003). Die ersten Anzeichen visueller Verarbeitung von Wörtern treten in okzipitalen Regionen auf, die an den temporalen Kortex angrenzen, wobei bereits früh eine Linkslateralisierung erkennbar ist (Gernsbacher & Kaschak, 2003; Petersen et al., 1988). Eine Region, der eine zentrale Rolle in der frühen Verarbeitung der Wortform zugeschrieben wird, ist das entsprechend benannte *visuelle Wortform-Areal* (VWFA; Dehaene et al., 2010; Glezer, Jiang & Riesenhuber, 2009; McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003). Dieses liegt im linken Gyrus fusiformis im ventralen okzipital-temporalen Kortex und seine Aktivität spiegelt perzeptuelle Expertise des visuellen Systems für geschriebene Wörter wider (McCandliss et al., 2003). Frühe auditive Verarbeitung von Wörtern äußert sich hingegen zunächst bilateral im temporalen auditiven

Kortex, während die sprachtypische Lateralisierung erst in darauf folgenden Sprachverarbeitungsschritten deutlich wird (Gernsbacher & Kaschak, 2003; Petersen et al., 1988).

In einer sehr umfassenden Metaanalyse über 120 Bildgebungsstudien, die unter Anwendung strenger Auswahlkriterien nur solche Kontraste berücksichtigte, die die semantische Verarbeitung geschriebener und/oder gesprochener Einzelwörter widerspiegelten (weshalb sie für die vorliegende Arbeit als besonders relevant erachtet wird), wurden insgesamt sieben Kernregionen semantischer Sprachverarbeitung in der linken Hemisphäre identifiziert (Binder et al., 2009). Diese lassen sich grob in linkshemisphärische posteriore (Temporal- und Parietallappen) und frontale Regionen unterteilen (Binder et al., 2009). Dies deckt sich mit den Beschreibungen anderer Übersichtsarbeiten zu semantischer Sprachverarbeitung visuellen wie auditiven Sprachmaterials (Bookheimer, 2002; Gernsbacher & Kaschak, 2003; Lau, Phillips & Poeppel, 2008; Price, 2000; Vigneau et al., 2006)².

Frontale Regionen, die im Zusammenhang mit semantischer Sprachverarbeitung Erwähnung finden, sind regelmäßig der linke IFG und, wenn auch seltener, der linke dorsomediale und der linke ventromediale präfrontale Kortex (Binder et al., 2009). Der linke dorsomediale präfrontale Kortex (in etwa korrespondierend zu BA 8 und übergehend in BA 9) wird vor allem mit dem flüssigen, intentionalen und zielgerichtetem Abruf semantischer Information in Verbindung gebracht, während der linke ventromediale präfrontale Kortex (Anteile von BA 10, 11, 24, 25 und 32) mit exekutiven Funktionen und Arbeitsgedächtnisanforderungen assoziiert wird (Binder et al., 2009). Vom IFG, der am ehesten durch BA 47 beschrieben wird (Binder et al., 2009), wird angenommen, dass dieser nicht für die Verarbeitung der Bedeutung einzelner Wörter verantwortlich ist, sondern eher in die Verarbeitung der semantischen Beziehungen zwischen Wörtern (auditiv und visuell) involviert ist sowie in die Verarbeitung von Interaktionen zwischen Bedeutung und Syntax (Binder et al., 2009; Bookheimer, 2002; Gernsbacher & Kaschak, 2003; Price, 2000). Zudem spielen Subregionen des IFG ebenfalls eine Rolle bei der phonologischen Verarbeitung (Binder et al., 2009; Bookheimer, 2002). Der IFG wird auch als zentrale Exekutive des Informationsabrufes bezeichnet (Bookheimer, 2002; Lau et al., 2008) und ist bei Aufgaben aktiviert, die semantische Entscheidungen verlangen. Dies umfasst unter anderem Selektion oder Vergleiche (Friederici, Opitz & von Cramon, 2000; Gernsbacher & Kaschak, 2003; Price, 2000; Wagner, Paré-Blagoev, Clark & Poldrack, 2001), Assoziationsaufgaben (Petersen et al., 1988) oder das gezielte Erlernen von Wörtern (Demb et al., 1995). IFG-Aktivität wird zudem mit der Aufrechterhaltung verbaler semantischer Information im Arbeitsgedächtnis in Verbindung gebracht (Gernsbacher & Kaschak, 2003; Price, 2000). Da die IFG-Aktivität modalitäts- und inhaltsunspezifisch auftritt, bei unterschiedlichen Aufgaben auch ohne Verwendung sprachbezogener Reize beobachtet werden kann (Bookheimer, 2002) und generell bei steigenden

²Auch wenn diese Studien alle semantische Sprachverarbeitung zum Thema haben, basieren sie nicht alle auf der gleichen Studiengrundlage, da unterschiedliche Studiauswahlkriterien angelegt wurden.

Aufgabenanforderungen ansteigt (Binder et al., 2009), ist anzunehmen, dass Aktivierung im IFG für die semantische Verarbeitung sprachlicher Reize zwar eine Rolle spielt, jedoch nicht als in erster Linie sprachspezifisch beschrieben werden kann. Die beschriebenen links-frontalen Regionen scheinen also vor allem Operationen *mit* semantischen Informationen widerzuspiegeln und weniger den basalen Prozess der Aktivierung der semantischen Information selbst.

Unterschiedlichen linkshemisphärischen temporalen Regionen wird eine sprachspezifischere Bedeutung für semantische Verarbeitung zugeschrieben (Binder et al., 2009; Price, 2000; Vigneau et al., 2006). Der Zugang zur Wortbedeutung wird beispielsweise mit Aktivität im linken posterioren mittleren Temporallappen, dem posterioren temporoparietalen und dem anterioren Anteil des inferioren Temporallappens in Verbindung gebracht (Price, 2000, 2010). Der linke Temporallappen wird hierbei insgesamt als Speicherort von perzeptuellen Informationen und Eigenschaften von Objekten, also Bedeutungsattributen, angenommen (Binder et al., 2009). Es gibt Hinweise darauf, dass der Temporallappen Subregionen umfasst, die bei der Verarbeitung von Wörtern distinkter semantischer Kategorien kategoriespezifische Aktivierungsmuster aufweisen (Binder et al., 2009; Bookheimer, 2002; Hickok & Poeppel, 2007). Da die vorliegende Arbeit jedoch semantische Verarbeitung von Einzelwörtern *per se* untersucht und nicht semantische Effekte im Sinne von Unterschieden in der Verarbeitung spezifischer semantischer Kategorien, erscheint vor allem der Befund bedeutsam, dass die kategorierelevanten Regionen insgesamt in links-temporalen bis temporoparietalen Regionen liegen.

Weitere Evidenz für eine besondere Bedeutung des linken MTG stammt von Studien, die sich mittels diffusionsgewichteter MRT mit den Verbindungen zwischen unterschiedlichen sprachrelevanten Gehirnregionen befassen: Sie sehen im linken MTG eine Schlüsselregion für das Sprachverständnis, da dieser Bestandteil einer Vielzahl von Kommunikationspfaden des weitläufigen neuronalen Sprachnetzwerks ist (Turken & Dronkers, 2011). Diese Befunde decken sich mit den bereits vorgestellten Befunden aus Läsionsstudien, die zeigen konnten, dass Läsionen in diesem Bereich des linken Temporallappens mit schwerwiegenden Einschränkungen des Sprachverständnisses einhergehen (Dronkers et al., 2004; Hart & Gordon, 1990; L. K. Tyler & Marslen-Wilson, 2008).

Zu den semantikrelevanten links-temporoparietalen Regionen wird – entsprechend der bereits beschriebenen Läsionsstudien – zudem der anguläre Gyrus gezählt, welcher bereits von Dejerine als sprachrelevant beschrieben wurde (Binder & Desai, 2011; Binder et al., 2009; Dejerine, 1891, 1892; Price, 2000; Vigneau et al., 2006). Der anguläre Gyrus ist im posterioren Anteil des inferioren parietalen Läppchens (BA 39) lokalisiert und stellt eine Verbindungsregion zwischen Okzipital-, Temporal- und Parietallappen dar (siehe Seghier, 2013 für eine genaue Beschreibung der

Lokalisation). Wenn auch der anguläre Gyrus bei Sprachverarbeitung häufig bilateral aktiviert ist, gibt es Evidenz dahingehend, dass dieser linkshemisphärisch ein größeres Volumen aufweist als rechtshemisphärisch (Rademacher, Galaburda, Kennedy, Filipek & Caviness, 1992). Dem angulären Gyrus werden multiple Funktionen zugeschrieben, seine Beteiligung an semantischer Verarbeitung wird aber als am verlässlichsten angesehen (Binder et al., 2009; Seghier, 2013). Im Rahmen von Sprachverarbeitung scheint der linke anguläre Gyrus vor allem bei der Verarbeitung von Wörtern im Satzkontext und der Ausbildung semantischer Assoziationen aktiviert zu sein; generell ist er aber an der Verarbeitung von unterschiedlichen Materialien (sprachlich und nicht sprachlich) sowie unterschiedlicher Modalitäten (visuell und auditiv) beteiligt (Price, 2000; Seghier, 2013; Vigneau et al., 2006). Nach Binder und Desai (2011) spiegelt die Stärke seiner Aktivierung das Ausmaß wider, in dem zum Stimulus-Input passende Informationen abgerufen werden können. Dem angulären Gyrus wird eine einzigartige Rolle in der Repräsentation von Konzepten zugeschrieben, weshalb er zuweilen als *amodales Konzept-Areal* beschrieben wird (Seghier, 2013; Vigneau et al., 2006).

Eine weitere Gehirnregion, die von Binder und Kollegen als semantisch relevant identifiziert wurde, die jedoch bilaterale Aktivität – wenn auch stärkere linkshemisphärische – aufwies, ist der posteriore cinguläre Gyrus (BA 23, 31). Dieser wird als Verbindungsstelle von semantischem Abruf und episodischen Enkodiersystemen beschrieben (Binder et al., 2009). Es wird angenommen, dass die regelmäßige Aktivierung dieser Region bei semantischer Verarbeitung damit zusammenhängt, dass unser Gehirn evolutionär darauf programmiert ist, vor allem bedeutsame Erfahrungen abzuspeichern, also solche, die viele Assoziationen hervorrufen und Konzepte aktivieren. Dies passt dazu, dass Menschen sich vor allem gut an Wörter erinnern, die sie hinsichtlich semantischer und nicht nur perzeptueller Eigenschaften verarbeitet haben (Craik & Lockhart, 1972; Craik & Tulving, 1975), für die sie also viele relevante Assoziationen und Konzepte aktiviert haben.

Auch wenn immer wieder auf die Beteiligung rechtshemisphärischer Regionen an semantischer Sprachverarbeitung hingewiesen wird (Binder et al., 2009; Bookheimer, 2002; Lindell, 2006), zeigt die Zusammenschau der Befunde, dass die homologe rechtshemisphärische Aktivität im posterioren MTG, im angulären und dem posterioren cingulären Gyrus, deutlich geringer ausfällt als die in der linken Hemisphäre (Binder et al., 2009). Insgesamt bleibt festzuhalten, dass Bildgebungsstudien auf ein weitläufiges Netzwerk von Gehirnregionen hinweisen, welches bei der Verarbeitung der Bedeutung geschriebener und gesprochener Wörter aktiviert ist und ein eindeutig linksdominantes Aktivitätsmuster aufweist. Weniger einheitlich und eindeutig als die Linkslateralisierung ist die dezidierte Zuweisung von Funktionen zu Regionen. Dies hat zur Folge, dass man wie Price (2012) zu dem Schluss kommen kann, dass wir noch weit davon entfernt sind, genau zu verstehen, wie das Gehirn Sprachverständnis ermöglicht. Aus den zuvor vorgestellten Ergebnissen lässt sich aber extrahieren, dass zu den für Sprachverständnis relevanten Regionen frontale wie

temporale/temporoparietale Regionen gehören, wobei die frontalen Regionen vor allem mit exekutiven Anforderungen bei semantischen Aufgaben in Zusammenhang gebracht werden und die Regionen des Temporallappens vor allem für semantische Sprachverarbeitung per se sowie die Verarbeitung von semantischen Kategorieeigenschaften von Bedeutung zu sein scheinen.

1.2 Der zeitliche Verlauf semantischer Sprachverarbeitung

1.2.1 EKP-Studien

Als klare Vorzüge des EEGs gegenüber der PET oder der fMRT sind seine sehr gute zeitliche Auflösung sowie die vergleichsweise einfache und kostengünstige Durchführung hervorzuheben (Luck et al., 2000). Da Untersuchungen der Blickbewegungen im Leseprozess gezeigt haben, dass Wortfixationen in der Regel sehr kurz sind (im Mittel 250 ms), scheint die zeitliche Auflösung für die Untersuchung von Sprachverarbeitung von großer Bedeutung zu sein (Sereno, 2003; Sereno, Rayner & Posner, 1998).

Entgegen der homogenen Befundlage bildgebender Verfahren, die zeigt, dass semantische Sprachverarbeitung maßgeblich auf linkshemisphärischer Aktivität beruht, sind die Ergebnisse von EEG-Studien weitaus heterogener, was die Lateralisierung von Komponenten anbelangt, die funktional dem Sprachverständnis zugeordnet werden. Im Folgenden sollen die EKP-Komponenten vorgestellt werden, die regelhaft mit der Verarbeitung visueller und auditiver Einzelwörter in Verbindung gebracht wurden, sofern Variationen dieser als Indikatoren semantischer Sprachverarbeitung interpretiert wurden (Dien, 2009; Pulvermüller, Shtyrov & Hauk, 2009).

Hierbei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass Effekte, die auf Variationen semantischer Eigenschaften von Wörtern zurückzuführen sind, nicht direkt mit semantischer Verarbeitung gleichgesetzt werden können. So ist zwar bei der in der Literatur weit verbreiteten Unterscheidung zwischen Wörtern unterschiedlicher semantischer Kategorien die Wortkategorie sicherlich eine semantische *Eigenschaft* dieser Wörter, Unterschiede in der Gehirnaktivität in Reaktion auf diese Wortkategorien sind jedoch nicht notwendigerweise ein Resultat unterschiedlicher basaler semantischer *Verarbeitung*: Die Aktivierung der Wortbedeutung sollte für beide Kategorien zunächst gleichermaßen über die Suche nach einem passenden Eintrag im mentalen Lexikon erfolgen und erst danach sollte kategoriespezifische Aktivierung auftreten. Dennoch werden semantische Effekte in der Literatur häufig mit semantischer Verarbeitung gleichgesetzt (z. B., Embick, Hackl, Schaeffer, Kelepir & Marantz, 2001; Hauk & Pulvermüller, 2004b; Moscoso del Prado Martín, Hauk & Pulvermüller, 2006; Pulvermüller, Shtyrov & Ilmoniemi, 2005; Shtyrov, Butorina, Nikolaeva & Stroganova, 2014). Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf *früher* semantischer Sprachverarbeitung liegt, werden im folgenden Überblick nur Komponenten betrachtet, die ihre maximale Amplitude bis

400 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation aufweisen. Bei der Beschreibung dieser Komponenten soll ein besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, ob die Komponenten eine asymmetrische oder eine eher bilaterale Topographie aufweisen.

Bei der Betrachtung früher EKPs ist zu beachten, dass bei visuellen Wörtern unmittelbar die gesamte Wortform zur Verfügung steht, die eine Aktivierung der Bedeutung erlaubt, wohingegen bei auditiven Wörtern der auditive Input erst nach und nach eintrifft (MacGregor, Pulvermüller, van Casteren & Shtyrov, 2012; Pulvermüller et al., 2009). Bei auditiven Wörtern kann es somit stärker zu parallel angestoßenen Verarbeitungsprozessen und einer Überlagerung der sprachspezifischen Prozesse kommen und die Bedeutung der Wörter kann frühestens ab dem sogenannten „Wort-Rekognitions-Punkt“ erfolgen. Dieser bezeichnet den Zeitpunkt, zu dem ein auditives Wort eindeutig identifizierbar ist (MacGregor et al., 2012, S. 712; Pulvermüller et al., 2009).

Die zeitlich früheste EKP-Komponente in Reaktion auf visuelle Stimuli ist (nach der noch früheren, aber nicht ganz so regelhaft beobachteten C1) die P1-Komponente (Luck, 2014). Für visuell präsentierte Wörter handelt es sich um eine bilaterale Positivität mit parietookzipitaler Topographie und einem Maximum etwa 100 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation (z. B. Dien, 2009; Hauk & Pulvermüller, 2004b; Proverbio, Vecchi & Zani, 2004). Neben (semantikspezifischen) Variationen bedingt durch die zugewendete Aufmerksamkeit (Dehaene et al., 2001; McCarthy & Nobre, 1993; Ruz & Nobre, 2008) und die Länge des orthographischen Stimulus³ (Hauk, Davis, Ford, Pulvermüller & Marslen-Wilson, 2006; Hauk & Pulvermüller, 2004b; Hauk, Pulvermüller, Ford, Marslen-Wilson & Davis, 2009), gibt es Hinweise auf erhöhte P1-Amplituden für Wörter im Vergleich zu Pseudowörtern (aussprechbare, aber bedeutungslose Buchstabenfolgen; Segalowitz & Zheng, 2009). Da aber neben den Unterschieden in der Bedeutungshaftigkeit zwischen Wörtern und Pseudowörtern auch die Vertrautheit mit der visuellen Wortform als Erklärung für die beobachteten Amplitudenunterschiede herangezogen werden kann, müssen diese nicht aus Unterschieden in der semantischen Verarbeitung resultieren. Zudem ist der Wort-Pseudowort-Unterschied für die P1-Amplitude nicht konsistent replizierbar (Hauk, Patterson, et al., 2006; Hauk et al., 2009; Proverbio et al., 2004). Bei der P1 handelt es sich somit insgesamt um eine zumeist bilaterale (oder sogar manchmal rechtslateralisierte) Komponente, die nicht eindeutig mit semantischer Sprachverarbeitung assoziiert ist (Hauk & Pulvermüller, 2004b; Penolazzi, Hauk & Pulvermüller, 2007). Für auditive Stimuli und auch auditiv präsentierte Wörter ist die früheste der P1 vorausgehende Komponente die P50, die ihre Quelle im auditiven Kortex hat, für welche aber nur Variationen durch Aufmerksamkeit bekannt sind (Luck, 2014).

³ Orthographische Stimuli umfassen gemäß der Literatur alle Stimuli, die sich aus Buchstaben zusammensetzen. Dies können Non-Wörter (nicht aussprechbare, bedeutungslose Buchstabenfolgen), Pseudowörter (aussprechbare, bedeutungslose Buchstabenfolgen) und Wörter (aussprechbar und bedeutungstragend) sein.

Eine Komponente, die regelhaft beim Lesen visueller Einzelwörter beobachtet und als Marker früher visuell-perzeptueller Wortverarbeitung angenommen wird, ist die N170-Komponente. Die N170 weist ihre negativste Amplitude an okzipital-temporalen Elektroden zwischen 150 und 200 ms auf und ist bei der Verarbeitung visueller Wörter typischerweise linkslateralisiert (Bentin, Mouchetant-Rostaing, Giard, Echallier & Pernier, 1999; Dien, 2009; Hauk, Davis, et al., 2006; Maurer, Brandeis & McCandliss, 2005; Proverbio et al., 2004; Rossion, Joyce, Cottrell & Tarr, 2003; Simon, Bernard, Largy, Lalonde & Rebai, 2004). Als Quelle der N170 wird die bereits beschriebene VWFA angenommen (Brem et al., 2006; Cohen et al., 2000, 2002; Tarkiainen, Cornelissen & Salmelin, 2002). Die N170-Amplitude variiert in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeit, mit der Wörter verarbeitet werden (Dehaene et al., 2004). Dies stimmt mit der Annahme überein, dass die N1 im Allgemeinen als Indikator visueller Aufmerksamkeit gesehen werden kann (Hillyard, Vogel & Luck, 1998). Für die N170-Komponente wurden negativere Amplituden für orthographische im Vergleich zu non-orthographischen Stimuli gefunden (Bentin et al., 1999; Simon et al., 2004). Teilweise differenzierte die Komponente auch zwischen Wörtern und Pseudowörtern, was zuweilen als semantischer Effekt beschrieben wurde (Hauk, Davis, et al., 2006; Simon et al., 2004). Teilweise konnten jedoch auch keine Unterschiede zwischen beiden Stimulusarten gefunden werden (Bentin et al., 1999; Maurer et al., 2005). Weiterhin zeigten sich Häufigkeitseffekte (negativere Amplituden für seltene Wörter), die man ebenfalls als semantische Effekte interpretieren könnte, da die Bedeutung seltener Wörter schlechter zugänglich sein sollte als die häufiger Wörter (Hauk & Pulvermüller, 2004b; Neville, Mills & Lawson, 1992; Sereno, 2003). Aber auch hier existieren gegenläufige Befunde mit negativere Amplituden für häufige Wörter (Simon et al., 2004). Zudem gibt es Hinweise darauf, dass die Häufigkeitseffekte kritisch von der Wortlänge abhängen: In einer Studie von Penolazzi und Kollegen (2007) traten Häufigkeitseffekte nur für kurze Wörter auf. Bezüglich der frühen Worthäufigkeitseffekte ist zu bedenken, dass diese auch lediglich die Vertrautheit mit den visuellen Wortformen reflektieren könnten. Diese sollte bei häufigen Wörtern stärker ausgeprägt sein als bei seltenen Wörtern, muss aber nicht zwangsläufig mit deren Bedeutung assoziiert sein. Zusammenfassend handelt es sich bei der N170 somit zwar um eine linkslateralisierte EKP-Komponente, die in Reaktion auf visuelle orthographische und beachtete Stimuli eine erhöhte Amplitude aufweist. Die Befunde legen jedoch nahe, dass die N170 nicht spezifisch für die *semantische* Verarbeitung visueller Einzelwörter ist.

Seltener, und von manchen Autoren bei visuellen Wörtern als untypisch bezeichnet (Hagoort & Brown, 2000), werden weitere negative Komponenten zwischen der N170 und der N400 beschrieben. Zum Beispiel werden Modulationen der N2-Komponente (negative, linkslateralisierte Komponente mit parietaler Topographie und einem Maximum um 200 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation) mit der Verarbeitung der Bedeutung von visuellen Wörtern in Zusammenhang

gebracht. Die Negativität der N2-Amplitude ist mit dem Ausmaß der Erwartungsverletzung bei nacheinander präsentierten Wörtern am Satzende assoziiert und die Aktivitätsquelle wird im linken Gyrus fusiformis angenommen (Dien, Frishkoff, Cerbone & Tucker, 2003). Studien, in denen ebenfalls eine Kontextmanipulation vorgenommen wurde, wiesen ebenfalls auf Variationen einer Negativität in Abhängigkeit des Kontextes hin (Penolazzi et al., 2007; Sereno, 2003). Aufgrund leicht früherer Peak-Amplituden bei ähnlicher, wenn auch nicht immer linkslateralisierter Topographie, wurden diese Variationen aber als N1-Effekt bezeichnet (Penolazzi et al., 2007). Insgesamt sind die Befunde zur N2, wie Dien (2009) in einer Übersichtsarbeit zu EKP-Komponenten beim Einzelwortlesen zusammenfasst, noch „unausgereift“ und es bedarf weiterer Forschung, um auszuschließen, dass diese nicht lediglich auf Konfundierungen im Studiendesign beruhen (Dien, 2009). Für auditive Wörter wird häufiger eine als N2 oder N250 bezeichnete frontozentrale Negativität berichtet; diese weist die negativste Amplitude für semantisch-inkongruente, im Satzkontext stehende Wörter auf (Hagoort & Brown, 2000; van den Brink, Brown & Hagoort, 2001). Bei der N2/N250 handelt es sich somit um eine frühe Komponente, der semantische Funktionen zugeschrieben werden können und die für visuelle Wörter linkshemisphärisch höhere Amplituden als rechtshemisphärisch aufweist. Jedoch handelt es sich bei den N2/N250-Befunden - sowohl die auditive, als auch die visuelle Modalität betreffend - eher um Anzeichen für das Ausmaß des Aufwandes (der Vorbereitung) der Integration in den Satzkontext, als um ein Abbild der Bedeutungsaktivierung durch einzelne Wörter (van den Brink et al., 2001).

Eine weitere Negativität mit maximaler Amplitude zwischen 200 und 250 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation ist das sogenannte *Rekognitions-Potential* (RP; Rudell, 1991), welches ebenfalls eine linksdominante Topographie aufweist und im Wesentlichen auf Aktivität des linken inferioren temporalen Gyrus zurückzuführen ist (Dien, Brian, Molfese & Gold, 2013). Bezüglich der Funktionalität des RP besteht Uneinigkeit. So wird es zuweilen als Indikator lexikalischer Auswahl, was bereits als eine frühe Stufe der Bedeutungsaktivierung angesehen werden kann, oder als Indikator der Zuordnung von Orthographie zu Phonologie beschrieben (Dien, 2009). An anderer Stelle werden dem RP jedoch auch frühere, noch perzeptuelle Verarbeitungsschritte zugeordnet (Zhang, Liu & Zhang, 2009). Dementsprechend wird es stellenweise auch eher vage als eine frühe Stufe im Wort-Rekognitions-Prozess beschrieben (Dien et al., 2013). Insgesamt ist das RP aber vermutlich eher kein Anzeichen semantischer Einzelwortverarbeitung im Leseprozess unter natürlichen Lesebedingungen. Dies lässt sich aus folgenden Befunden ableiten: Lexikalitätseffekte, im Sinne einer negativeren Amplitude für Wörter im Vergleich zu Pseudowörtern, wurden zumeist nur unter maskierten Darbietungsbedingungen beobachtet (siehe Dien et al., 2013). Das RP wurde

reliabel nur mithilfe der Rapid Stream Stimulation (RSS)⁴ gefunden. Es trat ebenfalls für chinesische Schriftzeichen (bei Lesern, die Chinesisch können, Zhang et al., 2009), aber auch für Bilder und Cartoon-Gesichter auf (Rudell, 1991, 1992).

Weitere frühe Komponenten wie die Mismatch Negativity (MMN; Peak ca. 100 ms nach Stimulusbeginn; Näätänen & Kreegipuu, 2012) sowie etwas spätere EKP-Komponenten (250-350 ms: MFN; N300; P2; phonologische Mismatch Negativity [PMN]) mit frontaler Topographie werden vermehrt mit phonologischer und nicht mit semantischer Verarbeitung von Einzelwörtern in Verbindung gebracht (Dien, 2009). Aufgrund dessen werden sie an dieser Stelle nicht näher beschrieben. Eine weitere Komponente, die unter anderem auch bei der Verarbeitung der Bedeutung geschriebener wie gesprochener Wörter auftritt, ist die P300-Komponente (siehe Reviews von Polich, 2007, 2012). Es handelt sich hierbei um eine Positivität mit maximaler Amplitude um 300 ms nach Stimuluspräsentationsbeginn, die im Fall der P3b (eine Subkomponente der P3) eine posteriore Topographie, aber keine Lateralisierung aufweist und allgemein für seltene oder aufgabenrelevante Stimuli vieler Art beobachtet werden kann und somit nicht sprach- oder semantikspezifisch ist (Linden, 2005; Polich, 2007, 2012).

Die im Zusammenhang mit semantischer Sprachverarbeitung bekannteste und meist untersuchte EKP-Komponente ist die N400-Komponente (siehe Review von Kutas & Federmeier, 2011; Laszlo & Federmeier, 2014; Pulvermüller et al., 2009). Die N400 wurde in einem Experiment entdeckt, in dem Probanden Sätze lesen mussten, deren Wörter nacheinander visuell präsentiert wurden und deren finales Wort entweder unerwartet oder aufgrund des vorab präsentierten Satzteils semantisch zu erwarten war (Kutas & Hillyard, 1980). Für unerwartete Wörter, die im Vergleich zu vorhersagbaren Wörtern eine semantische Verletzung darstellen, zeigte sich eine zentroparietale Negativität mit maximaler Amplitude ca. 400 ms nach Wortbeginn, die insbesondere für visuelles Material eine leichte Rechtsasymmetrie aufwies (Lau et al., 2008; van den Brink et al., 2001). Als N400-Effekt wird hierbei der Unterschied in der N400-Amplitude zwischen Wörtern, die eine semantische Verletzung zum gegebenen Kontext darstellen und Wörtern, die zu ihrem Kontext kongruent sind, bezeichnet (Kutas & Federmeier, 2011). Weitere Studien haben gezeigt, dass es für das Auftreten dieser Komponente notwendig ist, dass die Wörter aufgrund ihrer Semantik unerwartet sind, wohingegen

⁴ Bei der RSS zur Untersuchung lexikalischer Prozesse wird in schneller und unmittelbarer Abfolge (Stimulusonset-Asynchrony von maximal 257 ms) eine Vielzahl von Stimuli präsentiert. Eine detaillierte Beschreibung des Paradigmas findet sich in Hinojosa et al. (2001). Der Großteil dieser Stimuli sind sogenannte *Hintergrundstimuli*. Hierbei handelt es sich in der Regel um visuelle Stimuli, die durch das Zerlegen realer Wörter in Wortfragmente und das zufällige Zusammensetzen dieser Fragmente generiert wurden, wobei durch das Teilen auch deformierte Buchstaben enthalten sind. Zu deutlich geringeren Anteilen (z. B. 1/7 bis 1/6 im Vergleich zur Anzahl der Hintergrundstimuli) werden *Kontrollstimuli* (aus nach bestimmten Regeln fragmentierten Wörtern, die nach bestimmten Regeln, d. h. nicht zufällig, neu zusammengesetzt wurden, sodass Wortanfangs- und Wortende-Buchstabe, und somit mindesten zwei Buchstaben, erhalten bleiben), zufällige *Buchstabenfolgen*, *Pseudowörter*, reguläre *Wörter* und *Zielwörter* (auf die aufgabengemäß reagiert werden muss) präsentiert. In den EKP-Wellenformen wird dann die Aktivität in Reaktion auf Buchstabenfolgen, Pseudowörter, reguläre Wörter und Zielwörter (jeweils abzüglich der Aktivität in Reaktion auf Kontrollstimuli) auf Unterschiede hin analysiert.

keine N400 auftritt, wenn es sich um eine perzeptuelle Abweichung (andere Schriftart oder Wort in Großbuchstaben) oder grammatikalische Verletzung handelt (Kutas & Federmeier, 2011). Weitere Forschung zur N400 zeigte, dass die Komponente auch für visuell und auditiv präsentierte Einzelwörter im Gesamtkontext einer experimentellen Wortliste (also unabhängig vom Satzkontext) (Holcomb & Neville, 1990) sowie für Zeichensprache, aber auch unterschiedlichste nicht-sprachliche Stimuli wie Zeichnungen, Bilder, Gesichter und Filme (siehe Reviews von Kutas & Federmeier, 2011; Swaab, Ledoux, Camblin & Boudewyn, 2012) beobachtet werden kann. Übersichtsarbeiten zur kortikalen Quelle der N400 liefern Evidenz dafür, dass der linke MTG maßgeblich am N400-Effekt beteiligt ist (Lau et al., 2008; Tse et al., 2007). Da der MTG auch mit lexikalischem Zugriff in Verbindung gebracht wird, wird die N400 nicht nur als Indikator des Aufwands der Integration eines Stimulus in einen gegebenen Kontext diskutiert, sondern auch als Reflektion des lexikalischen Zugriffs (Kutas & Federmeier, 2000; Lau et al., 2008); eine Interpretation, die in Anbetracht der Befunde zu nicht-sprachlichem Material jedoch nicht zwingend erscheint, weshalb die N400 häufiger als Indikator des Aufwands der semantischen Integration angesehen wird (Brown & Hagoort, 1993; Swaab et al., 2012; van den Brink et al., 2001).

Zur N400 kann zusammengefasst werden, dass es sich um eine bilaterale bis rechtslateralisierte EKP-Komponente handelt, die eher Prozesse wie z. B. die Integration der Bedeutung in einen gegebenen Kontext widerspiegelt, die zeitlich nach der Aktivierung der (Wort-) Bedeutung einzuordnen sind (Halgren et al., 2002; Swaab et al., 2012; van den Brink et al., 2001). Somit ist die N400 zweifellos für semantische Sprachverarbeitung von Relevanz, hat aber auch für die Verarbeitung von nicht-sprachlichem Material eine Bedeutung und spiegelt somit vermutlich eher amodale semantische Verarbeitung wider (Marinkovic et al., 2003).

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass aus EKP-Studien zur semantischen Verarbeitung von visuellen und auditiven Wörtern keine posterioren Komponenten hervorgehen, die lateralisiert und zeitlich vor der N400-Komponente einzuordnen sind und über Wort-Pseudowort- und Worthäufigkeitsvergleiche sowie die Betrachtung von Kategorieunterschieden hinausgehen. Somit fehlt ein links-temporoparietales Pendant zur aus Läsions- und Bildgebungsstudien bekannten linkslateralisierten semantischen Aktivität. Unter anderem basierend auf den kurzen Fixationszeiten im Leseprozess ist aber anzunehmen, dass semantische Aktivität vor der N400 auftreten sollte. Eine Messung dieser Aktivierung könnte vor allem an solchen Elektroden erfolgen, die räumlich näher an den relevanten temporalen Regionen liegen. Dieser Gedanke, für den sich erste Hinweise aus einer Arbeit von Gibbons und Kollegen (2014) ergeben haben, wird im Unterkapitel 1.3 genauer ausgeführt. Zunächst sollen im Folgenden jedoch bedeutsame Befunde aus MEG-Studien zusammengefasst werden.

1.2.2 MEG-Studien

Studien unter Verwendung der MEG, die neben der zum EEG vergleichbar guten zeitlichen Auflösung auch eine Lokalisation der Gehirnaktivität ermöglicht (Hämäläinen, Hari, Ilmoniemi, Knuutila & Lounasmaa, 1993), bieten gewissermaßen die Möglichkeit der Integration von Anatomie- und Zeitperspektive auf semantische Sprachverarbeitung. Vermutlich, weil die MEG-Methode mit sehr hohen Kosten verbunden ist, wird sie trotz ihrer Vorzüge nur selten (Luck, 2014) und teilweise mit nur sehr geringen Probandenzahlen durchgeführt (z. B. $N = 1$; Assadollahi & Pulvermüller, 2001; Pulvermüller, Assadollahi & Elbert, 2001, als Beispiele für Sprachverarbeitungsstudien).

Hinsichtlich der Verarbeitung von visuellen und auditiven Wörtern zeigen MEG-Studien in Übereinstimmung mit EEG-Studien, dass frühe perzeptuelle Prozesse jeweils in den modalitätsspezifischen, sensorischen Kortizes stattfinden, von wo aus sich die Aktivität in Richtung anteriorer Regionen zu amodalen semantischen Verarbeitungsarealen ausbreitet, wobei die Aktivität insbesondere für visuelle Wörter stark linkslateralisiert ist (Cornelissen et al., 2009; Marinkovic et al., 2003; Tarkiainen, Helenius, Hansen, Cornelissen & Salmelin, 1999; Vartiainen, Parviainen & Salmelin, 2009; Wheat, Cornelissen, Frost & Hansen, 2010; Woodhead et al., 2014). Diese grobe posterior-nach-anterior-Beschreibung wurde insofern spezifiziert, als dass zudem relativ frühe (~130 ms), wortspezifische Aktivität im linken inferioren frontalen Gyrus beschrieben wurde, die posteriore Aktivität im ventralen okzipitotemporalen Kortex moduliert (Cornelissen et al., 2009; Pammer et al., 2004; Woodhead et al., 2014) und als top-down Einfluss auf die Worterkennung interpretiert wurde (Woodhead et al., 2014).

Für visuelle Wörter werden analog zur N170 die N170m (oder auch M170) sowie die N1m bei kürzeren Darbietungszeiten als Indikator früher, zumeist linkslateralisierter perzeptueller Verarbeitung berichtet (Pulvermüller et al., 2001; Pykkänen, Stringfellow & Marantz, 2002; Tarkiainen et al., 1999). Für auditive Wörter wird zudem die bilaterale N1m (oder auch M100; Helenius et al., 2002; Marinkovic et al., 2003) beschrieben. Alle drei Komponenten spiegeln prä-semantische Aktivität wider. Für die N170m wird eine Quelle im inferioren okzipitalen Kortex (Tarkiainen et al., 1999) und für die N1m im supratemporalen Planum (Helenius et al., 2002) angenommen. Übereinstimmend mit den EKP-Befunden zu Interaktionen von Wortlänge und Häufigkeit (Penolazzi et al., 2007), existiert auch MEG-Evidenz dafür, dass frühe Effekte (120-170 ms) von Worthäufigkeit nur bei kurzen Wörtern auftreten (Assadollahi & Pulvermüller, 2001). Dies erklärt, warum in Studien, in denen die Wortlänge nicht als Faktor ins Studiendesign aufgenommen wurde, sondern nur auf den anderen Faktorstufen konstant gehalten wurde, teilweise nur spätere Effekte der Häufigkeit fanden (Embick et al., 2001). Diese Befunde weisen (wie schon bei den vergleichbaren EKP-Befunden zur N170) auf die Bedeutsamkeit der Berücksichtigung dieser Worteigenschaften bei der Stimulusauswahl hin. Wie schon bei den zuvor beschriebenen Studien

angemerkt, handelt es sich bei den Häufigkeitseffekten zwar sicherlich um für semantische Verarbeitung relevante Effekte (z. B. dafür wie schnell ein zugehöriges Konzept aktiviert werden kann), jedoch nicht um Effekte, die per se der Aktivierung von Bedeutung zugeschrieben werden können.

Bei semantischer Verletzung (zumeist) im Rahmen des klassischen Satzleseparadigmas mit semantisch-kongruenten und semantisch-inkongruenten Schlusswörtern (wie bereits genauer bei der Entdeckungsgeschichte der N400 erklärt) wurde für visuelles wie auch auditives Material mit dem MEG sehr regelhaft eine N400m gefunden, deren Quelle im linken temporalen Kortex angenommen wird (Halgren et al., 2002; Marinkovic et al., 2003; Vartiainen et al., 2009). Hierbei wird als mögliche Aktivierungsquelle zum einen der linke superiore temporale Kortex vorgeschlagen (Vartiainen et al., 2009), eine Region die in unmittelbarer Nähe zur Quelle der auditiven N100m gelegen ist, aber von dieser eindeutig differenzierbar war (Helenius, Salmelin, Service & Connolly, 1998). Zusätzlich werden aber auch weitere Regionen des Temporallappens sowie teilweise der dorsolaterale frontale Kortex als Quelle diskutiert (Kutas & Federmeier, 2011). Diese Variationen resultieren vermutlich aus Unterschieden in Stimuli und Aufgaben.

Zwischen den frühen, ihrer Funktionalität nach perzeptuellen MEG-Komponenten und der N400m, werden in der MEG-Literatur noch weitere Komponenten berichtet, die für visuelle und auditive Wortverarbeitung ähnlich ausfallen und unabhängig von semantischer Integration/Verletzung auftreten: So zum Beispiel die linkslateralisierte M250 und die M350 (Marinkovic et al., 2003; Pylkkänen et al., 2002). Diese werden prä-lexikalischen Verarbeitungsprozessen (M250) sowie andererseits der automatischen Aktivierung des mentalen Lexikons (M350) zugeschrieben. Für die M350 wird hierbei eine Quelle im auditiven Kortex in unmittelbarer Nähe zur Quelle der N100m angenommen. Für die M250 wird hingegen eine etwas weiter posterior gelegene Quelle postuliert, die aber ebenfalls im temporalen Kortex liegt (Pylkkänen et al., 2002).

Für auditive Wörter wurde mit dem MEG auch die MMN untersucht (MMNm; Pulvermüller et al., 2005) und als Anzeichen der Aktivierung der Bedeutung von sogenannten Action-Words interpretiert. Bei Action-Words handelte es sich um Verben, die eng mit Handlungen bestimmter Körperteile assoziiert sind (z. B. *essen* mit dem Gesicht und *treten* mit dem Bein). Je nach dem mit welchem Körperteil das Wort assoziiert war, wies die MMNm eine unterschiedliche Topographie auf. Sowohl für mit dem Gesicht, als auch für mit dem Bein assoziierte Wortkategorien trat dabei generell eine stärkere linkshemisphärische Aktivierung auf. Bei Beinwörtern wies die MMNm eine eher temporale und bei Gesichtswörtern eine eher frontale Topographie auf, wobei die stärkste Aktivität für beinbezogene Wörter um 130 ms bzw. für gesichtsbezogene Wörter um 140 ms vorlag (Pulvermüller et al., 2005). Auch die MMNm repräsentiert lediglich einen semantischen

Kategorieeffekt, der nur im Rahmen eines bestimmten Paradigmas (Oddball-Paradigma) sowie im Zuge des Vergleichs von seltenen Wörtern mit häufig präsentierten Pseudowörtern ermittelt werden kann. Auch die MMNm kann somit eher nicht mit der Bedeutungsaktivierung von Wörtern gleichgesetzt werden.

Teilweise wird auch frühere Aktivität in Reaktion auf auditive Wörter im MEG mit semantischen Prozessen in Verbindung gebracht (~50-80 ms; MacGregor et al., 2012; Shtyrov et al., 2014). Die „semantische“ Aktivität wurde hier zum einen als Unterschied zwischen Wörtern und Pseudowörtern (MacGregor et al., 2012) sowie zum anderen als Unterschied zwischen semantischen Kategorien gesprochener Wörter (hand-, fuß-, oder gesichtsbezogene Wörter), die im Vergleich zu häufig präsentierten Pseudowörtern gleichzeitig selten und unerwartet waren (Shtyrov et al., 2014) konzeptualisiert. Gegen die Annahme, dass es sich hierbei um per se semantische Aktivität handelt, spricht, dass die gefundenen Unterschiede auch auf die auditive Vertrautheit mit den Wortformen zurückzuführen sein könnten. Eine Eigenschaft welche für die unbekanntes Pseudowörter nicht angenommen werden kann. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die zeitliche Einordnung der Aktivität in beiden Studien relativ zum Wort-Rekognitions-Punkt vorgenommen wurde. Dieser liegt zeitlich später als der Wortbeginn, an dem ein Großteil der Studien ihre Aktivitätsmittelung ausrichten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass - ähnlich wie in den EKP-Studien - vor allem die N400m dazu herangezogen wurde, um semantische Sprachverarbeitung zu beschreiben, in Übereinstimmung mit den Befunden aus Bildgebungsstudien (Gernsbacher & Kaschak, 2003; Hickok & Poeppel, 2007; Petersen et al., 1988; Price, 2000) konnte für die Verarbeitung visueller Einzelwörter eine Linkslateralisierung der Aktivität festgestellt werden, die sich von posterioren über temporale bis in anteriore Regionen ausbreitet.

1.3 Divergenz zwischen den methodischen Ansätzen und Ziele der Arbeit

Bezüglich der Lateralisierung von semantischer Sprachverarbeitung erbringen Läsions- und Bildgebungsstudien auf der einen Seite und EKP-Studien auf der anderen Seite unterschiedliche Evidenz: Bildgebungsstudien zur Folge geht semantische Sprachverarbeitung stärker mit linkshemisphärischer als rechtshemisphärischer Aktivierung einher; insbesondere für Einzelwörter und bei Aufgaben, die keine gesteigerten Anforderungen an exekutive Kontrollprozesse stellen, spielt der linke temporale Kortex eine wichtige Rolle (Binder et al., 2009; Dronkers et al., 2004; Price, 2000, 2012; Turken & Dronkers, 2011; Visser et al., 2010). Im Gegensatz dazu untersuchen EKP- und MEG-Studien semantische Verarbeitung im engeren Sinne (d. h., nicht solche semantischen Effekte, die beispielsweise lediglich über den Kontrast von Wörtern und Pseudowörtern operationalisiert wurden) vor allem mit der unlatéralisierten N400 Komponente (Kutas & Federmeier, 2011; Kutas &

Hillyard, 1980). Die Quelle der N400 im linken Temporallappen wird nur unter Verwendung von technisch aufwendigeren Quellenmodellierungsverfahren deutlich (Van Petten & Luka, 2006). Die meist berichtete bilaterale bis rechtslateralisierte Topographie der N400 ist dabei wahrscheinlich durch die Projektion der linkslateral im Temporallappen generierten Aktivität auf zentrale bis rechtshemisphärische Regionen bedingt, was zur bilateralen bis rechtslateralisierten Topographie der N400 führt. Insgesamt handelt es sich bei der N400 um eine relativ späte Komponente, die kaum früheste semantische Aktivität bei der Verarbeitung von Einzelwörtern widerspiegeln kann, sondern vermutlich Prozesse wie kontextuelle semantische Integration widerspiegelt (Kutas & Federmeier, 2011). In der EKP-Literatur fehlt somit ein links-temporales Pendant früher semantischer Sprachverarbeitung. Hierbei erscheint es sehr unwahrscheinlich, dass auch alle früheren semantischen Prozesse Quellen haben, die zur kontralateralen Hemisphäre projizieren, wie es für die N400 Komponente der Fall ist. Hinweise auf die Existenz solcher linksseitiger Aktivität ergeben sich zudem aus den zuvor vorgestellten MEG-Studien wie z. B. in Form der M350 (Marinkovic et al., 2003).

Eine mögliche Erklärung dafür, dass bisher keine linkslateralisierten EKP-Komponenten mit posteriorer Topographie beschrieben wurden, die im zeitlichen Verlauf nach den frühen perzeptuellen Verarbeitungsprozessen eingeordnet werden können, könnte darin liegen, dass mit dem EEG, abgeleitet an der Kopfoberfläche, die überlagerte Aktivität unterschiedlicher zugrundeliegender kortikaler Quellen gemessen wird. Das gleichzeitige Auftreten multipler Komponenten, von denen dann nur die Summe ihrer Spannungsschwankungen als eine EKP-Wellenform an der Kopfoberfläche gemessen werden kann, wurde bereits vielfach diskutiert (z. B.: Fabiani, Gratton & Federmeier, 2007; Kappenman & Luck, 2012; Kok, 2001; Mecklinger, Kramer & Strayer, 1992; Wijers, Mulder, Okita & Mulder, 1989) und als *Überlagerungsproblem* bezeichnet (engl. superposition problem; Kappenman & Luck, 2012, S. 8). Im Fall von Sprachverarbeitung könnte diese Überlagerung in einerseits linkslateralisierter, vermutlich sprachspezifischer Aktivität durch andererseits bilaterale, sprachunspezifische Aktivität bestehen. Letztere dominiert hierbei möglicherweise die EKP-Wellenform und erschwert dadurch die Detektion lateralisierter Aktivität in den EKPs. Dies würde erklären, wieso diese lateralisierte Aktivität in der EKP-Literatur zu semantischer Sprachverarbeitung nicht berichtet wird.

Hinweise auf eine Überlagerung von lateralisierten und unlateralisierten EKP-Komponenten bei der visuellen Wortverarbeitung gibt eine Studie von Gibbons und Kollegen (2014). In dieser wurden Probanden gut sichtbar (1 200 ms) visuelle Wörter als Primes präsentiert. Eine Teilgruppe von Probanden, welche die Wörter (im Vergleich zu einer anderen Teilgruppe von Probanden) besonders tief verarbeitete, was aus erhöhten P1- und N1-Amplituden dieser Probanden abgeleitet wurde, zeigte eine links-temporoparietale relative Negativierung der P300-Komponente (Gibbons et al.,

2014). Bei der P300 handelt es sich, wie bereits beschrieben, um eine Komponente, die zumeist eine bilaterale Topographie aufweist und mit dem Abschluss der Stimulusverarbeitung in Verbindung gebracht wird (Donchin & Coles, 1988). Die links-temporoparietale Negativierung der P300-Komponente wurde als Verarbeitungsnegativität (Kok, 2001) interpretiert. Durch diese wird eine abschließende Verarbeitung aufgeschoben und eine weitere Stimulusverarbeitung in Regionen ermöglicht, in denen eine weitere Stimulusverarbeitung vorteilhaft sein könnte (Gibbons et al., 2014). Die links-temporoparietale Region, in der die Verarbeitungsnegativität beobachtet wurde, wurde von den Autoren mit dem Wernicke-Areal in Verbindung gebracht. Die Verarbeitungsnegativität wurde derart interpretiert, dass diese im linken temporalen Kortex eine weitergehende semantische Verarbeitung der Wörter ermöglichte (Gibbons et al., 2014).

Eine Idee, um das Problem der Überlagerung sprachspezifischer und sprachunspezifischer Prozesse zu lösen, ist die Verwendung eines Lateralisierungsmaßes, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden. Differenzansätze sind in der EKP-Forschung zur Herausarbeitung von Komponenten (Luck, 2014) wie auch in fMRT-Studien zur Herausarbeitung lateralisierter Aktivität durchaus üblich (Abbott, Waites, Lillywhite & Jackson, 2010; Seghier, 2008; Wilke & Lidzba, 2007). Hierbei werden *zum einen* Differenzen der Aktivität, die aus unterschiedlichen Aufgabenbedingungen resultiert, berechnet (z. B. zur Bestimmung der error-related negativity (ERN/Ne): Gehring, Liu, Orr & Carp, 2012; oder der MMN: Näätänen & Kreegipuu, 2012). Diese Differenz zwischen verschiedenen Aufgabenbedingungen eliminiert all solche Aktivität, die beiden Aufgabenbedingungen gemeinsam ist und erhält solche Aktivität, die wahrscheinlich auf die experimentelle Manipulation zurückzuführen ist. Umso subtiler sich hierbei die Unterschiede zwischen beiden Aufgabenbedingungen gestalten, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachtete Differenzwelle tatsächlich auf eine einzelne zugrundeliegende Komponente zurückgeht (Luck, 2014). Ein Nachteil der Differenzwellen besteht allerdings darin, dass sich insgesamt das Signal-Rausch-Verhältnis verschlechtert, da das Rauschen bei der Differenzbildung zunimmt (Luck, 2014): Egal, ob Addition oder Subtraktion, das Rauschen beider Bedingungen summiert sich auf. Unterschiede sind somit schwieriger aufzudecken. *Zum anderen* wurden auch Hemisphärendifferenzansätze bereits genutzt, um lateralisierte hemisphärenspezifische Aktivität hervorzuheben (z. B. das lateralisierte Bereitschaftspotential [LRP]: Eimer, 1998; oder die sogenannte contralateral delay activity: Vogel & Machizawa, 2004). Letzterer Ansatz wurde aber bisher nicht genutzt, um sprachspezifische Aktivität zu betrachten. Aufgrund der Evidenz aus Läsions- und Bildgebungsstudien erscheint die Anwendung eines solchen Lateralisierungsmaßes jedoch vielversprechend, um linkslateralisierte, wahrscheinlich sprachspezifische Aktivität herauszuarbeiten und bilaterale Aktivität durch die Subtraktion zu eliminieren.

Da die Befunde von Gibbons und Kollegen (2014) aus einem Zwischensubjektvergleich durch post hoc bestimmte Probandengruppen resultierten und keine aktive Manipulation der Prime-Verarbeitungstiefe durchgeführt wurde, war es das Ziel der ersten Studie dieser Dissertationsschrift lateralisierte temporoparietale semantische Sprachverarbeitung, die zeitlich vor der N400-Komponente auftritt, mit EKPs unter direkter Manipulation der semantischen Verarbeitung im Innersubjektvergleich zu untersuchen. Hierzu wurde die Aktivität aus Aufgabenbedingungen untersucht, die ein unterschiedliches Ausmaß semantischer Sprachverarbeitung erforderten. Somit sollten nicht lediglich Stimuli unterschiedlicher semantischer Kategorien, also semantische Effekte, sondern unterschiedlich tiefe semantische Verarbeitung per se kontrastiert werden. Die Aufgabenbedingungen wurden so gewählt, dass der interessierende Prozess (die Aktivierung der Bedeutung von Einzelwörtern) nicht nur in der semantischen Aufgabenbedingung auftreten konnte, sondern auch in zwei Kontrollbedingungen. Nur in der semantischen Aufgabenbedingung sollte jedoch die Aktivierung der Bedeutung zur Bestimmung der semantischen Kategorie *notwendig* sein, um die Aufgabe instruktionsgemäß zu bearbeiten. Der Vergleich dieser Aufgabenbedingungen kann somit als konservativ beschrieben werden, da Aktivität, die auf semantische Verarbeitungsprozesse zurückzuführen ist, teilweise auch in den Kontrollbedingungen erwartet werden kann, was generell das Auffinden von Unterschieden zwischen den Bedingungen erschwert.

Basierend auf den vorherigen Befunden (Gibbons et al., 2014) unter Verwendung visueller Wörter wurde hierbei erwartet, dass bei der Verarbeitung visueller Einzelwörter eine Verarbeitungsnegativität mit links-temporoparietaler Topographie und einer maximalen Amplitude ~ 300 ms nach Wortpräsentationsbeginn auftreten sollte. Diese sollte die höchste (aufgrund der negativen Polarität *negativste*) Amplitude in einer Aufgabenbedingung mit den stärksten Anforderungen an semantische Wortverarbeitung aufweisen und geringer für die Kontrollbedingungen ausfallen.

Weiterhin sollte geprüft werden, ob die lateralisierte Aktivität sprachspezifisch ist. Dies erfolgte über die Untersuchung von Zusammenhängen mit Maßen der verbalen Intelligenz. Mit zwei Folgestudien sollte zum einen die Reliabilität der linkslateralisierten Verarbeitungsnegativität sowie deren Spezifität für visuelles Wortmaterial geprüft werden. Zu diesem Zweck wurden bei gleichbleibenden Aufgabenbedingungen neben visuellen Wörtern auch Bilder sowie auditive Wörter dargeboten. Mit einer vierten Studie sollte dann geprüft werden, ob die durch das Lateralisierungsmaß herausgearbeitete Aktivität beim Erlernen von visuellen Wörtern deren Distinktheit im Lernkontext widerspiegeln kann und prädiktiv für deren spätere Erinnerung ist. Anschließend wurde in einer fünften Studie untersucht, inwiefern das Lateralisierungsmaß auch zur Untersuchung prä-semantischer Sprachprozesse im Vergleich zu den klassischen, unlateralisierten EKP-Komponenten Vorzüge aufweist (Übersicht über die fünf Studien in Tabelle 1).

2 Methode

Im Folgenden sollen EKPs, die aus dem EEG abgeleitet werden, kurz zusammengefasst werden, da es sich hierbei um die zentrale Methode der vorliegenden Arbeit handelt. In diesem Zusammenhang soll zudem auf ausgewählte methodische Ansätze zur Identifikation von EKP-Komponenten und den ihnen zugrundeliegenden Quellen eingegangen werden, insofern diese für die Studien der vorliegenden Arbeit relevant sind. Für die methodischen Details, was die Auswahl und Kontrolle, (entsprechend der aus der Literatur ableitbaren Empfehlungen) der Aufgabenbedingungen und des Stimulusmaterials, zusätzlicher psychologischer Verfahren sowie die Datenaufbereitung und Analyse betrifft, wird auf die Kurzzusammenfassungen der Studien der vorliegenden Arbeit in den Abschnitten 3.1 – 3.5 sowie insbesondere die zugehörigen Artikel verwiesen.

2.1 Elektroenzephalographie, ereigniskorrelierte Potentiale und Komponenten

Die erste Dokumentation der Aufzeichnung menschlicher gehirnelektrischer Aktivität mit dem Elektroenzephalogramm geht auf den deutschen Mediziner Hans Berger (1929) zurück (Davidson, Jackson & Larson, 2000; Luck, 2014; Pizzagali, 2007). Neben der Betrachtung von spontanen rhythmischen Oszillationen (auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden soll, der interessierte Leser wird auf Buzsáki, 2006, verwiesen), kann nach einer Mittelungsprozedur aus dem EEG auch Aktivität extrahiert werden, die in spezifischer zeitlicher Relation zu bestimmten Ereignissen steht also *ereigniskorreliert* ist. Diese werden als ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs) bezeichnet (Fabiani et al., 2007). Aufgrund der exzellenten zeitlichen Genauigkeit des EEGs hat das Interesse an der Beziehung zwischen Elektrophysiologie und psychologischen Prozessen seit Bergers ersten Veröffentlichungen nicht abgenommen. EKPs stellen mittlerweile eine der best-etablierten, non-invasiven Methoden der kognitiven Neurowissenschaften dar, wenn es um die Untersuchung der zeitlichen Abläufe von Gehirnprozessen geht (Fabiani et al., 2007; Luck, 2014).

2.1.1 Neurophysiologische Basis des Elektroenzephalogramms

Das EEG-Signal, aus dem auch die EKPs extrahiert werden bildet Spannungsverläufe an der Kopfoberfläche im Zeitverlauf ab. Hauptsächlich resultieren diese aus der Summation des postsynaptischen Signals großer Neuronenpopulationen, die synchron feuern und ein auch auf größere Distanz (d. h. an der Kopfoberfläche) messbares elektrisches Potential erzeugen (Luck, 2014; Kappenman & Luck, 2012; siehe Buzsáki, Anastassiou & Koch, 2012 für eine detaillierte Beschreibung dieser Vorgänge). Die postsynaptischen Signale resultieren hierbei aus den Vorgängen, die in jedem

einzelnen Neuron der Population vor sich gehen (Fabiani et al., 2007; Kappenman & Luck, 2012; Luck, 2014). Diese sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

Von zentraler Bedeutung sind die senkrecht zur Kortexoberfläche ausgerichteten Pyramidenzellen. Wesentliche Bestandteile dieser Pyramidenzellen sind der Zellkörper sowie die apikalen und basalen Dendriten. Die apikalen Dendriten sind in Richtung der Kopfoberfläche ausgerichtet, wohingegen die basalen Dendriten in Richtung der weißen Substanz orientiert sind. Erreicht die apikalen Dendriten ein exzitatorischer Neurotransmitter, fließen positive Ionen aus dem extrazellulären Raum um die apikalen Dendriten ins Zellinnere, sodass der extrazelluläre Raum relativ negativer wird. Gleichzeitig fließen positive Ionen aus dem Zellkörper und den basalen Dendriten, was dazu führt, dass in diesen Regionen der extrazelluläre Raum relativ positiver wird. Dieser Fluss von Ionen erzeugt einen Dipol, der eine Oberflächennegativität erzeugt. Ist das postsynaptische Signal inhibitorisch, verläuft dieser Kreislauf umgekehrt und es wird ein positives Potential an der Kopfoberfläche gemessen. Diese Polaritätsumkehrung des gemessenen Potentials kann auch aus exzitatorische Potentiale an den basalen Dendriten oder dem Zellkörper resultieren. Ein einzelner Dipol wäre jedoch noch nicht ausreichend, um ein an der Kopfoberfläche messbares Signal zu erzeugen. Hierzu ist es notwendig, dass eine große Anzahl von Neuronen mit gleicher Ausrichtung zur gleichen Zeit den gleichen Input erhält (exzitatorisch *oder* inhibitorisch) und somit individuelle, nah beieinander liegende Dipole in ihrer Summation einen übergeordneten Dipol bzw. *equivalent current dipole* (ECD) ergeben.

Die aus den Entladungsmustern der apikalen Dendriten resultierenden Spannungsschwankungen werden an der Kopfoberfläche mit Elektroden gemessen (Fabiani et al., 2007). Aus diesen Spannungsschwankungen werden auch die EKPs extrahiert. Dies ist dadurch möglich, dass jedes Ereignis einen spezifischen Spannungsverlauf evoziert, der durch die unter 2.1.2 beschriebene Mittelungsprozedur abgebildet werden kann. Die EKPs können somit als an der Kopfoberfläche gemessene Spannungsveränderungen beschrieben werden, die sensorische, kognitive, affektive und motorische Prozesse widerspiegeln können, die durch ein Reizereignis hervorgerufen wurden und somit in zeitlicher Relation zu diesem stehen (Kappenman & Luck, 2012). Jeder ECD führt zwar zu negativen und positiven Spannungen, jedoch projiziert häufig nur eine Seite des Dipols zu Positionen an der Kopfoberfläche, an der Elektroden die Spannungsschwankungen messen, wohingegen die andere Seite des Dipols zu Regionen ausgerichtet ist, an denen sich gar keine Elektroden befinden.

2.1.2 Aufzeichnung und Aufbereitung des EEGs

Die EEG-Elektroden werden nach einem bestimmten System auf dem Kopf platziert (z. B. dem Internationalen 10-20 System; Klem, Lüders, Jaspers & Elger, 1999). Dies soll die Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, mit unterschiedlichen Probanden und zwischen unterschiedlichen

Laboren vergleichbar machen (Fabiani et al., 2007). Für die Studien der vorliegenden Arbeit wurde ein 64-Kanal-EEG mit Aktivelektroden (Brain Products, Gilching, Deutschland) verwendet, das je nach Versuchssetting aus 62 Kopf- und zwei Augenelektroden (Studien 1, 2 und 5), bzw. 60 Kopf- und vier Augenelektroden (Studien 3 und 4) bestand. Die Kopfelektroden waren nach dem 10 % System (Chatrian, Lettich & Nelson, 1988) angeordnet und die Aufzeichnungswiderstände wurden mindestens unter 10 k Ω gehalten. Die Augenelektroden dienen der Aufzeichnung des Elektrookulogramms (EOG). In allen Studien wurden die Impedanzen auf systematische Unterschiede zwischen den Hemisphären geprüft, um auszuschließen, dass beobachtete EKP-Unterschiede zwischen den Hemisphären auf unterschiedlich genaue Messungen zurückzuführen sind (was aber nicht der Fall war). Zu den 60 (bzw. 62) Kopfelektroden, kommen noch eine Aufzeichnungs-Referenzelektrode und eine Erdungselektrode hinzu. Erstere dient vereinfachend gesagt der Elimination von Spannungsschwankungen, die nicht aus Gehirnaktivität resultieren und letztere vorwiegend der Elimination elektrischer Störsignale (Luck, 2014). Um außerdem eine Störung des Signals durch elektromagnetische Strahlung zu verringern, werden häufig elektromagnetisch abgeschirmte Schalldämmkabinen verwendet. Auch die Daten der im Folgenden vorgestellten Studien wurden in einer solchen aufgezeichnet. Das EEG-Signal wird durch Verstärker verstärkt und über einen Konverter mit einer bestimmten Abtastrate von einem analogen in ein digitales Signal umgewandelt. Die Abtastrate der für die Studien der vorliegenden Arbeit verwendeten Verstärker betrug 500 Hz.

Bei der Datenaufbereitung (offline) wird das Signal re-referenziert, um Artefakte bereinigt, für Augenbewegungen korrigiert und ggf. gefiltert (siehe Luck, 2014, für eine Einführung die EEG-Datenerhebung, Aufbereitung und Analyse; sowie Picton et al., 2000, für Leitlinien zur Untersuchung menschlicher Kognition mittels EKPs). Die Re-Referenzierung hat unter Umständen starke Auswirkungen auf die EKPs (Luck, 2014). Generell ist bei der Wahl der Referenzelektrode zur Offline-Re-Referenzierung zu berücksichtigen, dass solche Effekte, die sich von ihrer Lage nahe an der Referenzelektrode befinden, durch die Differenzbildung zum Signal der Referenzelektrode relativ stärker beeinflusst werden als Effekte an Elektroden, die sich weiter von der Referenzelektrode entfernt befinden.

In einigen der Studien (Studien 1 bis 3) der vorliegenden Arbeit wurde die sogenannte *Average-Referenz* für die Re-Referenzierung genutzt (Bertrand, Perrin & Pernier, 1985; Dien, 1998). Bei dieser wird das Signal aller Kopfelektroden gemittelt und als Referenz verwendet. Somit werden nicht einzelne Elektroden stärker durch die Re-Referenzierung beeinflusst als andere. Insgesamt ist aber für alle Studien der vorliegenden Arbeit zu bedenken, dass sich aus der Referenz für die lateralisierte Aktivität (d. h., die Hemisphärendifferenzkurven) keine Probleme ergeben können, da durch die Differenzbildung der Einfluss der Referenzelektrode eliminiert wird.

$$\text{Hemisphärendifferenz} = \text{Elektrode}_{\text{linksseitig}} - \text{Elektrode}_{\text{rechtsseitig}}$$

Die auf die Elektroden zurückgeführte Aktivität setzt sich aus der an den Elektroden gemessenen Aktivität (E) abzüglich der an der Referenzelektrode gemessenen Aktivität (R) zusammen (Luck, 2014). Hierdurch wird der Einfluss der Referenz eliminiert:

$$(E_{\text{linksseitig}} - R) - (E_{\text{rechtsseitig}} - R) = E_{\text{linksseitig}} - E_{\text{rechtsseitig}}$$

Für die Studien 4 und 5, in denen auch die Betrachtung unlatersierter, bekannter Komponenten von großer Bedeutung war, die durch die Verwendung einer Average-Referenz nach visueller Inspektion insofern benachteiligt wurden, als dass ihre Amplituden deutlich verringert und die Unterschiede zwischen Amplituden deutlich reduziert waren, wurde das gemittelte Signal der Mastoid-Elektroden (TP9/TP10) für die Re-Referenzierung verwendet. Die Ableitungsorte der lateralisierten EKP-Wellenformen werden im Folgenden immer nach dem Elektrodenpaar benannt, aus denen sie berechnet wurden: Die lateralisierte Wellenform, die aus der Differenz der Aktivität an Elektrode P5 abzüglich der Aktivität an Elektrode P6 berechnet wurde, wird beispielsweise als P56 bezeichnet.

Das kontinuierlich aufgezeichnete EEG wird außerdem bei der Datenaufbereitung in Segmente unterteilt und einer Baseline-Korrektur unterzogen. Für die im Folgenden berichteten Studien wurden für diese Korrektur immer die 100 ms vor dem Stimulusereignis für diese Korrektur verwendet (Kappenman & Luck, 2012; Luck, 2014). Hierbei erfolgt die Segmentierung entsprechend des Experiments in Relation zu bestimmten Ereignissen, z. B. dem Präsentationsbeginn eines Stimulus. Über eine Mittelungsprozedur, bei der das Signal über viele solcher Segmente gemittelt wird, wird das Verhältnis von ereignisbezogener Aktivität und Hintergrundrauschen verbessert (Fabiani et al., 2007; Luck, 2014). Da sich das Hintergrund-EEG unsystematisch über die Segmente verteilt, wird es durch die Mittelungsprozedur verringert. Hierdurch werden wiederum Potentiale, die systematisch in Reaktion auf das Stimulusereignis auftreten hervorgehoben (Fabiani et al., 2007; Luck, 2014). Diese Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses ist für die Extraktion von EKPs von zentraler Bedeutung, da EKPs im Gegensatz zum kontinuierlichen EEG-Signal deutlich geringere Amplituden aufweisen (wenige μV versus ca. 50 μV Fabiani et al., 2007).

2.1.3 EKP-Komponenten

Im Vergleich zu den EKPs geht die Definition von EKP-Komponenten insofern noch einen Schritt weiter, als dass den an der Kopfoberfläche gemessenen Spannungsschwankungen ein bestimmter neuronaler oder psychologischer Prozess zugeschrieben wird (Kappenman & Luck, 2012). Diese Definition ist eher abstrakt, kann aber auch näher an der experimentellen Anwendung erfolgen,

indem die Spannungsschwankungen in einen Zusammenhang mit bestimmten experimentellen Variablen gebracht werden, von denen angenommen wird, dass sie bestimmte funktionelle Anforderungen an die Versuchspersonen stellen (Luck, 2014).

EKP-Komponenten werden häufig in exogene und endogene Komponenten unterteilt, wobei erstere maßgeblich durch die physikalischen Eigenschaften eines Reizes bestimmt werden und letztere durch das Subjekt selbst, bei dem das EEG abgeleitet wird; sei es durch Interaktionen mit einem gegebenen Ereignis, einer Aufgabe oder aber auch ganz ohne äußeres Ereignis (Fabiani et al., 2007). Eine weitere Komponentenart stellen die motorischen Komponenten dar, welche Vorbereitung und Ausführung einer motorischen Reaktion widerspiegeln (Luck, 2014). Wie bereits unter 2.1.1 angedeutet, kann man nur dann mit Sicherheit Rückschlüsse über die Bedeutung der Polarität einer EKP-Komponente ziehen (exzitatorische oder inhibitorische Aktivität), wenn man mit Sicherheit sagen kann, dass die Neuronen des zugrundeliegenden ECD nahe an der Kopfoberfläche gelegen sind, sie senkrecht zur Kopfoberfläche liegen und die postsynaptischen Potentiale von den apikalen Dendriten ausgehen (Kappenman & Luck, 2012; Luck, 2014). Da diese Voraussetzungen selten gegeben sind, können anhand der Polarität einer EKP-Komponente somit zumeist keine direkten Schlüsse dahingehend gezogen werden, ob diese aus exzitatorischen oder inhibitorischen Prozessen resultiert. Allerdings fehlen oftmals die Informationen, um beurteilen zu können, dass diese Voraussetzungen gegeben sind (Luck, 2014). Die Polarität einer EKP-Komponente ist aber dennoch bedeutsam, da die meisten definierten und in der Literatur etablierten Komponenten sich bezüglich ihrer Polarität konstant verhalten (Luck, 2014).

Die meisten Komponenten werden dementsprechend nach ihrer Polarität, positiv *P* oder negativ *N*, sowie entweder nach der ordinalen Position ihrer maximalen Amplitude oder der Latenz ihrer maximalen Amplitude im EKP-Wellenformverlauf in Millisekunden benannt (Fabiani et al., 2007; Luck, 2014). So wird z. B. die erste, lokal maximale Negativität nach Beginn der Stimuluspräsentation als N1- oder N100-Komponente bezeichnet. Andere Benennungen verweisen auf funktionelle Eigenschaften der Komponenten wie das LRP (Eimer, 1998), die MMN (Näätänen & Kreegipuu, 2012) oder die ERN (Gehring et al., 2012). Zuweilen wird zur weiteren Differenzierung von Komponenten auch der Ableitungsort bei der Benennung berücksichtigt, z. B. die frontale P3 (Fabiani et al., 2007).

Insgesamt lässt die Topographie von EKP-Komponenten nur äußerst grobe Aussagen über die ihnen zugrundeliegenden Quelle zu. Dies liegt auch, wie bereits im letzten Abschnitt der Einleitung besprochen, im Überlagerungsproblem der EKP-Komponenten begründet. Auch der Umstand, dass eine spezifische Beobachtung eines EKPs aus einer Vielzahl von Quellenkonstellationen resultieren kann, was als das *inverse Problem* bezeichnet wird, ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung (Kappenman & Luck, 2012). Dennoch wird die meist reliabel auftretende Topographie von vorab

definierten Komponenten herangezogen, um diese zu identifizieren, zu definieren und teilweise auch hinsichtlich bestimmter funktioneller Aspekte zu unterscheiden, wie z. B. die P300 in die P3a und die P3b (Polich, 2007).

EKP-Komponenten können in Hinblick auf unterschiedliche Eigenschaften quantifiziert und analysiert werden (Fabiani et al., 2007). Die üblichsten sind hierbei die *maximale Amplitude*, die *Latenz* (vom Stimuluspräsentationsbeginn bis zur maximalen Amplitude oder zwischen zwei maximalen Amplituden) und die *mittlere Amplitude* in einem ausgewählten Zeitintervall (Luck, 2014): Die *lokale maximale Amplitude* wird in der Regel definiert als die dem Betrag nach höchste Amplitude in einem ausgewählten Zeitfenster an bestimmten Elektroden, in dem die benachbarten Zeitpunkte ihres Betrags nach geringere Spannungen aufweisen. Weiterhin kann die mittlere EKP-Amplitude in einem definierten Zeitfenster an spezifischen Elektroden bestimmt werden. Außerdem kann in Abhängigkeit von der Fragestellung auch die Latenz der lokalen maximalen Amplitude erfasst werden. Die Quantifizierung von EKPs durch die mittlere Amplitude in einem festgelegten Zeitintervall wurde auch in den Studien der vorliegenden Arbeit vorgenommen. Sie stellt eine viel genutzte und zumeist bevorzugte Methode dar, um EKP-Komponenten als sich zeitlich erstreckende Potentiale zu erfassen (Luck, 2014).

Die Auswahl der Analyseelektroden oder Elektroden-Cluster kann basierend auf theoretischen Annahmen sowie den Kenntnissen aus vorhergehenden Studien erfolgen. Ein häufiges Vorgehen für die Wahl der Analyseelektroden ist hierbei die visuelle Inspektion, bei der, basierend auf den Erwartungen für die Komponenteneigenschaften, die EKPs inspiziert und die Elektroden ausgewählt werden. Im Falle der Quantifizierung über die mittlere Amplitude in einem bestimmten Zeitintervall, werden die Grenzen des Zeitintervalls häufig über einen Differenzkurvenansatz gebildet, bei dem die Differenz der Aufgabenbedingungen gebildet und das Analysezeitfenster entsprechend des maximalen Unterschiedes gewählt wird. Dieses Vorgehen maximiert die Wahrscheinlichkeit des Auffindens von Unterschieden.

Insgesamt bleibt jedoch das Problem der Überlagerung von Komponenten bestehen, was deren Quantifizierung erheblich erschwert. Zwei weitere Ansätze um das Überlagerungsproblem zu reduzieren sind neben dem in der Einleitung eingeführten Differenzansatz, die Current Source Density (CSD-) Transformation und die Hauptkomponentenanalyse, die in den folgenden beiden Unterkapiteln kurz vorgestellt werden sollen, da sie teilweise in den Studien der vorliegenden Arbeit eingesetzt wurden (Studie 1: Hauptkomponentenanalyse, Studie 2: CSD).

2.2 Current Source Density Transformation

Bei der CSD-Transformation wird in zwei Schritten die Spannungsverteilung auf der Kopfhaut in eine Stromdichteverteilung übersetzt (Perrin, Pernier, Bertrand & Echallier, 1989). Dieses Vorgehen, soll im Folgenden basierend auf einer Einführung in die CSD-Transformation von Luck (2014) vereinfachend beschrieben werden: Die Transformation der mit dem EEG gemessenen Spannungsverteilung in eine Stromdichteverteilung erfolgt durch die 2-fache Ableitung der Spannung. Für die erste Ableitung wird zunächst die Spannungsdifferenz jeder einzelnen Elektrode zur mittleren Spannung ihrer Nachbarelektroden bestimmt und der Spannungswert der jeweiligen Elektrode durch diesen Wert ersetzt. Für die zweite Ableitung wird dann mittels eines Interpolations-Algorithmus eine kontinuierliche Spannungsverteilung geschätzt, mit der wiederum analog zur ersten Ableitung die zweite Ableitung gebildet wird. Die Güte des Interpolations-Algorithmus ist abhängig von der Anzahl der Elektroden, da dieser umso genauer wird, je mehr Daten von Elektroden für die Schätzung zur Verfügung stehen. Übereinstimmend wird davon ausgegangen, dass Elektroden-Sets ab 32 Kanälen bereits eine brauchbare Schätzung ermöglichen. Da äußere Kopfelektroden zur Außenseite keine Nachbarelektroden aufweisen, ist die Schätzung hier ungenauer. Basierend auf dem gleichen bereits für die Hemisphärendifferenzen erläuterten Prinzip, ergeben sich auch für die CSD-Transformation keine Probleme bzgl. der Referenzelektrode. Durch die Differenzbildung zwischen jeder Kopfelektrode und dem gemittelten Signal ihrer Nachbarelektroden entsteht ein referenzfreies Signal.

Durch die Herausarbeitung von Unterschieden zwischen Elektroden akzentuiert die CSD-Transformation die Topographie von EKP-Komponenten. Dies verbessert die Möglichkeit zeitlich überlappende EKP-Komponenten topographisch voneinander zu separieren. Gleichzeitig wird jedoch der Einfluss von weit von der Kopfoberfläche entfernten Dipolen, die üblicherweise eine weitläufige EKP-Wellenformverteilung über die Kopfoberfläche zeigen (wie z. B. die P3 Komponente), stark reduziert. Dies kann dann von Nachteil sein, wenn man sich genau für die EKP-Komponenten eben solcher Dipole interessiert. Will man jedoch die Anzahl überlappender Komponenten reduzieren kann sich diese Eigenschaft der CSD-Transformation als sehr nützlich erweisen.

Letztere Eigenschaft der CSD-Transformation könnte auch für die Untersuchung sprachbezogener Aktivität in temporoparietalen Regionen interessant sein, da basierend auf der Studie von Gibbons und Kollegen (2014) angenommen werden kann, dass bei der Verarbeitung der Bedeutung von Wörtern insbesondere die Überlagerung mit der P3-Komponente kritisch ist. Möglicherweise war es für die Beobachtung einer relativen links-temporoparietalen Negativität in dieser Studie besonders vorteilhaft, dass die EKP-Inspektion und Analyse auf CSD-transformierten EKP-Wellenformen basierte.

2.3 Hauptkomponentenanalyse bei EKPs

Eine weitere Methode zur Quantifizierung von EKPs, die insbesondere zur Bestimmung der relativen Anteile überlappender EKP-Komponenten von Nutzen sein kann, ist die Hauptkomponentenanalyse (englisch principal component analysis [PCA]; Luck, 2014). Für eine ausführliche und detaillierte Einführung in diese Analyseverfahren bei EKPs wird auf Übersichtsarbeiten z. B. von Dien (2012) oder Kayser und Tenke (2003) verwiesen.

Die PCA bietet im Falle von EKPs, wie in anderen Kontexten auch, die Möglichkeit der Datenreduktion und Vereinfachung der Datenstruktur und stellt eine Form der datengetriebenen EKP-Komponentenauswahl dar (Kayser & Tenke, 2003). Das Grundprinzip ist hierbei, die EKP-Wellenformen, alle bestehend aus einer, zu diskreten Zeitpunkten auftretenden endlichen Anzahl von Oberflächenpotentialen, in eine Linearkombination von Faktor-Scores und Faktorladungen zu zerlegen (Kayser & Tenke, 2003). Es kann zwischen zwei Arten von PCAs unterschieden werden: der zeitlichen (temporal) und der räumlichen (spatial) PCA (Picton et al., 2000). Bei der zeitlichen PCA gehen die Messzeitpunkte als Variablen in die Analyse ein. Die PCA resultiert in Komponenten die Wellenformen in einer zeitlichen Dimension darstellen. Zusätzlich ist eine topographische Ansicht möglich. Bei der räumlichen PCA werden die Elektroden als Variablen eingeschlossen. Die resultierenden Komponenten sind Topographien, bzw. Amplitudenschwankungen über Elektroden (Picton et al., 2000). Zur Identifikation von EKP-Komponenten wird generell die zeitliche PCA empfohlen, sofern nicht angenommen wird, dass bei den EKP-Komponenten erhebliche Latenzverschiebungen vorliegen (Dien, 2012). Eine solche wurde auch in der ersten Studie der vorliegenden Arbeit zur Identifikation zugrundeliegender Komponenten angewendet. Für die Faktorenauswahl (bzw. Komponentenauswahl) können unterschiedliche Kriterien angelegt werden (z. B. Bestimmung des Knickpunkts im scree plot, Eigenwert > 1 ; Field, 2009) und es können ebenso Faktorrotationen vorgenommen werden, um die Faktorenlösung zu vereinfachen und im Idealfall genau einen Faktor je EKP-Komponente zu erhalten (Dien, 2012). Die Entscheidung, ob ein Faktor eine EKP-Komponente widerspiegelt, ist hierbei sehr komplex (Hilfestellung kann hier ein detailliertes Tutorial von Dien, 2012, geben).

Zusammenfassend ist die wichtigste Eigenschaft der PCA im Zusammenhang mit EKPs für die vorliegende Arbeit die Möglichkeit, große Datenmengen, deren Eigenschaften aus Messzeitpunkt, Ableitungskanal, Proband und experimenteller Bedingung resultieren, zu strukturieren und zu vereinfachen. So ist es möglich separate Komponenten vorzuschlagen, die möglicherweise in der EKP-Wellenform überlagert und deshalb nicht einfach per visueller Inspektion identifizierbar sind.

2.4 Standardized Low-Resolution Electromagnetic Tomography (sLORETA)

Die *Standardized Low-Resolution Electromagnetic Tomography* (sLORETA; Pascual-Marqui, 2002) ist eine von vielen Quellenlokalisationsmethoden, die zur Lösung des inversen Problems bei EEG-Daten herangezogen werden können, und stellt eine Weiterentwicklung der *Low-Resolution Electromagnetic Tomography* (LORETA) dar (Pascual-Marqui, Michel & Lehmann, 1994; Pizzagali, 2007). Zwei Grundannahmen der LORETA sind hierbei, dass benachbarte Neuronen synchron aktiviert sind (wie es auch die Voraussetzung für einen ECD ist) wobei sich ihre Orientierung nur graduell verändert und dass die an der Kopfoberfläche gemessenen Spannungsveränderungen im Wesentlichen aus der grauen Substanz resultieren (Pizzagali, 2007). Sehr vereinfachend beschrieben wird bei der LORETA, basierend auf dem mit den Elektroden gemessenen Signal, eine Aktivitätsverteilung geschätzt, die bestmöglich die an der Kopfoberfläche gemessenen Spannungsverteilungen, sogenannte current sources erklären kann. Die passendste Aktivitätsverteilung wird über die Minimierung der Abweichung der geschätzten Verteilung von der zweiten Ableitung der current sources bestimmt. Bei der standardisierten LORETA basiert die Schätzung der passendsten Aktivitätsverteilung hierbei auf der standardisierten Stromdichte (Pascual-Marqui, 2002). Das zugrunde gelegte Gehirnmodell ist auf die kortikale graue Substanz und die Hippocampi beschränkt (Pizzagali, 2007). Die LORETA-Methode hat sich gegenüber einigen anderen Ansätzen aufgrund geringer Lokalisationsfehler in Simulationsstudien als vorteilhaft erwiesen (Fuchs, Wagner, Köhler & Wischmann, 1999; Pascual-Marqui, 1999). Auch die Validierung der mit LORETA geschätzten Verteilungen anhand eines Vergleiches mit den Befunden aus funktionellen Bildgebungsstudien bei gleicher experimenteller Manipulation (Kreuz-Modalitäts-Studien) fällt positiv aus (Pizzagali, 2007). Allerdings birgt das Verfahren auch Nachteile. Zu nennen sind hier das eher grobe Kopfmodell, die schlechte Auflösung für tiefer gelegene Aktivitätsquellen, und die Unfähigkeit räumlich sehr nah beieinander liegende Quellen separat abzubilden (Pizzagali, 2007).

Insgesamt wird der methodische Ansatz der (s)LORETA, die eine grobe Lokalisation der Quellen von EKP-Komponenten erlaubt, aufgrund der guten Schätzungen in Simulationsstudien sowie den Validitätshinweisen aus Kreuz-Modalitäts-Studien als interessant eingeschätzt. Er wird daher in Studie 1 der vorliegenden Arbeit als konvergente Evidenz für eine oberflächliche Quelle der erwarteten linkshemisphärischen, temporoparietalen EKP-Komponente bei semantischer Sprachverarbeitung herangezogen.

3 Studien

Im Folgenden sollen die empirischen Studien der vorliegenden Dissertation vorgestellt werden (Übersicht über die Originalartikel in Tabelle 1). Die ersten drei Studien befassen sich mit der Etablierung einer unter Verwendung des unter 1.3 eingeführten Lateralisierungsmaßes gewonnenen EKP-Komponente semantischer Sprachverarbeitung. Diese wurde in allen drei Studien wiederholt mit visuellen Einzelwörtern untersucht. Zusätzlich wurde ihr Auftreten in den Studien 2 und 3 auch bei der Verarbeitung von Bildstimuli sowie auditiven Einzelwörtern exploriert. In Studie 4 wird die Komponente auf ihre Fähigkeit geprüft die semantische Verarbeitung von physikalisch-distinkten Einzelwörtern (Distinktheit basierend auf Schriftgröße und Schriftart) in einem Wortlistenkontext widerzuspiegeln sowie hinsichtlich ihrer Fähigkeit die spätere Erinnerung von Einzelwörtern vorherzusagen betrachtet. In Studie 5 wird das Lateralisierungsmaß auf seine allgemeine Fähigkeit geprüft sprachbezogene lateralisierte Aktivität, in diesem Fall prä-semantische Verarbeitung, zu reflektieren. Hierzu wurde ein Vergleich mit den klassischen, aus der Literatur bekannten und größtenteils in der Einleitung beschriebenen EKP-Komponenten vorgenommen.

Tabelle 1

Übersicht der Artikel, die der vorliegenden Dissertationsschrift zugrunde liegen

Studie	Referenz
1	Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (2016). A brain electrical signature of left-lateralized semantic activation from single words. <i>Brain and Language</i> , 157-158, 35-43. http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2016.04.009
2	Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (2018). The posterior semantic asymmetry (PSA): An early brain electrical signature of semantic activation from written words. <i>Brain and Cognition</i> , 125, 53-60. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.05.011
3	Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (in press). The posterior semantic asymmetry (PSA) - Specific to written not auditory semantic word processing. <i>Experimental Brain Research</i> . https://doi.org/10.1007/s00221-018-5379-z
4	Koppehele-Gossel, J., Khosrowtaj, Z. & Gibbons, H. (2018). <i>Effects of distinctiveness and memory on lateralized and unlateralized brain-electrical activity during visual word encoding.</i> Manuscript submitted for publication.
5	Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (in press). Lexical processing as revealed by lateralized event-related brain potentials. <i>Journal of Psychophysiology</i> . https://doi.org/10.1027/0269-8803/a000218

Anmerkungen. Die Originalartikel sind der vorliegenden Arbeit beigelegt.

3.1 Studie 1: Semantische Verarbeitung visueller Einzelwörter – die Entdeckung der posterioren semantische Asymmetrie

Läsions- und Bildgebungsstudien legen nahe, dass semantische Sprachverarbeitung maßgeblich, wenn auch nicht ausschließlich, auf Aktivität im linken temporalen Kortex beruht (z. B. Binder et al., 2009; Dronkers et al., 2004; Price, 2000). Mit EEG-Studien unter Verwendung von EKPs, die sich vor allem durch ihre hervorragende zeitliche Auflösung auszeichnen (Fabiani et al., 2007; Luck, 2014; Picton et al., 2000), wurde bisher keine direkte Evidenz für frühe, links-temporoparietale semantische Sprachverarbeitung erbracht. Als frühe linkslateralisierte sprachbezogene Komponente wurde zwar die N170-Komponente berichtet, diese wird aber als Indikator perzeptueller Eigenschaften bei der visuellen Wortverarbeitung interpretiert (Bentin et al., 1999; Maurer et al., 2005; Rabovsky, Sommer & Abdel Rahman, 2012; Simon et al., 2004). Semantische Sprachverarbeitung, d. h. solche, die über Worthäufigkeits- oder Kategorieneffekte hinausgeht, wurde bisher im Wesentlichen anhand der zentroparietalen N400-Komponente untersucht, die eine bilaterale Topographie aufweist und funktionell mit semantischer Integration in Verbindung gebracht wird (Kutas & Federmeier, 2011; Kutas & Hillyard, 1980). Eine mögliche Erklärung für die Divergenz der Befunde der unterschiedlichen methodischen Ansätze könnte, wie bereits ausführlich in Kapitel 1.3 erläutert, das Überlagerungsproblem bei EKP-Komponenten darstellen (Kappenman & Luck, 2012; Luck, 2014). Dieses kann möglicherweise durch die Verwendung eines neuen Lateralisierungsmaßes, gewonnen aus der Differenz linksseitiger abzüglich rechtsseitiger Aktivität homologer Elektroden, reduziert werden.

Basierend auf dem Befund einer links-temporoparietalen Verarbeitungsnegativität bei semantisch tieferer Verarbeitung (jedoch im Zwischensubjektvergleich und ohne direkte experimentelle Manipulation; Gibbons et al., 2014), war es das Ziel von Studie 1, linkslateralisierte semantische Sprachverarbeitung über Aufgabenbedingungen zu manipulieren und im Innersubjektvergleich unter Zuhilfenahme von EKPs zu untersuchen. Durch die Verwendung des Lateralisierungsmaßes sollte insbesondere linkslateralisierte, wahrscheinlich sprachbezogene Aktivität herausgearbeitet und auch in den EKP-Wellenformen transparent gemacht werden. Erwartet wurde analog zu Gibbons und Kollegen (2014) das Auftreten einer links-temporoparietalen relativen Negativität mit einem Peak um 300 ms mit der stärksten Ausprägung in einer semantischen Aufgabenbedingung im Vergleich zu zwei Kontrollbedingungen.

Von 40 rechtshändigen Studierenden (31 weiblich) der Universität Bonn mit Deutsch als Muttersprache wurde hierzu ein 64-Kanal-EEG abgeleitet, während diese drei blockweise vorgegebene Aufgabenbedingungen bearbeiteten. Als erstes wurden die Probanden instruiert, die Bildschirmmitte zu fixieren, wobei auf dieser visuelle Wörter eingeblendet wurden (Präsentationsdauer: 1 500 ms). Den Probanden wurde instruiert, die präsentierten Wörter lediglich

zu betrachten, da es sich um eine Kalibrierungsphase für das EEG handele. Diese Kontrollbedingung wird im Folgenden als *Formbedingung* bezeichnet, da nur die visuelle Wortform verarbeitet werden sollte. Die zweite Kontrollbedingung bestand darin, die präsentierten Wörter innerlich zu benennen (*Artikulationsbedingung*). In beiden Kontrollbedingungen war es durchaus möglich, dass auch die Bedeutung der Wörter aktiviert wurde. Da dies jedoch nicht notwendig wäre, um die Aufgaben angemessen zu bearbeiten, werden beide Bedingungen als konservative Kontrollbedingungen angesehen. Die dritte Aufgabe (*Bedeutungsbedingung*) bestand darin diejenigen Wörter zu zählen, welche Tiere bezeichneten. Diese Instruktion sollte es notwendig machen, für jedes Wort dessen Bedeutung (bzw. Bedeutungskategorie) zu aktivieren, um entscheiden zu können, ob das Wort gezählt werden muss oder nicht⁵. Die EKPs von Versuchstrials, in denen Wörter präsentiert wurden, die ein Tier beschreiben, wurden für alle drei Blöcke von den Analysen ausgeschlossen (12 Tierworttrials von insgesamt 72 Trials je Block). Nach dem Computer-Experiment wurde den Probanden der Mehrfachwahl-Wortschatztest zur Bearbeitung vorgegeben (MWT-B; Lehrl, 2005). Dieser liefert ein Maß der allgemeine Intelligenz, jedoch vermutlich vor allem einen Indikator für den Umfang des Wortschatzes von Personen.

Wie erwartet trat in Reaktion auf die präsentierten Wörter eine deutlich linkslateralisierte temporoparietale Negativität auf, die negativere Amplituden an Elektroden der linken im Vergleich zur rechten Kopfhälfte zeigte. Die Bildung des Lateralisierungsmaßes, separat für jede Aufgabe, erbrachte eine klar erkennbare, komponentenartige Wellenform zwischen 230 und 380 ms für vier temporoparietale Elektrodenpaare (TP7-TP8, CP5-CP6, P7-P8, P5-P6; Abbildung 1 B). Diese zeigte eine Abstufung ihrer Amplitude in Abhängigkeit von der Aufgabenbedingung. Diese konnte durch die Analyse des Faktors Aufgabe für die gemittelte Aktivität der vier Elektrodenpaare in einem Zeitfenster von 230-380 ms mit einem signifikanten Haupteffekt bestätigt werden, $F(2,78) = 9.07$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .19$ (Abbildung 1 C). Die Amplitude aus der Bedeutungsbedingung war signifikant negativer als die Amplituden aus den beiden anderen Aufgabenbedingungen, alle $t(39) \geq 3.32$, alle $ps \leq .003^6$, wohingegen letztere sich nicht signifikant voneinander unterschieden, $t(39) = 1.37$, $p = .177$. Kontrollanalysen mit den unlateralisierten EKPs (Abbildung 1 A) im gleichen Zeitfenster und unter Berücksichtigung der gleichen Elektroden ergaben, dass der Aufgabeneffekt auf Aktivität linkshemisphärischer Elektroden zurückzuführen ist.

Eine temporale PCA ergab eine Dreifaktorlösung für die EKPs aller drei Aufgabenbedingungen, wobei die erste Komponente ihrer zeitlichen Erstreckung und Topographie zufolge die P300 und die zweite die N170 widerspiegelte. Die dritte Komponente entsprach in ihrer zeitlichen Verteilung und ihrer

⁵ Die Reihenfolge der letzten beiden Aufgabenbedingungen, bei denen die Wörter aktiv verarbeitet werden mussten, war über die Probanden ausbalanciert.

⁶ Falls nicht anders berichtet, wurden alle t -Tests zu Studie 1 zwei-seitig getestet. Es wurde eine p -Wert-Adjustierung nach Bonferroni durchgeführt und die angepassten p -Werte berichtet.

Topographie genau der Komponentenstruktur in den lateralisierten EKPs (zwischen 230 und 380 ms) sowie den Befunden von Gibbons und Kollegen (2014). Hierbei bestand aber bemerkenswerterweise keine Übereinstimmung mit einem Peak in den unlateralierten (Original-) EKP-Wellenformen (Abbildung 1 A). Auch eine Quellenanalyse mit sLORETA (Pascual-Marqui, 2002) resultierte in einer links-temporoparietalen Quelle (BA 39) der semantischen Aktivität.

Weiterhin wurde der bedeutungsspezifische Anteil der Komponente aus der Differenz zwischen der Bedeutungs- und der Artikulationsbedingung berechnet (Abbildung 1 C [graue Fläche zwischen der schwarzen und der roten durchgezogenen Wellenform] und 1 D). Durch diese Differenzbildung sollte Aktivität eliminiert werden die beiden Bedingungen gemeinsam ist (z.B. solche, die auf die Wortformanalyse, phonologische Analyse und die Aktivierung des Eintrags im mentalen Lexikon zurück zu führen ist) und nur Aktivität erhalten bleiben, die den semantikspezifische Anteil der Aktivität in der Bedeutungsbedingung widerspiegelt. Der beobachtete bedeutungsspezifische Amplitudenanstieg wies einen signifikanten Zusammenhang mit der Leistung im MWT-B (Lehrl, 2005) auf, $r(39) = .35, p = .030$: Aufgrund der negativen Amplitude der Komponente ist dieser derart zu interpretieren, dass Probanden mit höherer verbaler Intelligenz einen geringeren Anstieg der Komponente von der Artikulations- zur Bedeutungsbedingung aufwiesen. Dies könnte als Hinweis darauf interpretiert werden, dass die Komponente erstens im Zusammenhang mit sprachlicher Verarbeitung steht und zweitens wahrscheinlich den Aufwand der semantischen Aktivierung bei der Verarbeitung visueller Einzelwörter reflektiert. Dies weist auf die Validität der lateralisierten EKP-Komponente als Indikator sprachspezifischer Aktivität hin.

In Studie 1 konnte somit mithilfe von EKPs eine linkslateralisierte, relative Negativität mit einer maximalen Amplitude um 300 ms und der gleichen temporoparietalen Topographie gezeigt werden, wie sie aufgrund der Befunde von Gibbons und Kollegen (2014) erwartet worden war (Abbildung 1 B, C und D). Diese Komponente war erst nach Anwendung eines Lateralisierungsmaßes klar erkennbar (Vergleich Abbildung 1 A und B). Dies verdeutlicht den Nutzen eines derartigen Maßes für die Transparentmachung lateralisierter Aktivität, die ansonsten durch das Überlagerungsproblem in den unlateralierten EKPs leicht übersehen werden könnte. Bemerkenswerterweise wurde die lateralisierte Komponente auch von einer PCA nahegelegt und eine links-temporale Quelle basierend auf einer sLORETA vorgeschlagen. Dies stimmt mit den Befunden aus Bildgebungsstudien zur semantischen Verarbeitung visueller Einzelwörter überein. Aufgrund ihres spezifischen Anstiegs in einer Aufgabe mit semantischen Anforderungen und einer vorgeschlagenen Quelle im linken temporoparietalen Kortex wurde die Komponente als *posteriore semantische Asymmetrie (PSA)* benannt.

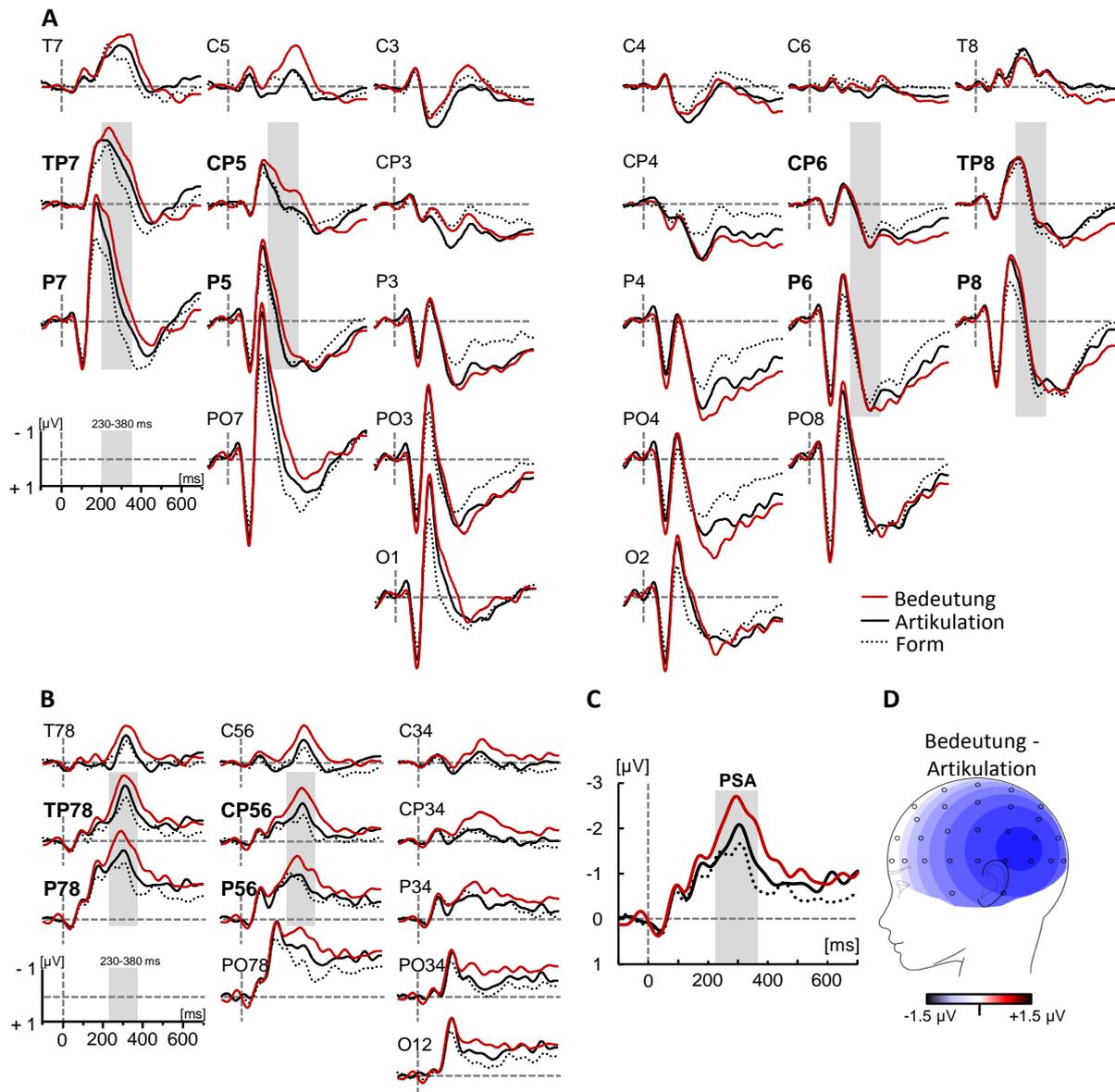


Abbildung 1. **A** Über alle Probanden gemittelte, unlateralsierte EKP-Wellenformen und **B** lateralsierte EKP-Wellenformen (gewonnen aus der Subtraktion rechtseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden), separat für die drei Aufgabenbedingungen. Der grau unterlegte Bereich in A, B und C stellt das Analysezeitfenster (230-380 ms) dar. **C** Gemittelte, lateralsierte EKP-Wellenformen (TP7-TP8, CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6), separat für die drei Aufgabenbedingungen. Der graue Bereich zwischen der schwarzen durchgezogenen und der roten Wellenform stellt den bedeutungsspezifischen Anteil der PSA dar. **D** Topographische Ansicht des bedeutungsspezifischen Anteils der posterioren semantischen Asymmetrie (230-380 ms nach Wortbeginn).

3.2 Studie 2: Semantische Verarbeitung visueller Einzelwörter und Bilder – Die PSA als Maß amodaler semantischer Verarbeitung?

Studie 2 stellt eine Replikation und Erweiterung der ersten Studie dar. Zum einen sollte die PSA für visuell präsentierte Wörter sowie der Zusammenhang ihres bedeutungsspezifischen Anstiegs mit

verbaler Intelligenz repliziert werden. Zum anderen sollte untersucht werden, ob die PSA spezifisch für visuelles verbales Material ist oder bereits amodale semantische Aktivität widerspiegelt (Binder et al., 2009; Ganis, Kutas & Sereno, 1996). Diese Fragestellung wurde bei ansonsten gleichen Aufgabenbedingungen durch die zusätzliche Präsentation von Strichzeichnungen operationalisiert. Zudem sollte der spezifische Zusammenhang mit verbaler Intelligenz weitergehend untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden ein zweites Maß für verbale Intelligenz (Analogien, Untertest 2 des IST-2000R; Amthauer, Brocke, Liepmann & Beauducel, 2001) sowie ein Maß nonverbaler Intelligenz (Matrizen, Untertest 9 des IST-2000R; Amthauer et al., 2001) zur Bearbeitung vorgegeben. Anhand dieser zusätzlichen Maße war es möglich zu prüfen, inwiefern Zusammenhänge zwischen der bedeutungsspezifischen PSA-Erhöhung und Intelligenz spezifisch für verbale Intelligenztests sind oder ebenfalls für Maße nonverbaler Intelligenz auftreten.

Das Vorgehen in Studie 2 entsprach genau dem von Studie 1, mit dem einzigen Unterschied, dass innerhalb jeder Aufgabenbedingung blockweise zusätzlich Bilder mit Zeichnungen von Objekten (Snodgrass & Vanderwart, 1980) präsentiert wurden. Die Abfolge, ob zunächst Wörter oder Bilder präsentiert wurden, wurde über die Teilnehmer ausbalanciert, für den einzelnen Teilnehmer aber über alle Aufgabenbedingungen hinweg gleich gehalten. Eine weitere methodische Besonderheit, welche die EKP-Aufbereitung betrifft, bestand darin, dass alle Analysen mit CSD-transformierten EKP-Wellenformen durchgeführt wurden. Diese erlauben anders als untransformierte EKP-Wellenformen eine topographische Akzentuierung von EKP-Komponenten. Von 42 rechtshändigen Studierenden (26 weiblich) der Universität Bonn (die nicht an Studie 1 teilgenommen hatten) mit Deutsch als Muttersprache wurde während der Bearbeitung der Aufgaben ein 64-Kanal-EEG abgeleitet.

Für *visuell präsentierte Wörter* konnte die PSA auch bei Analyse der CSD-transformierten EKPs im gleichen Zeitfenster (230-380 ms) mit einer maximalen Amplitude um 300 ms repliziert werden⁷. Die PSA war allerdings nur an drei (CP5-CP6, P7-P8, P5-P6) der vier ursprünglichen PSA-Elektrodenpaare deutlich erkennbar (Abbildung 2 B). Diese Abweichung ist vermutlich auf die Eigenschaft der CSD-Transformation zurück zu führen, Komponenten topographisch zu akzentuieren. Im Zeitfenster 230-380 ms nach Wortbeginn ergab sich ein signifikanter Effekt der Aufgabenbedingung, $F(2, 82) = 12.86$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .24$. Wie schon in der Originalstudie bestand dieser darin, dass die PSA-Amplitude in der Bedeutungsaufgabe signifikant negativer ausfiel als in beiden anderen Aufgabenbedingungen, alle $t(41) \geq 3.36$, alle $ps \leq .003$ ⁸, wohingegen sich diese nicht signifikant in ihren Amplituden unterschieden, $t(41) = 1.99$, $p = .159$, zweiseitig-getestet (Abbildung 2 C). Dieser Aufgabeneffekt

⁷ Analoge Analysen mit den nicht-CSD-transformierten EKPs ergaben das gleiche Ergebnismuster.

⁸ Aufgrund der gerichteten Annahmen hinsichtlich der Aufgabenunterschiede bei den CSD-transformierten EKPs in Reaktion auf visuelle Wörter wurde bei den t -Tests und Korrelationen einseitig getestet, die t -Tests aufgrund der multiplen Vergleiche jedoch Bonferroni-korrigiert.

resultierte, wie schon in Studie 1, aus einem signifikanten Aufgabeneffekt an linksseitigen, nicht aber rechtsseitigen Elektroden (Abbildung 2 A).

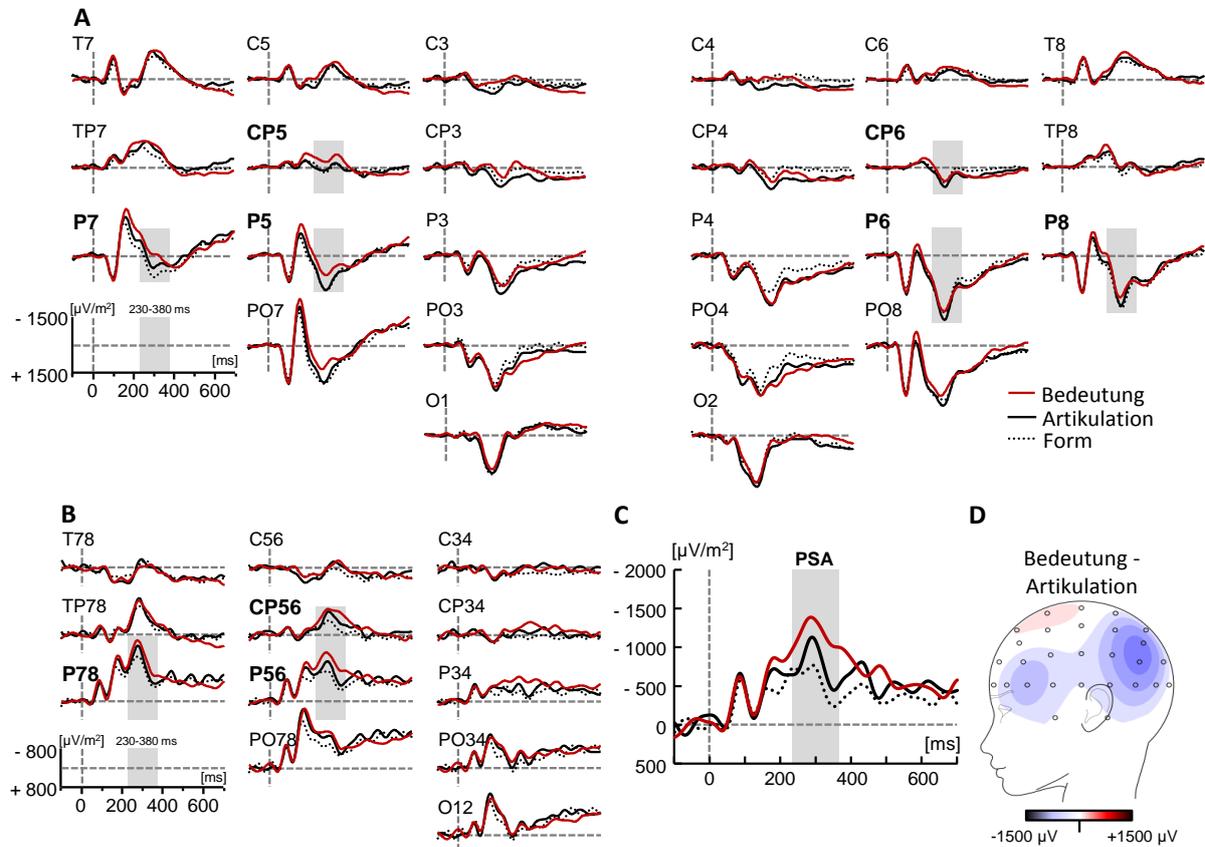


Abbildung 2. **A** Über alle Probanden gemittelte, unlaterale CSD-transformierte EKP-Wellenformen in Reaktion auf visuelle Wörter, separat für die drei Aufgabenbedingungen. Der grau unterlegte Bereich in A, B und C stellt das Analysezeitfenster (230-380 ms) dar. **B** Lateralisierte Wellenformen gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitigen CSD-transformierten EKPs homologer Elektroden. **C** Gemittelte, lateralisierte EKP-Wellenformen (CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6), separat für die drei Aufgabenbedingungen. Die grau unterlegte Fläche zwischen der durchgezogenen schwarzen und der roten Wellenform spiegelt den bedeutungsspezifischen Anteil der PSA wider. **D** Topographische Ansicht des bedeutungsspezifischen Anteils der PSA (230-380 ms nach Stimulusbeginn).

Auch der Zusammenhang des bedeutungsspezifischen Anteils der PSA (Abbildung 2 D) zum MWT-B konnte repliziert werden, $r_s(41) = .37, p = .010^9$ und es trat zusätzlich ein Zusammenhang zum Analogien-Test auf, $r_s(41) = .32, p = .022$. Zum Matrizen-Test ergab sich kein signifikanter Zusammenhang, $r_s(41) = .05, p = .375$. Der Zusammenhang zwischen dem bedeutungsspezifischen PSA-Anstieg und einem aggregierten Score aus beiden sprachbezogenen Intelligenzmaßen, $r_s(41) = .44, p = .003$, blieb auch dann noch bestehen, wenn dieser um den Einfluss nonverbaler Intelligenz in einer Partialkorrelation bereinigt wurde, $r_s(41) = .43, p = .003$. Der replizierbare Zusammenhang

⁹ Da die Variablen teilweise nicht normalverteilt waren, wurden non-parametrische Korrelationen (Spearman's-Rho, r_s) berechnet.

zwischen dem bedeutungsspezifischen Anstieg der PSA und verbaler Intelligenz ist somit auf ein weiteres Maß für sprachliche Intelligenz erweiterbar und zudem unabhängig vom Einfluss nonverbaler Intelligenz.

Für Bilder zeigte sich bei gleichen Aufgabenbedingungen keine PSA an denselben Elektroden und im gleichen Zeitfenster mit vergleichbaren Amplitudenabstufungen (Abbildung 3 B und C). Die PSA scheint somit keine amodale semantische Aktivität widerzuspiegeln sondern vielmehr spezifisch für sprachliches Material aufzutreten. In einem etwas breiteren Zeitfenster (230-480 ms) und beschränkt auf die Aktivitätsdifferenz für das Elektrodenpaar CP5 und CP6 (Abbildung 3 B), trat für Bildmaterial ein signifikanter Effekt der Aufgabe, $F(2, 82) = 25.27, p < .001, \eta_p^2 = .38$, aber auch der Hemisphäre, $F(1, 41) = 7.32, p = .010, \eta_p^2 = .15$, sowie eine Interaktion beider Faktoren auf, $F(2, 82) = 13.00, p < .001, \eta_p^2 = .24$. Zwar zeigte sich in den lateralisierten EKPs in Reaktion auf Bilder die negativste Amplitude ebenfalls in der Bedeutungsbedingung. Dieser Befund resultierte aber aus rechtsseitig im Vergleich zu linksseitig positiveren Amplituden für die Bedeutungsbedingung, $t(41) = 4.96, p < .001$; und nicht wie im Falle sprachlichen Materials aus einer verstärkten linksseitigen Aktivierung (Abbildung 3 A und 4). Dies legt nahe, dass es sich bei dem hier beobachteten Effekt um das Resultat von Variationen anderer Komponente als der PSA handelt.

Insgesamt geben die Ergebnisse von Studie 2 ebenfalls Hinweise auf eine Verarbeitungsnegativität mit linksseitigem temporoparietalen Ursprung hin, deren Amplitude das Ausmaß der semantischen Aufgabenanforderungen widerspiegelt. Diese trat im gleichen Zeitfenster wie bereits in Studie 1 berichtet mit einer maximalen Amplitude um 300 ms auf (Abbildung 2 C). Die Replikation aller Befunde mit CSD-transformierten EKPs für visuell präsentierte Wörter ist keineswegs trivial, da sowohl die CSD-Transformation als auch die Berechnung des bedeutungsspezifischen Anstiegs auf Differenzbildungen beruhen (z. B. zwischen Elektroden, zwischen Aufgabenbedingungen), was immer einen Nachteil für die Reliabilität impliziert. Dass der Zusammenhang zwischen dem bedeutungsspezifischen PSA-Anstieg und verbaler Intelligenz bei CSD-transformierter EKPs trotz einer dreifachen Differenzbildung (zwischen Nachbarelektroden, zwischen homologen Elektroden beider Kopfhälften und zwischen Aufgabenbedingungen) repliziert werden konnte, weist darauf hin, dass durch die Differenzbildung tatsächlich, wie theoretisch intendiert, eine *reiner* Messung der sprachspezifischen Aktivität erreicht wurde, die in der Lage war die geringere Reliabilität der Maße auszugleichen.

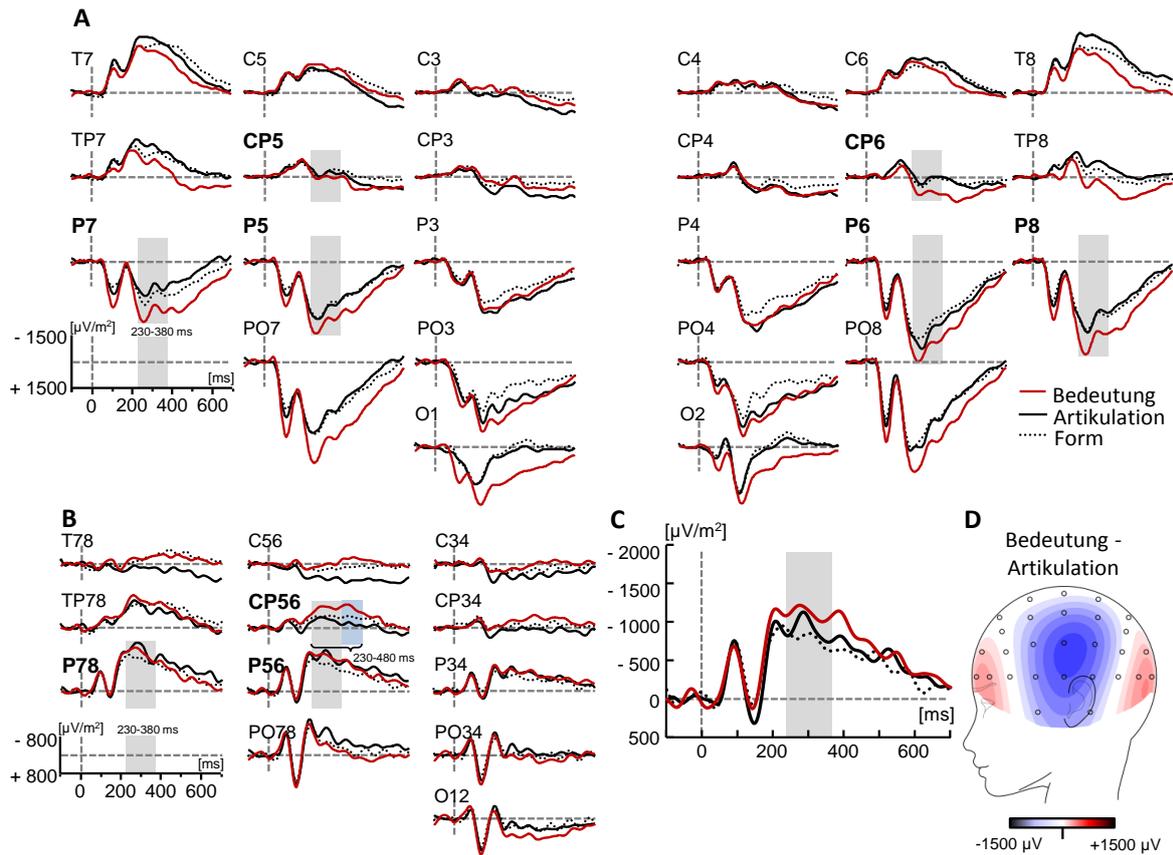


Abbildung 3. **A** Über alle Probanden gemittelte, unlateralisierte CSD-transformierte EKP-Wellenformen in Reaktion auf Bilder, separat für die drei Aufgabenbedingungen. **B** Differenzwellenformen gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitigen CSD-transformierten EKPs homologer Elektroden. Der in grau unterlegte Bereich in A, B und C stellt das ursprüngliche PSA-Zeitfenster dar (230-380 ms), der zusätzlich in blau unterlegte Bereich an CP56 in B stellt die Erweiterung des Analysezeitfensters der CSD-transformierten EKPs in Reaktion auf Bilder dar (Gesamtzeitfenster 230-480 ms). **C** Gemittelte, lateralisierte CSD-transformierte EKP-Wellenformen (CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6), separat für die drei Aufgabenbedingungen. **D** Topographische Ansicht des bedeutungsspezifischen Anteils der CSD-Differenzaktivität (230 - 380 ms nach Stimulusbeginn).

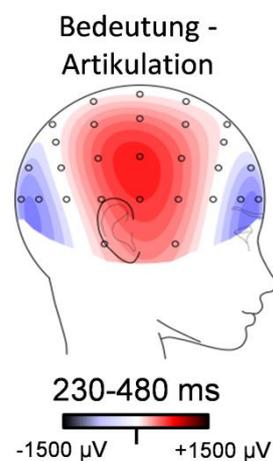


Abbildung 4. Topographische Ansicht des bedeutungsspezifischen Anteils der lateralisierten CSD-Aktivität in Reaktion auf Bilder, gewonnen aus der Subtraktion linksseitiger von rechtseitiger Aktivität homologer Elektroden (230 - 480 ms nach Stimulusbeginn).

3.3 Studie 3: Tritt die PSA bei semantischer Verarbeitung visueller und auditiver

Einzelwörter auf?

Mit Studie 3 sollte neben einer wiederholten Replikation der PSA untersucht werden, ob die PSA auch bei auditiven Wörtern auftritt. Diese Untersuchung erlaubt ähnlich wie Studie 2 Aussagen darüber, inwiefern die PSA innerhalb verbalen Materials einen modalitätsspezifischen Prozess, spezifisch für visuell verbales Material, oder innerhalb verbalen Materials amodale (also für visuelle und auditive Wörter gleichermaßen auftretende) semantische Verarbeitung widerspiegelt.

Bildgebungsstudien weisen sowohl auf gemeinsame als auch auf spezifische Regionen bei beiden Sprachmodalitäten hin (Binder et al., 2009; Cabeza & Nyberg, 2000; Constable et al., 2004; Price, 2000, 2012; Turkeltaub, Eden, Jones & Zeffiro, 2002). Die zeitlich frühen Verarbeitungsanteile, die mit EKP- und MEG-Studien gezeigt werden konnten, erwiesen sich tendenziell als modalitätsspezifisch, während sich die späteren Verarbeitungsanteile eher als amodal beschrieben wurden (Marinkovic et al., 2003; Pulvermüller et al., 2009). Die bestetablierteste, semantische und amodale EKP-Komponente stellt hierbei die N400 dar (Kutas & Federmeier, 2011).

In Studie 3 wurde erneut bei 40 rechtshändigen Studierenden (33 weiblich) der Universität Bonn (die nicht an den Studien 1 und 2 teilgenommen hatten) mit Deutsch als Muttersprache ein 64-Kanal-EEG abgeleitet. Die Aufgabenbedingungen (Form, Artikulation, Bedeutung) entsprachen denen von Studie 1 und 2. Nach der Hälfte der Durchgänge innerhalb eines Aufgabenblocks wechselte die Stimulusmodalität (visuell versus auditiv). Die Modalitätsabfolge wurde über die Probanden ausbalanciert, aber für den einzelnen Probanden konstant gehalten.

Für visuelle Wörter wurde erneut die PSA in der lateralisierten Aktivität der gleichen Elektrodenpaare wie in Studie 1 und wieder mit einem Peak um 300 ms beobachtet (Abbildung 5 B und C). Das Analysezeitfenster wurde aufgrund einer schmalgipfligeren Wellenform enger gewählt (274-324 ms). Die PSA zeigte erneut einen signifikanten Effekt der Aufgabe, $F(2, 38) = 6.31$, $p = .004$, $\eta_p^2 = .25$, mit der bekannten Abstufung: Die negativste Amplitude im Vergleich zu beiden Kontrollbedingungen trat in der Bedeutungsbedingung auf, alle $t_s(19) \geq 2.57$, alle $p_s \leq .029^{10}$, wohingegen die Kontrollbedingungen sich nicht signifikant voneinander unterschieden, $t(19) = 0.44$, $p \geq .999$, zweiseitig-getestet (Abbildung 5 C). Dieser Aufgabeneffekt trat allerdings nur für Probanden auf, die innerhalb der Aufgabenbedingungen zuerst immer die visuellen Wörter präsentiert bekamen. Dieser Effekt manifestierte sich in einer signifikanten Interaktion von Aufgabe und Modalitätsreihenfolge, $F(2, 72) = 3.93$, $p = .024$, $\eta_p^2 = .10$. Der im Lateralisierungsmaß beobachtete Aufgabeneffekt rührte erneut von einem signifikanten Aufgabeneffekt für linksseitige, $F(2, 72) = 9.29$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .21$, nicht

¹⁰ Aufgrund der gerichteten Annahmen hinsichtlich der Aufgabenunterschiede für die EKPs auf visuelle Wörter, wurde bei den t -Tests einseitig getestet, aufgrund der multiplen Vergleiche jedoch Bonferroni-korrigiert.

aber rechtsseitige Elektroden, $F(2, 72) = 1.90, p = .157$, (Abbildung 5 A) mit einer temporoparietalen Topographie des bedeutungsspezifischen Anteils der PSA (Abbildung 5 D).

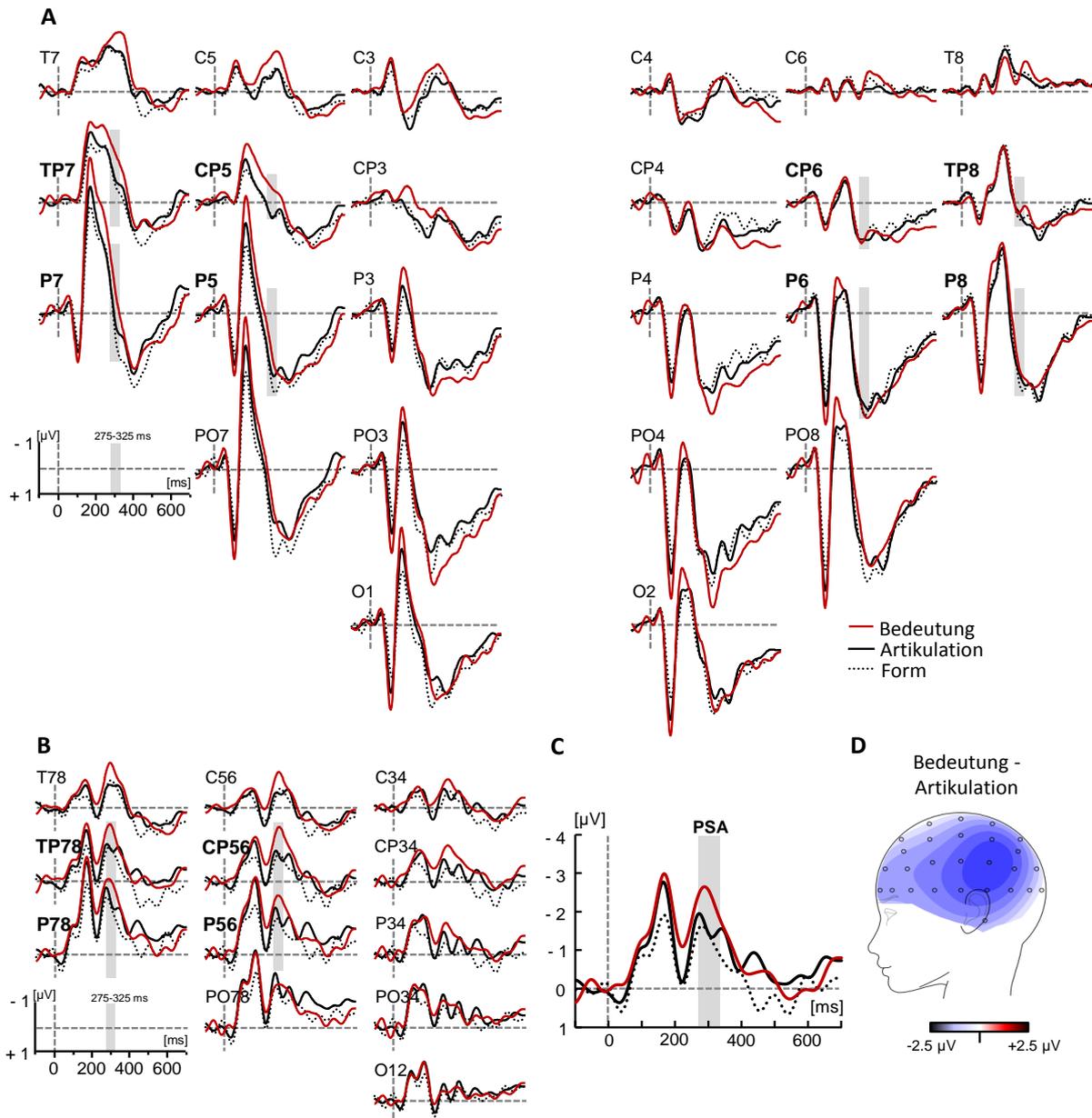


Abbildung 5. A Gemittelte, unlaterale EKG-Wellenformen von Probanden, die zuerst die visuellen Wörter präsentiert bekamen ($n = 20$), in Reaktion auf visuelle Wörter, separat für die drei Aufgabenbedingungen. Der grau unterlegte Bereich in A, B und C stellt das Analysezeitfenster (275-325 ms) dar. B Laterale EKG-Wellenformen, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden. C Gemittelte, laterale EKG-Wellenformen (TP7-TP8, CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6), separat für die drei Aufgabenbedingungen. Der graue Bereich zwischen der durchgezogenen schwarzen und der roten Wellenform spiegelt den bedeutungsspezifischen Anstieg der PSA wider. D Topographische Ansicht des bedeutungsspezifischen Anteils der PSA (275-325 ms nach Wortbeginn).

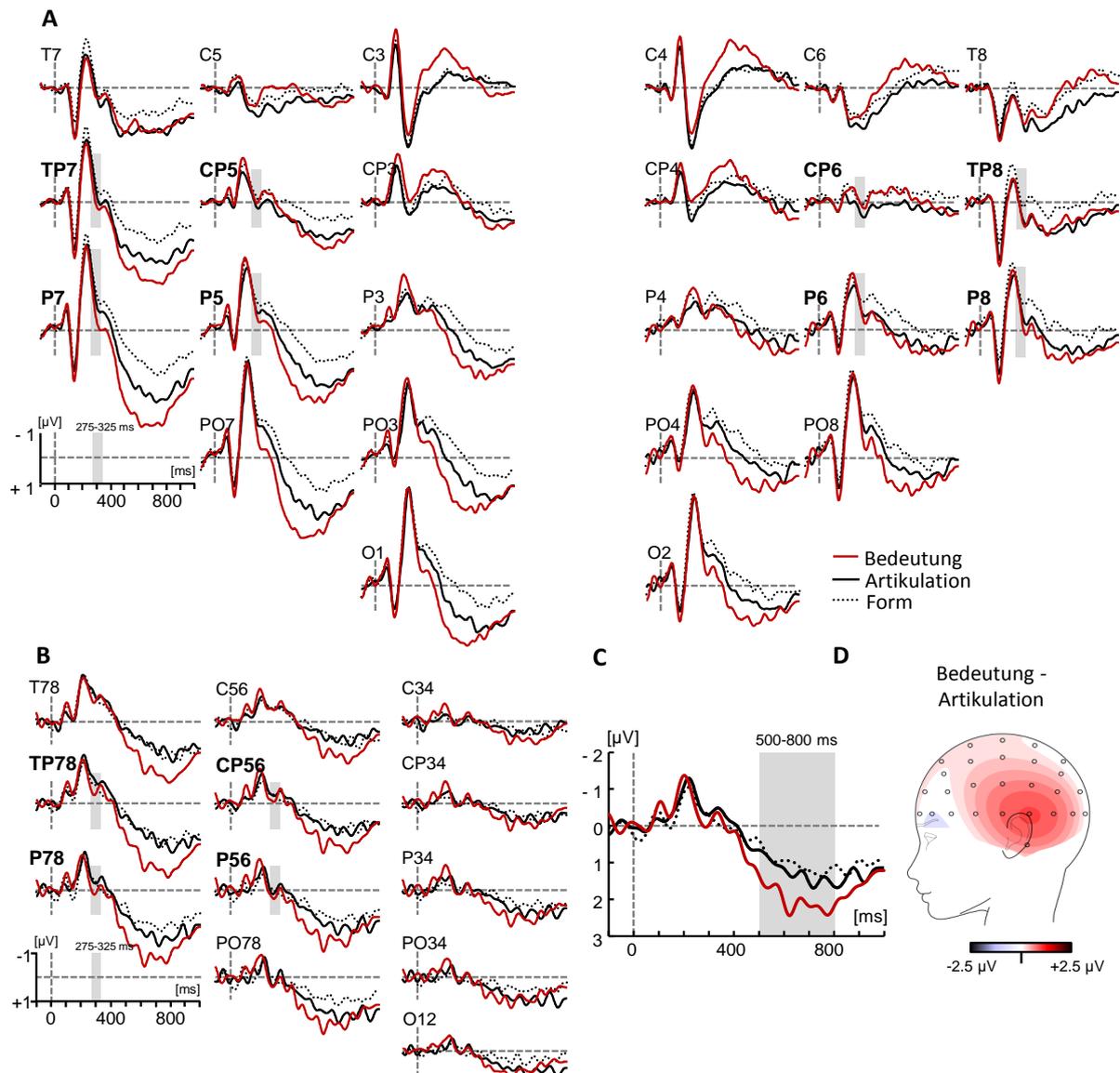


Abbildung 6. A Über alle Probanden gemittelte, unlocalisierte EKP-Wellenformen in Reaktion auf auditive Wörter, separat für die drei Aufgabenbedingungen. **B** Lateralisierte EKP-Wellenformen, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden. Der grau unterlegte Bereich in A und B stellt das Analysezeitfenster (275-325 ms) analog zur Analyse der EKPs in Reaktion auf visuelle Wörter dar. **C** Gemittelte, lateralisierte EKP-Wellenformen (TP7-TP8, CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6), separat für die drei Aufgabenbedingungen. Der grau unterlegte Bereich (500-800 ms) stellt das Analysezeitfenster für die Positivität in Reaktion auf auditive Wörter dar. **D** Topographische Ansicht des bedeutungsspezifischen Anteils der Positivität (500-800 ms nach Wortbeginn).

Für auditiv präsentierte Wörter ergaben sich im Zeitfenster 274 bis 324 ms nach Präsentationsbeginn in den lateralisierten EKPs der Elektrodenpaare TP7-TP8, CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6 keine Effekte der Aufgabe (Abbildung 6 B) und auch keine Interaktionen mit der Modalitätsreihenfolge. Im Gegensatz dazu trat für auditive Wörter in einem späteren Zeitfenster (500-800 ms) in der gemittelten lateralisierten Aktivität derselben Elektrodenpaare unabhängig von der Modalitätsreihenfolge ein signifikanter Effekt der Aufgabe auf, $F(2, 72) = 7.52$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .17$ (Abbildung 6 C). Dieser bestand

darin, dass die Amplitude aus der Bedeutungsbedingung signifikant positiver war als die aus beiden anderen Aufgabenbedingungen, alle $t(37) \geq 2.53$, alle $ps \leq .048^{11}$, welche sich wiederum nicht signifikant voneinander unterschieden, $t(37) = 0.94$, $p \geq .999$. Diese Modulation wurde allerdings auch in den unlateralisierten EKPs in Reaktion auf auditive Wörter deutlich (Abbildung 6 A), die Berechnung eines Lateralisierungsmaßes erweist sich im Zusammenhang mit auditivem verbalen Material somit als weniger nützlich. Dies ist möglicherweise mit der generell weniger starken Lateralisierung der Verarbeitung auditiver Wörter zu erklären (Hickok & Poeppel, 2007; Petersen et al., 1988; Price, 2000).

3.4 Studie 4: Untersuchung der PSA im Rahmen eines Isolierungsparadigmas – Effekte der Stimulusdistinktheit und Erinnerung in lateralisierten und unlateralisierten EKPs

Mit der vierten Studie der vorliegenden Arbeit wurde die PSA in einem anderen Aufgabenkontext, bei dem semantische Wortverarbeitung aber ebenfalls von Bedeutung sein sollte, untersucht. Probanden wurden im Rahmen eines sogenannten Isolierungsparadigmas Wortlisten präsentiert. Die Listen bestanden aus nacheinander präsentierten, visuellen Einzelwörtern. Innerhalb jeder Liste wurde ein Wort durch seine Größe und eines durch seine Schriftart von den übrigen Wörtern isoliert. Diese Wortlisten sollten gelernt und anschließend bei freier Reproduktion erinnert werden. Ein konsistenter Befund in solchen Isolierungsparadigmen ist der Isolierungseffekt (auch Von Restorff-Effekt genannt; 1933). Dieser besteht im Verhalten darin, dass die Erinnerungsleistung für isolierte Stimuli besser ist als für die restlichen Standards, die hinsichtlich der isolierenden Eigenschaften homogen sind (Hunt & Lamb, 2001). Neben der alleinigen Betrachtung des Verhaltenseffektes haben sich viele Studien auch mit den neuronalen Korrelaten der Erinnerung beschäftigt, im Allgemeinen (siehe Review von Paller & Wagner, 2002), aber auch im Rahmen von Isolierungsparadigmen (Kamp, Brumback & Donchin, 2013; Karis, Fabiani & Donchin, 1984; Otten & Donchin, 2000). Aus diesen Studien sind zwei elektrophysiologische Maße bekannt, welche die Stimulusdistinktheit während des Enkodierens reflektieren und deren Amplituden mit der späteren Erinnerung dieser Stimuli assoziiert sind. Bei den Komponenten handelt es sich um die P3-Komponente und eine langsame Positivität (engl. positive slow wave, PSW), mit einer zumeist frontalen Topographie (Fabiani, Karis & Donchin, 1990; Kamp et al., 2013; Otten & Donchin, 2000). Erstere wird hierbei insbesondere bei der Anwendung rudimentärer und letztere bei elaborierteren Erinnerungsstrategien beobachtet (Fabiani et al., 1990). Rudimentäre Erinnerungsstrategien beschreiben das Erlernen ohne konkrete Strategie, wie zum Beispiel das innerliche Wiederholen der Wörter. Eine elaboriertere Erinnerungsstrategie wäre hingegen das Erfinden einer Geschichte, welche alle Begriffe miteinander verbindet. Zuweilen

¹¹ Da keine Vorannahmen zu den Amplitudenunterschieden der EKPs in Reaktion auf auditive Stimuli bestanden, wurden die t -Tests zweiseitig getestet und aufgrund der multiplen Vergleiche die p -Werte Bonferroni-adjustiert.

konnte auch hinsichtlich der Amplituden dieser Komponenten eine Interaktion zwischen Distinktheit und Erinnerung beobachtet werden. Die Komponente, welche beim Enkodieren zwischen später erinnerten und nicht erinnerten Wörtern unterschied, wies außerdem einen größeren Erinnerungseffekt für isolierte im Vergleich zu Standardstimuli auf (Kamp et al., 2013; Otten & Donchin, 2000).

Studie 4 diente also dazu, zu explorieren, inwiefern die PSA während des Enkodierens im Rahmen eines Isolierungsparadigmas Effekte der Distinktheit und der späteren Erinnerung der Wörter zeigen würde. Effekte der Distinktheit wären insofern plausibel, als dass die Distinktheit von Reizen auch die Zuwendung von vermehrten Aufmerksamkeitsressourcen erfordert, was in einer verstärkten semantischen Verarbeitung solcher Wörter resultieren könnte. Außerdem ist aus der Literatur bekannt, dass die tiefere semantische Verarbeitung von Stimuli mit einer besseren Gedächtnisleistung für diese einhergeht (Craik & Lockhart, 1972; Goldstein, Levin, Boake & Lohrey, 1990). Dies lässt die Vermutung zu, dass die PSA-Amplitude, interpretiert als der Aufwand der semantischen Aktivierung von visuellen Einzelwörtern, auch die spätere erfolgreiche Erinnerung an diese vorhersagt.

Da die Probanden in Studie 4 instruiert waren eine elaborierte Erinnerungsstrategie zu verfolgen und eine möglichst bildhafte Vorstellung der präsentierten Wörter entwickeln sollten, wurden wie bei anderen Studien in denen elaboriertere Erinnerungsstrategien gefördert, ebenfalls Effekte der Distinktheit und der im Nachhinein ermittelten Erinnerungsleistung für eine frontale langsame Positivität erwartet (Fabiani et al., 1990; Kamp et al., 2013; Otten & Donchin, 2000). Die mündlichen Berichte von Pilotprobanden, sich eine Geschichte ausgedacht zu haben, um sich die Wörter besser zu merken, weisen darauf hin, dass tatsächlich eher aufwendigere Erinnerungsstrategien verfolgt wurden. Die frontale langsame Positivität sollte für später erinnerte Stimuli sowie isolierte Stimuli erhöht sein. Außerdem wurde basierend auf der Studienlage erwartet, dass der Erinnerungseffekt für isolierte Stimuli größer als für Standardstimuli ausfallen würde. Als Neuerung zu anderen Studien sollten die Enkodiereffekte von Distinktheit und Erinnerung im Innersubjekt-Design untersucht werden. Zudem wurde die Anzahl von gängiger Weise nur einem isolierten Stimulus je Wortliste auf zwei erhöht (einer wurde größer und der andere in einer anderen Schriftart als die restlichen Wörter präsentiert). Insgesamt wurden 45 rechtshändige Studierende (36 weiblich) der Universität Bonn untersucht (die nicht an den Studien 1 bis 3 teilgenommen hatten) und erneut ein 64-Kanal-EEG abgeleitet.

Im Verhalten trat der erwartete Isolierungseffekt mit einer besseren Erinnerungsleistung für isolierte Stimuli im Vergleich zu Standardstimuli auf (61% versus 57%, $t(43) = 2.84$, $p = .007$)¹². An den aus den anderen Studien bekannten Elektrodenpositionen trat in den lateralisierten EKPs eine relative Negativität auf. Diese Komponente wurde als späte PSA interpretiert, die einen späteren Beginn als in den anderen drei Studien aufwies und die sich, ohne einen deutlichen Peak, über einen längeren Zeitraum erstreckte (350- 650 ms; Abbildung 7 A und B). Für diese späte PSA trat ein signifikanter Effekt des Stimulustyps auf, $F(1, 44) = 34.84$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .44$, der darin bestand, dass die Komponente negativere Amplituden für isolierte Stimuli im Vergleich zu Standardstimuli aufwies. Es traten keine Enkodiereffekte, die mit der späteren Erinnerung zusammenhingen, $F(1, 44) = 2.64$, $p = .112$, oder Interaktionen zwischen Stimulustyp und späterer Erinnerung auf, $F(1, 44) = 0.18$, $p = .678$.

Wie erwartet traten ebenfalls Effekte des Stimulustyps und der späteren Erinnerung in den unlateralierten EKPs in Form einer langsamen Positivität auf (Abbildung 8 A). Diese zeigte an zentralen bis zentroparietalen Elektroden (C2, C4 und CP2) einen Effekt des Stimulustyps, $F(1, 44) = 62.16$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .59$, mit positiveren Amplituden für isolierte Stimuli im Vergleich zu Standardstimuli (Abbildung 8 B). Jedoch traten in diesem Zeitfenster und an diesen Elektroden keine Effekte, die mit der späteren Erinnerung zusammenhingen, $F(1, 44) = 3.09$, $p = .086$, und keine Interaktion beider Faktoren auf, $F(1, 44) = 2.11$, $p = .154$. An links-frontalen Elektrodenpositionen (AFz, F1, und Fz) zeigten sich im gleichen Zeitfenster Haupteffekte von Stimulustyp, $F(1, 44) = 7.73$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .15$, und Erinnerung, $F(1, 44) = 14.26$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .25$ (Abbildung 8 C). Zwar trat keine signifikante Interaktion zwischen beiden Faktoren auf, die geplanten Kontraste zwischen den Stimulustypen aufgeteilt nach Erinnerungsstatus ergaben aber, dass die Amplitude für erinnerte isolierte Stimuli signifikant positiver war als für erinnerte Standardstimuli, $t(44) = 3.31$, $p = .002$, sowie nicht erinnerte isolierte Stimuli, $t(44) = 2.81$, $p = .007$. Die Amplituden beim Enkodieren später nicht erinnerten Wörter unterschieden sich hingegen nicht zwischen den beiden Stimulustypen, $t(44) = 1.35$, $p = .186$. Wie erwartet war die frontale Positivität somit für später erinnerte, isolierte Wörter am stärksten ausgeprägt.

Insgesamt zeigte die PSA zwar die aus den bisherigen Studien bekannte Topographie, aber einen späteren Beginn und eine deutlich längere Erstreckung (Abbildung 7 A und B). Diese längere Erstreckung ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass es aufgrund der anspruchsvollen Aufgabe notwendig war, die Aktivierung der Bedeutung der Wörter möglichst lange aufrechtzuerhalten sowie möglichst viele Bedeutungsfacetten der Wörter zu aktivieren. Die negativeren Amplituden der späten PSA für isolierte Stimuli legen nahe, dass eine stärkere

¹² Hierbei wurden nur Wörter mittlerer Listenpositionen berücksichtigt (Positionen 3-13 in einer Liste von 15 Wörtern), um den Einfluss von Primacy- und Recency-Effekten zu vermeiden (Murdoch, 1962). Auch die EKPs wurden nur aus Trials mit Wörtern dieser Listenpositionen berechnet.

Zuwendung von Aufmerksamkeitsressourcen aufgrund von Distinktheit auftrat. Die PSA zeigte jedoch wider Erwarten keine Enkodiereffekte, die prädiktiv für die spätere Erinnerung waren, was eventuell auf die Instruktionen und die Erinnerungsstrategien der Probanden zurück zu führen ist. Der Bericht der Probanden, zu versuchen die Wörter in ein Gesamtbild oder in eine Geschichte einzubetten, um diese besser zu erinnern, geht weit über die bloße Bedeutungsaktivierung hinaus. Diese elaborierten Assoziationsstrategien sind für die Erinnerung von vielen Wörtern aber womöglich effektiver und ihre EKP-Reflexionen deshalb auch die verlässlicheren Prädiktoren der späteren Erinnerung. Die erhöhten Amplituden der späten PSA für isolierte Stimuli mögen somit eventuell trotzdem eine stärkere semantische Aktivierung der Bedeutung der isolierten Wörter widerspiegeln. Die so aktivierte Bedeutung könnte dann frontal vermittelten Prozesse zur Verfügung stehen und die Integration der Bedeutung in oder die Entwicklung und Aufrechterhaltung von einem Wortlistenkontext erleichtern. Dennoch war diese initiale Bedeutungsaktivierung in Form der späten PSA, zumindest in der vorliegenden Studie, nicht entscheidend für die spätere Erinnerungsleistung.

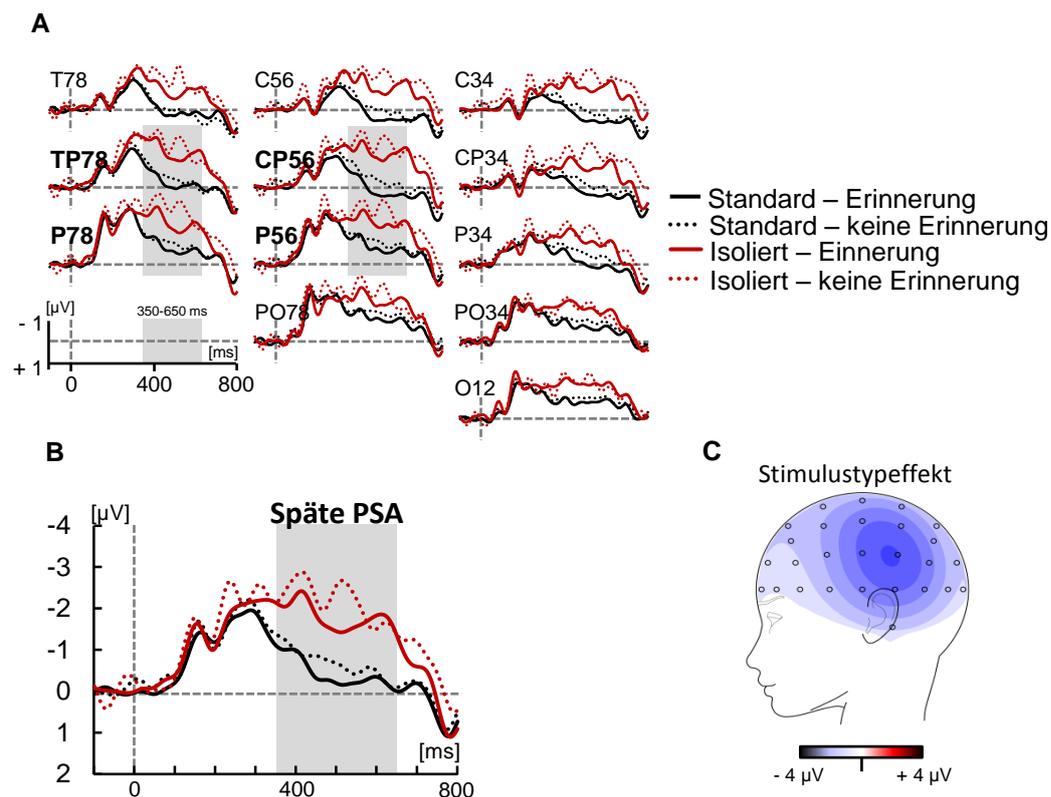


Abbildung 7. **A** Lateralisierte EKP-Wellenformen, gewonnen aus der Subtraktion rechtseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektrodenpaare, gemittelt über alle Probanden als Funktion von Stimulustyp und Erinnerung. Der grau unterlegte Bereich in **A** und **B** stellt das Analysezeitfenster (350-650 ms nach Stimulusbeginn) dar. **B** Gemittelte lateralisierte EKP-Wellenformen (TP7-TP8, CP5-CP6, P7-P8 und P5-P6) als Funktion von Stimulustyp und Erinnerung zur Darstellung der späten PSA. **C** Topographische Ansicht des Stimulustypereffektes (isoliert – standard, 350-650 ms nach Stimulusbeginn).

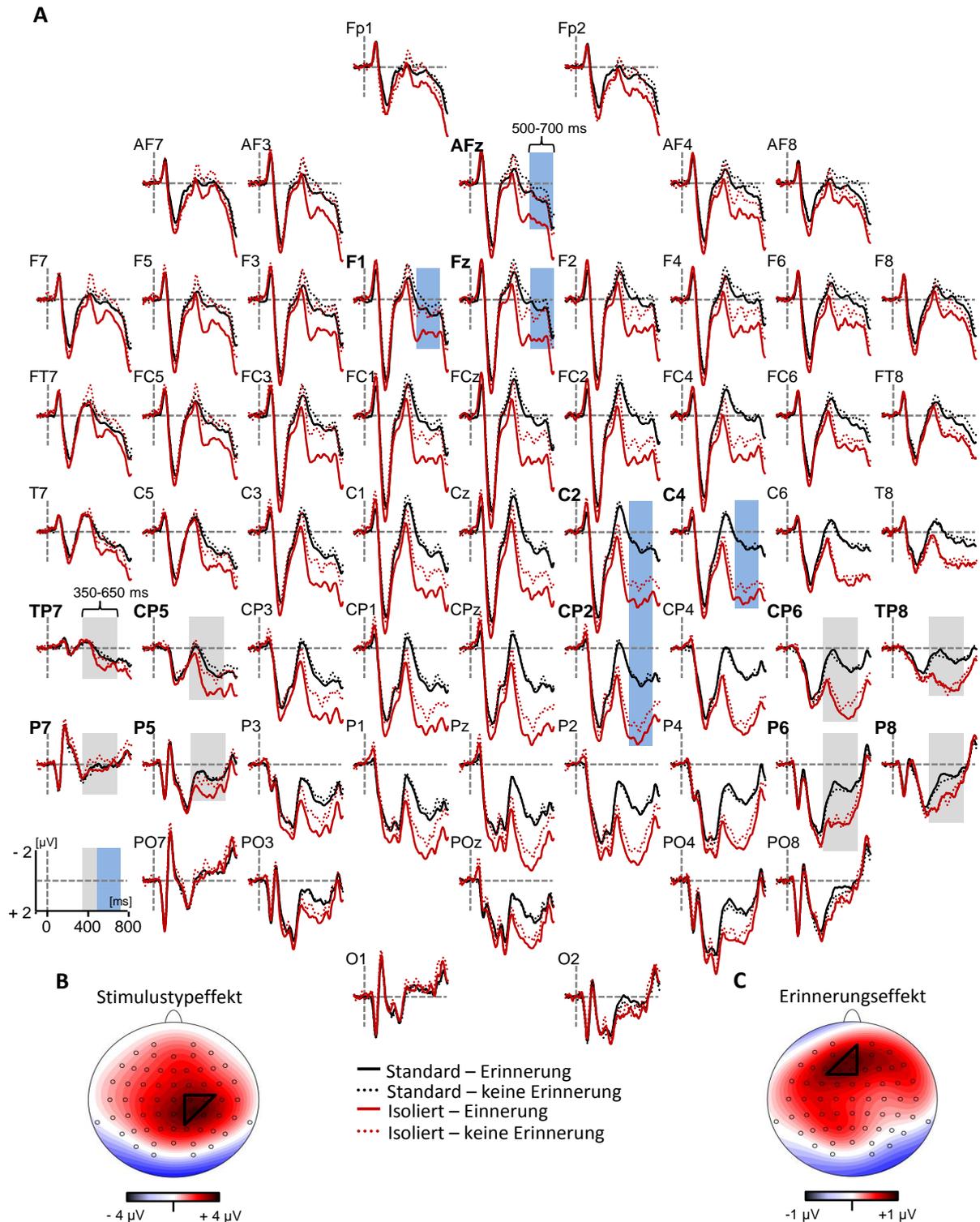


Abbildung 8. A Über alle Probanden gemittelte, unlateralsierte EKP-Wellenformen als Funktion von Stimulustyp und Erinnerung. Der grau unterlegte Bereich stellt das Analysezeitfenster der späten PSA (350-360 ms nach Stimulusbeginn), der blau unterlegte Bereich das Analysezeitfenster der langsamen Positivitäten (500-700 ms nach Stimulusbeginn) dar. Topographische Ansicht des frontalen Erinnerungseffektes (erinnert – nicht erinnert, B) sowie des zentroparietalen Stimulustypeneffektes (isoliert – standard, C) 500 bis 700 ms nach Stimulusbeginn.

Die auftretenden langsamen Positivitäten dominierten die unlateralsierten EKPs in der vorliegenden Studie, wobei jedoch die Effekte des Stimulustyps und der späteren Erinnerung topographisch distinkt waren: Der Stimulustypeneffekt zeigte eine zentrale bis zentroparietale Topographie (Abbildung 8 B) und der Erinnerungseffekt eine links-frontale Topographie (Abbildung 8 C). Dies stimmt mit den Befunden anderer Arbeitsgruppen überein, welche die maximalen EKP-Unterschiede zwischen Stimulustypen ebenfalls an posterioren Elektroden und die Erinnerungseffekte am deutlichsten an frontalen Elektroden berichteten, zumindest sofern elaborierte Gedächtnisstrategien, wie die Ausbildung von Assoziationen zwischen Stimuli, durch die Instruktionen gefördert wurden (Fabiani et al., 1990; Wiswede, Rüsseler, Hasselbach & Münte, 2006). Dass die frontale, langsame Positivität am stärksten für erinnerte isolierte Stimuli ausgeprägt war (sowohl im Vergleich zu erinnerten Standards als auch zu später nicht abrufbaren isolierten Wörtern), könnte vorsichtig als Hinweis darauf interpretiert werden, dass die verstärkte (posteriore) Verarbeitung von isolierten Stimuli nur in dem Ausmaß zu einer besseren Erinnerung führt, in dem sie die Wahrscheinlichkeit für frontale strategische Prozesse erhöht. Letztere vermögen dann die Erinnerung durch exekutive Operationen mit den Stimuli zu verbessern, wie z. B. die Ausbildung von Assoziationen im Listenkontext.

3.5 Studie 5: Erprobung lateralisierter EKPs für die Untersuchung prä-semantischer Sprachverarbeitung

Wie bereits ausführlich in der Einleitung beschrieben, erfolgt die Verarbeitung geschriebener Sprache maßgeblich linkslateralisiert und breitet sich im Wesentlichen von posterioren, visuell-perzeptuellen Verarbeitungsregionen über temporale Regionen bis hin zu anterioren Regionen aus (z. B.: Dehaene, Cohen, Sigman & Vinckier, 2005; Hauk, Coutout, Holden & Chen, 2012; Marinkovic et al., 2003; Vinckier et al., 2007). Zwei lateralisierte elektrophysiologische Korrelate der sprachlichen Verarbeitung visueller Wörter sind zum einen die N170-Komponente sowie die durch die vorhergehenden Studien charakterisierte PSA. Die N170 weist hierbei ihre maximale Amplitude in der Regel zwischen 150 und 200 ms nach Wortbeginn auf, die PSA um 300 ms. Erstere wird mit der prä-lexikalischen, visuell-strukturellen Verarbeitung der Wortform in Verbindung gebracht (Dien, 2009; Korinth, Sommer & Breznitz, 2012; Simon et al., 2004), die sich mit zunehmender Vertrautheit und Expertise für visuelle Sprachreize entwickelt (Maurer et al., 2005; Maurer, Zevin & McCandliss, 2008; Wong, Gauthier, Woroch, Debusse & Curran, 2005). Die PSA wurde basierend auf den Studien 1 bis 3 funktionell mit semantischer Verarbeitung visueller Einzelwörter in Verbindung gebracht. Es ist anzunehmen, dass es sich hierbei um einen frühen, sehr basalen Prozess der semantischen

Verarbeitung handelt, im Sinne einer Aktivierung der Bedeutung eines Einzelwortes/bzw. einer Aktivierung dessen semantischer Kategorie.

Aufgrund des durch Bildgebungsstudien nahegelegten räumlichen Aktivitätsverlaufs der visuellen Sprachverarbeitung, erscheint es plausibel, dass auch im Zeitfenster zwischen diesen beiden Komponenten sprachspezifische, linkslateralisierte Aktivität auftritt, wie die lexikalische Verarbeitung. Zum Beispiel die Suche nach einem passenden Eintrag für eine visuelle Wortform im mentalen Lexikon. Ein solcher Prozess wäre zeitlich *nach* der strukturellen Analyse der Wortform (N170), aber *vor* der Aktivierung der zugehörigen Bedeutung (PSA) einzuordnen. Solch ein Zwischenschritt wird auch in etablierten Modellen des Lesens, wie zum Beispiel dem „dual-route cascaded model“ von Coltheart, Rastle, Langdon und Ziegler (2001) angenommen (Dien, 2009). Nach diesem Zwei-Pfad-Modell, welches eine Abfolge mehrerer miteinander interagierender Verarbeitungsschritten im Leseprozess annimmt, gibt es einen lexikalischen und einen phonologischen Verarbeitungspfad. Der lexikalische Pfad wird hierbei als der schnellere angenommen. Er umfasst die Ausbildung eines orthographischen Perzepts, das in einen orthographischen Code übersetzt wird. Handelt es sich um ein reales Wort, kann dann über den Code ein Eintrag im orthographischen Lexikon gefunden werden (*lexikalische Selektion*) und die Wortbedeutung aktiviert werden (Dien, 2009). Führt die Suche im orthographischen Lexikon zu *keinem* Treffer, wie es manchmal für seltene (dem Subjekt unbekannt) Wörter und immer für Pseudowörter der Fall ist, wird der langsamere, phonologische Pfad aktiviert. Über diesen wird eine phonologische Repräsentation des orthographischen Inputs ausgebildet (Mapping von Orthographie auf Phonologie), die es auch ermöglicht, benennbare Non-Wörter, also Pseudowörter, auszusprechen (Dien, 2009; Fiebach, Friederici, Müller & von Cramon, 2002). Bisher fehlen allerdings Belege für lateralisierte EKP-Korrelate für diese Zwischenschritte, die einen passenden zeitlichen Verlauf zwischen 200 und 300 ms nach Beginn der Wortpräsentation und eine stimmige okzipitotemporale Topographie aufweisen. Eine MEG-Studien von Marinkovic (2003) lieferte jedoch erste Hinweise auf die Existenz derartiger Korrelate.

Das Ziel von Studie 5 war es deshalb, unter Einsatz des in den vorhergehenden Studien etablierten Lateralisierungsmaßes, solche lexikalische Aktivität zu untersuchen. Die Aufgabe für 25 rechtshändige Studierende (16 weiblich) der Universität Bonn mit Deutsch als Muttersprache (die nicht an den Studien 1 bis 4 teilgenommen hatten) bestand darin, immer vier aufeinanderfolgende Stimuli gleicher Zeichenlänge (bestehend aus einem seltenen [z. B. Axiom, Barde] und einem häufigen Wort [z. B. Apfel, Insel], einem Pseudowort [z. B. Amlaf, Ipres] und einer alphanumerischen Zeichenfolge [z. B. Ak4yr, G3lpx]) zu betrachten. Je Trial wurde einer der vier Stimuli durch Rotfärbung des vorhergehenden Fixationskreuzes als Zielreiz markiert. Die Zielreize setzten sich über das gesamte Experiment betrachtet jeweils zu gleichen Teilen aus jeder Stimuluskategorie zusammen. Am Ende

des Trials wurde gefragt, ob ein präsentierter Stimulus der Zielreiz unter den vier Stimuli war. In 50% der Fälle handelte es sich tatsächlich um den Zielreiz und in 50% der Fälle um einen neuen Stimulus derselben Kategorie. Nach Reaktion folgte eine Rückmeldung zur Richtigkeit der Entscheidung. Somit wurde zum einen die Aufmerksamkeit manipuliert (hoch bei Zielreizen und vergleichsweise geringer bei Nicht-Zielreizen) und zum anderen die Lexikalität der Stimuli variiert (hoch für seltene und häufige Wörter, geringer für aussprechbare Pseudowörter und sehr gering für Zahlen-Buchstaben-Folgen).

Für diese einfache Rekognitions-Aufgabe wurde angenommen, dass diese nicht unbedingt die Aktivierung der Bedeutung der Wörter notwendig machte, da dies ohnehin nur für die Hälfte der Stimuli (häufige und seltene Wörter) bei der Wiedererkennung hilfreich sein könnte.

Dementsprechend wurde eher nicht das Auftreten einer PSA erwartet. Stattdessen sollte frühere, linkslateralisierte, lexikalische Komponente auftreten, die aufgrund des posterior-nach-anterior Aktivitätsverlaufs beim Lesen (Dehaene et al., 2005; Hauk et al., 2012; Marinkovic et al., 2003; Vinckier et al., 2007) eine stärker posteriore Topographie als die PSA aufweisen sollte. Die lexikalische Komponente sollte jedoch zudem zeitlich später als die mit der Wortformanalyse assoziierte N170-Komponente, etwa im Zeitbereich zwischen 200 und 300 ms nach Stimulusbeginn, auftreten.

Es erscheint naheliegend, dass die Komponente genau wie die N170 und die PSA eine negative Polarität aufweist und sensitiv für die Effekte von Aufmerksamkeit und Lexikalität ist. Genau wie frühe perzeptuelle Verarbeitungsprozesse, wie sie von der N170 wiedergespiegelt werden, durch Aufmerksamkeit verstärkt werden (McCarthy & Nobre, 1993; Ruz & Nobre, 2008), erscheint es plausibel, dass Aufmerksamkeit auch lexikalische Prozesse, die zeitlich kurz nach der N170 auftreten, verstärkt. Hinsichtlich des Einflusses der Lexikalität der Stimuli werden geringere Amplituden einer lexikalischen Komponente für alphanumerische Zeichenfolgen erwartet, da anzunehmen ist, dass solche Stimuli noch auf sub-lexikalischen Verarbeitungsebenen als nicht-lexikalisch identifiziert werden (entsprechend der Argumentation bei der Verarbeitung von Symbolfolgen z. B. bei: Bentin et al., 1999; Simon et al., 2004). Aus Gründen der Effizienz sollte die lexikalische Analyse als Vorbereitung des Abrufs der Bedeutung bei alphanumerischen Zeichenfolgen gar nicht erst angestoßen werden. Ob auch bei der Verarbeitung von Pseudowörtern im Vergleich zu realen Wörtern ebenfalls eine lateralisierte, lexikalische EKP-Komponente auftreten würde, war im Vorfeld der Untersuchung unklar. Einerseits könnte eine lexikalische Komponente für Pseudowörter erhöhte Amplituden aufweisen, was darauf hinweisen würde, dass sie eher den Aufwand der Enkodierung und die Suche nach einem lexikalischen Eintrag (wenn auch für eine nicht existierende, aber legale) Wortform widerspiegelt. Die lexikalische Aktivität könnte aber auch nur für reale Wörter erhöht sein, was darauf hinweisen würde, dass sie das erfolgreiche Erkennen der Wortform als legalen Eintrag im

orthographischen Lexikon widerspiegelt (siehe z. B. Kronbichler et al., 2004; Mechelli, Gorno-Tempini & Price, 2003 für eine ähnliche Diskussion bezüglich fMRT-Befunden).

In Studie 5 traten in den unlateralsierten EKPs die klassischen EKP-Komponenten der visuellen Einzelwortverarbeitung auf (P1, N170, und P2; z. B. Dien, 2009). *Klassisch* hierbei in doppelter Hinsicht: *Zum einen* im Sinne ihres reliablen Auftretens in bisherigen EKP-Studien zu Leseprozessen sowie im Sinne ihrer reliablen Modulationen durch Aufmerksamkeit und Stimuluseigenschaften; *zum anderen* klassisch bezüglich ihrer Analyse in den unlateralsierten Wellenformen, d. h. ohne die Berechnung eines Lateralisierungsmaßes.

Die parietale P1-Komponente (100-140 ms; PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2) und die okzipitotemporale N170-Komponente (150-180 ms; PO7, PO8) zeigten die aus der Literatur bekannten zeitlichen Verläufe und Topographien. Bezüglich der experimentellen Manipulation traten lediglich Effekte der Aufmerksamkeit mit erhöhten Amplituden (entsprechend ihrer Polarität) für stärker beachtete Zielreize im Vergleich zu den restlichen, weniger beachteten Stimuli auf, P1: $F(1, 24) = 22.90, p < .001, \eta_p^2 = .49$; N170: $F(1, 24) = 6.03, p = .022, \eta_p^2 = .20$. Sowohl die Aufmerksamkeitseffekte (Dehaene et al., 2001; McCarthy & Nobre, 1993; Ruz & Nobre, 2008) als auch die Abwesenheit von Stimulustypen (Bentin et al., 1999; Proverbio et al., 2004; Simon et al., 2004) wurde bereits von anderen Forschungsgruppen berichtet. Auch für die frontozentrale P2-Komponente (180-230 ms; F1, Fz, F2, FC1, FCz, FC2, C1, Cz, C2, CP1, CPz, CP2) trat ein Haupteffekt der Aufmerksamkeit auf, $F(1, 24) = 5.05, p = .034, \eta_p^2 = .17$. Dieser ist konsistent mit den Befunden erhöhter Amplituden der anterioren P2 bei relevanzbedingter Aufmerksamkeit (Potts, 2004; Potts, Liotti, Tucker & Posner, 1996). Eher überraschend war der Haupteffekt des Stimulustyps, der sich in erhöhten P2-Amplituden für alphanumerische Zeichenfolgen im Vergleich zu allen anderen Stimuli manifestierte, $F(3, 72) = 6.68, p = .003, \eta_p^2 = .22, \epsilon = .68$, wohingegen sich die Amplituden für die anderen Stimuli nicht voneinander unterschieden (Abbildung 9 A und B). Dieser Effekt lässt sich womöglich durch die Art der Aufgabe erklären: Eine intensivere visuelle Analyse unbekannter alphanumerischer Zeichenfolgen könnte die spätere Rekognition dieser erheblich erleichtern oder gar eine Voraussetzung für diese darstellen. Insgesamt sind die Befunde zu den traditionellen EKP-Komponenten aber allesamt in Einklang mit der EKP-Literatur zur Verarbeitung von visuellen, orthographischen Stimuli und Symbolfolgen und sprechen für die Repräsentativität der Daten.

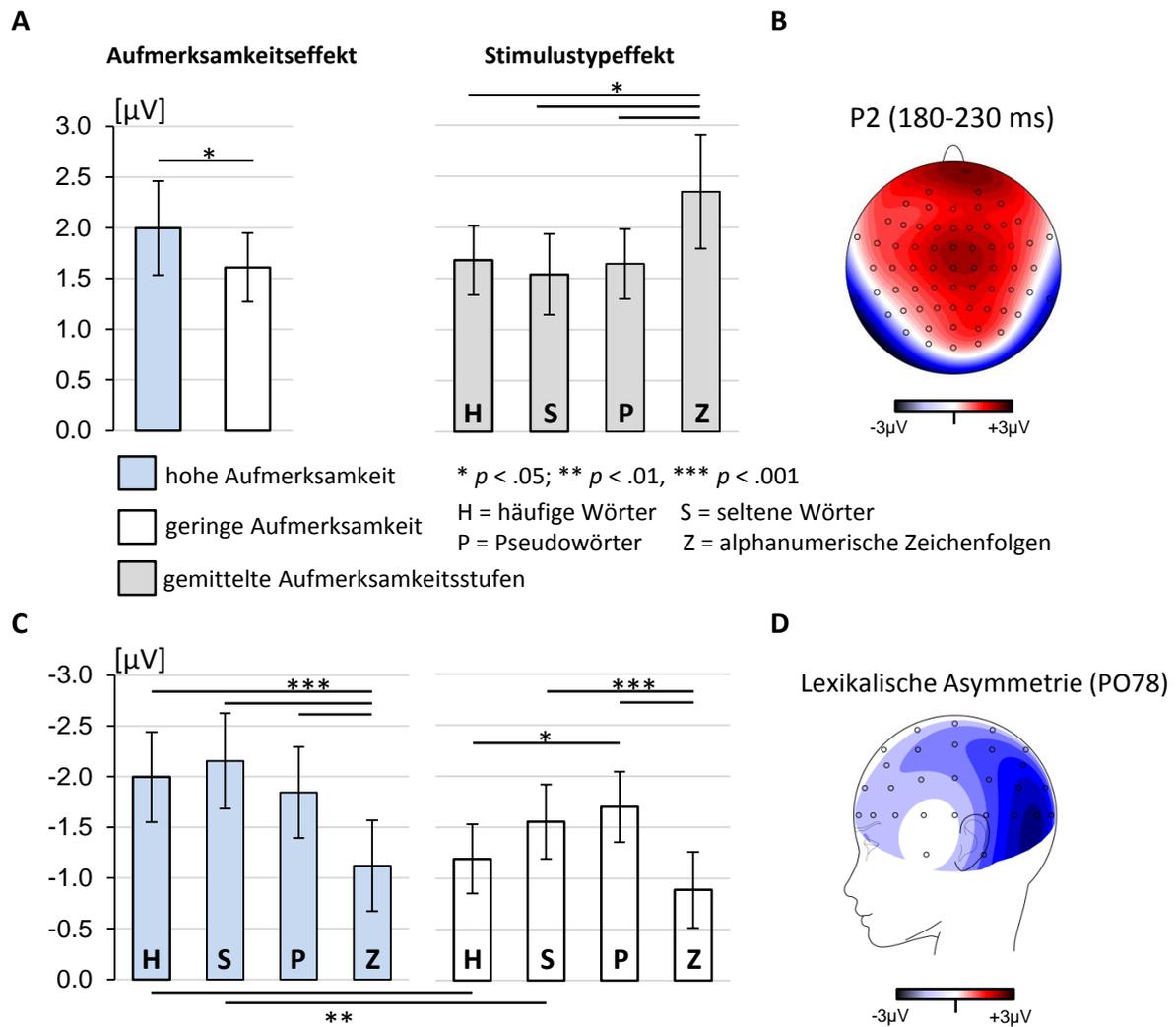


Abbildung 9. **A** P2-Amplituden (180 bis 230 ms nach Stimulusbeginn), separat für die Faktoren Aufmerksamkeit und Stimulustyp. **B** Topographische Ansicht der P2-Amplitude gemittelt über die Stufen von Aufmerksamkeit und Stimulustyp. **C** Amplituden der lexikalischen Asymmetrie (210 bis 270 ms nach Stimulusbeginn), separat für die Stufen von Aufmerksamkeit und Stimulustyp. **D** Topographische Ansicht der über alle wortartigen Stimuli (häufige und seltene Wörter sowie Pseudowörter) gemittelten Aktivität. Für die Post-hoc-Vergleiche wurden Tukey's-HSD-Tests berechnet.

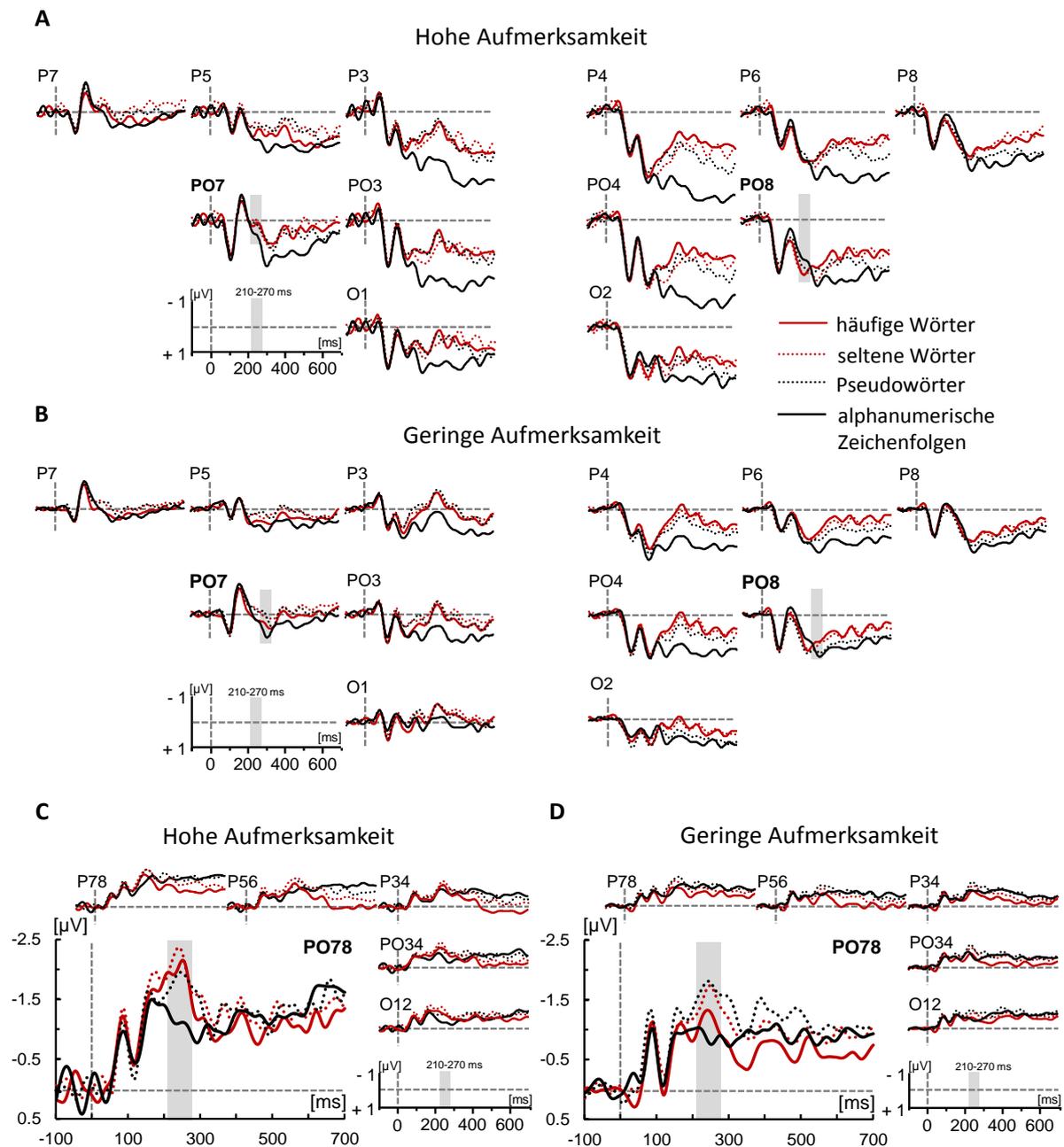


Abbildung 10. Über alle Probanden gemittelte, unlateralisierte EKP-Wellenformen für die vier Stimuluskategorien an posterioren Elektroden, separat für (A) Zielreize und (B) Nicht-Zielreize. Der grau unterlegte Bereich stellt das Analysezeitfenster (210-270 ms) dar. Lateralisierte EKP-Wellenformen (gewonnen aus der Subtraktion rechtseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden) jeweils für die vier Stimuluskategorien und separat für (C) Zielreize und (D) Nicht-Zielreize.

Wie erwartet zeigte sich in den lateralisierten EKPs eine komponentenartige Struktur in Form einer Negativität mit parietookzipitaler Topographie (maximale Amplitude an PO78) und einem lokalen Maximum zwischen 210 und 270 ms (Abbildung 9 D sowie 10 C und D). Die Komponente wies somit eine posteriorere Topographie und eine zeitlich frühere maximale Amplitude im Vergleich zur PSA sowie einen späteren Auftretenszeitpunkt als die N170 auf. Für diese lateralisierte Aktivität zeigten sich signifikante Effekte von Aufmerksamkeit, $F(1, 24) = 5.56$, $p = .027$, $\eta_p^2 = .19$, und Stimulustyp, $F(3,$

72) = 10.17, $p < .001$, $\eta_p^2 = .27$, $\epsilon = .66$. Der Aufmerksamkeitseffekt bestand darin, dass die lateralisierte Komponente negativere Amplituden für Zielreize im Vergleich zu Nicht-Zielreizen aufwies. Dies ist mit der Annahme vereinbar, dass sich vermehrte Aufmerksamkeitszuwendung besonders dann verstärkend auf die lexikalische Analyse in zeitlicher Folge nach der N170-Komponente auswirken kann, wenn derartige Prozesse überhaupt von einem Stimulus angestoßen werden. Die lateralisierte Komponente wies für alphanumerische Zeichenfolgen signifikant kleinere, d. h. positivere, Amplituden als für alle restlichen Stimulustypen auf (Abbildung 9 C). Dies stimmt mit der Annahme überein, dass nur Wörter und wortartige Stimuli lexikalische Prozesse, die sich in der lateralisierten Komponente widerspiegeln, anstoßen können sollten.

Zusätzlich trat eine signifikante Interaktion von Aufmerksamkeit und Stimulustyp auf die lexikalische Komponente auf, $F(3, 72) = 4.23$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .15$ (Abbildung 9 C und D sowie 10 C und D für alle Vergleiche zur Aufklärung der Interaktion). Diese bestand darin, dass sich die Amplituden für seltene und häufige Wörter zwischen den Aufmerksamkeitsstufen signifikant voneinander unterschieden, wobei die Wellenformen für stärker beachtete Zielwörter negativer waren als für weniger beachtete Wörter. Dieser Aufmerksamkeitseffekt blieb für Pseudowörter und alphanumerische Zeichenfolgen aus, jedoch aus unterschiedlichen Gründen (Abbildung 9 C, 10 C und D): Für alphanumerische Zeichenfolgen war die Amplitude der lateralisierten Aktivität sowohl unter hoher als auch unter geringer Aufmerksamkeit vergleichsweise positiv, d. h. die lateralisierte Komponente gering ausgeprägt. Für Pseudowörter hingegen war sie in beiden Aufmerksamkeitsbedingungen vergleichsweise negativ, d. h. stark ausgeprägt. Alphanumerische Zeichenfolgen scheinen somit lexikalische Prozesse gar nicht erst angestoßen zu haben, weshalb diese auch nicht durch Aufmerksamkeit verstärkt werden konnten. Pseudowörter hingegen scheinen den der lexikalischen Asymmetrie zugrundeliegenden Prozess hervorgerufen zu haben. Eine Modulation durch das Ausmaß der zugewendeten Aufmerksamkeit blieb hingegen aus.

Insgesamt spricht das Befundmuster dafür, dass die Komponente den Aufwand der lexikalischen Analyse oder Suche und nicht etwa deren Erfolg in Form der Identifikation einer validen Wortform mit Eintrag im mentalen Lexikon widerspiegelt, da sie ansonsten für Wörter per se, nicht aber für Pseudowörter, ihre maximale Amplitude hätte aufweisen müssen. Die starke Ausprägung der Komponente für Pseudowörter und seltene Wörter, selbst wenn diese keinen Zielreizstatus haben, könnte so interpretiert werden, dass beide dazu in der Lage waren bottom-up Aufmerksamkeit auf sich zu lenken, welche ausreichend war, um nachfolgende lexikalische Prozesse zu initiieren. Da die bedeutsamste Gemeinsamkeit zwischen Wörtern und Pseudowörtern in ihrer Aussprechbarkeit zu sehen ist, kann die lateralisierte Komponente basierend auf den vorliegenden Befunden als potenzieller Indikator phonologischer Analyseprozesse interpretiert werden, wie sie im phonologischen Pfad angenommen werden. Eine abschließende Einschätzung der Bedeutung der

Phonologie für die Komponente wäre jedoch erst durch ein experimentelles Design möglich, welches neben Wörtern und Pseudowörtern zusätzlich Non-Wörter umfasst, d. h. nicht-aussprechbare Buchstabenfolgen. Im Gegensatz zu den in Studie 5 verwendeten alphanumerischen Zeichenfolgen würden diese keine Zahlen enthalten und somit schwerer basierend auf ihren Oberflächenmerkmalen als Non-Wort zu identifizieren sein.

Der Einsatz des Lateralisierungsmaßes in Studie 5 erlaubte eine differenzierte Untersuchung des Einflusses von Aufmerksamkeit und Stimulustyp sowie deren Wechselwirkung auf frühe sprachliche Verarbeitungsprozesse, Einflüsse die in den unlateralisierten Wellenformen und in den klassischen EKP-Komponenten nicht direkt ersichtlich waren (Abbildung 10 A und B). Dies kann als weitere Evidenz für die Nützlichkeit der Anwendung von Lateralisierungsmaßen, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden, im Zuge von EKP-Forschung im Kontext Sprache betrachtet werden. Durch die vorgenommene Differenzbildung resultiert ein um unlateralisierte, sprachunspezifische Prozesse bereinigtes Maß sprachspezifischer Aktivität, deren Visualisierung auf diesem Wege, bei gleichzeitiger exzellenter zeitlicher Auflösung, besser gelingt als in den klassischen, unlateralisierten EKP-Wellenformen.

4 Diskussion

4.1 Integration der Studienergebnisse zur posterioren semantischen Asymmetrie

Mit der ersten Studie der vorliegenden Dissertation sollte ein lateralisiertes EKP-Maß, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden, erprobt werden, um lateralisierte semantische Sprachverarbeitung bei sehr guter zeitlicher Auflösung und direkter experimenteller Manipulation der semantischen Verarbeitung in einem Innersubjekt-Design zu untersuchen. Durch die Elimination bilateraler Aktivität konnte auch in EKPs links-temporoparietale semantische Sprachverarbeitung in Form einer relativen Negativität sichtbar gemacht werden. Die beobachtete linkslateralisierte Komponente war sowohl basierend auf den Befunden von Läsions- und Bildgebungsstudien sowie den Befunden von Gibbons und Kollegen (2014) zu erwarten. Wie bereits bei Gibbons und Kollegen (2014) wies die Komponente einen Peak bei 300 ms nach Wortbeginn auf. Ihre maximale Amplitude trat im direkten Vergleich mit zwei konservativen Kontrollbedingungen, bei denen die Aktivierung der Bedeutung durchaus möglich aber nicht notwendig war, um diese angemessen zu bearbeiten, in der Aufgabenbedingung mit den größten semantischen Anforderungen auf. Aufgrund ihrer Topographie und ihrer Variation in Abhängigkeit von den semantischen Aufgabenanforderungen, wurde die Komponente als posteriore semantische Asymmetrie benannt. Sowohl Topographie als auch zeitliche Charakteristika konnten in den folgenden Studien 2 und 3 repliziert werden und die PSA erwies sich als spezifisch für visuell präsentiertes Wortmaterial.

In den klassischerweise betrachteten, unlateralisierten EKP-Wellenformen war die Komponente in der ersten Studie (Abbildung 1 A) sowie auch in den Folgestudien (Studien 2 und 3; Abbildungen 2 A, 5 A und 8 A) nicht unmittelbar erkennbar. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, warum frühe semantische Aktivität in bisherigen EKP-Studien, bei Betrachtung der unlateralisierten EKPs unentdeckt blieb. Die in der vorliegenden Arbeit zusammengefassten Befunde unterstreichen die generelle Nützlichkeit der Bildung von Differenzwellen in EKPs, wie sie bereits in anderen Kontexten etabliert und bewährt sind (Eimer, 1998; Vogel & Machizawa, 2004). Es gilt jedoch zu bedenken, dass die lateralisierte EKP-Aktivität immer *nur* die Differenz der unlateralisierten Aktivität darstellt. Auch die unlateralisierte Aktivität enthält somit bereits Effekte der Sprachverarbeitung. In Übereinstimmung mit dieser Annahme traten in den Studien 1 bis 3 bei Analyse der unlateralisierten EKPs Effekte von Hemisphäre und Aufgabe auf sowie insbesondere Interaktionen beider Faktoren auf. Diese bestanden in einem links-, jedoch nicht rechtsseitig signifikanten Effekt der Aufgabe. Eine alleinige visuelle Inspektion der unlateralisierten EKPs hätte jedoch keine Anhaltspunkte gegeben, diese Effekte entsprechend zu analysieren.

Die Annahme, dass es sich bei der in den lateralisierten EKPs beobachteten Komponente tatsächlich um eine eigenständige Komponente handelt, wurde durch die Ergebnisse der in Studie 1 durchgeführten PCA bestätigt: Diese resultierte in der Identifikation eines eigenständigen Faktors für die PSA. Beide Methoden zur Lösung des Überlagerungsproblems von EKP-Komponenten (Hemisphärendifferenzbildung und PCA) kommen somit zu konvergierenden Ergebnissen, was für die Validität des Lateralisierungsmaßes spricht. Besonders bemerkenswert ist hierbei, dass der im Zuge der PCA identifizierte PSA-Faktor keinem Peak in den unlaternalisierten EKP-Wellenformen entsprach. Dementsprechend war erst nach Berücksichtigung der lateralisierten EKP-Wellenformen eine Interpretation des PSA-Faktors möglich.

Auch die in Studie 2 angewendete CSD-Transformation der EKPs stellt einen Ansatz zur Reduktion des Überlagerungsproblems von EKP-Komponenten dar, indem die topographische Distinktheit von Komponenten erhöht wird. Bei gleichen Aufgabenbedingung ergab auch die Analyse der CSD-transformierten EKPs, ausgelöst durch visuelle Wörter, eine Komponente im gleichen Zeitfenster und mit übereinstimmender, wenn auch etwas enger umschriebener, links-temporoparietaler Topographie. Dies spricht für eine Aktivitätsquelle in dieser Region nahe der Kopfoberfläche. Wie im Falle der nicht transformierten EKPs wurde die PSA auch in den CSD-transformierten EKPs erst nach der Bereinigung der unlaternalisierten Aktivität um ihre bilateralen Anteile erkennbar.

Dass die in den lateralisierten EKPs beobachtete PSA-Komponente mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Aktivität in links-temporoparietalen Gehirnregionen widerspiegelt, die mit dem Lateralisierungsmaß methodisch sehr einfach herausgearbeitet werden konnte, wird zusätzlich durch die Ergebnisse einer sLORETA nahegelegt. Diese schätzte für die PSA in Studie 1 eine links-temporoparietale Quelle, die dem BA 39 entspricht. Wie bereits in der Einleitung beschrieben ist diese Region dem angulären Gyrus zuzuordnen, der die Verbindung zwischen Okzipital-, Temporal- und Parietallappen darstellt (Seghier, 2013). Der anguläre Gyrus wurde bereits früh von Dejerine (1891, 1892) als das Zentrum für geschriebene Sprache bezeichnet (Ardila et al., 2016). Dies passt erstaunlich gut dazu, dass die PSA in den vorliegenden Studien ausschließlich für geschriebene Wörter gefunden wurde. Die Befunde neuerer Arbeiten fassen die Funktion des angulären Gyrus zwar als *amodales Konzept-Areal* zusammen (Seghier, 2013; Vigneau et al., 2006), eventuell spiegelt die PSA hierbei jedoch Anteile der Aktivierung dieses Areals wider, die spezifisch für geschriebene Sprache sind.

Der Status der PSA als Indikator sprachspezifischer Aktivität wurde wiederholt durch signifikante Zusammenhänge zwischen dem beobachteten bedeutungsspezifischen Anstieg ihrer Amplitude und Maßen verbaler Intelligenz bestärkt (Studie 1 und 2). Der bedeutungsspezifische Anstieg wurde hierbei als die Amplitudendifferenz von Bedeutungs- und Artikulationsbedingung im PSA-Zeitfenster

(230-380 ms nach Wortbeginn) operationalisiert. Da basale Prozesse wie die Wortformerkennung beiden Aufgabenbedingungen gemein sein sollten, sollte die mit diesen verbundene Aktivität durch die Subtraktion verloren gehen. Es ist jedoch durchaus möglich, dass im Zuge der Differenzbildung geringe Anteile bedeutungsspezifischer Aktivität, die in beiden Bedingungen gleichermaßen enthalten sind, ebenfalls ausgeschlossen wurden. Dies erscheint plausibel, da auch in der Artikulationsbedingung eine gelegentliche Aktivierung der Wortbedeutung angenommen werden kann. Dieser Umstand erschwert das Auffinden von Unterschieden zwischen beiden Bedingungen tendenziell und macht die Artikulationsbedingung zu einer besonders konservativen Vergleichsbedingung (siehe Abschnitt 1.3).

Der Zusammenhang zwischen dem bedeutungsspezifischen Anstieg der PSA-Amplitude und verbaler Intelligenz fiel bei Probanden mit vergleichsweise geringerer verbaler Intelligenz größer aus. Dies wurde dahingehend interpretiert, dass der Anstieg (im Sinne einer stärker negativen Amplitude) von der Artikulations- zur Bedeutungsbedingung den Aufwand widerspiegelt, der zur erfolgreichen Aktivierung der Semantik der präsentierten Wortform vonnöten war. Interessanterweise wurde dieser Effekt erst nach Bildung der doppelten Differenz zwischen den Hemisphären und zwischen den Aufgabenbedingungen deutlich. Dies deutet darauf hin, dass durch die Differenzbildungen Aktivität eliminiert werden konnte, die sprachunspezifisch (und vermutlich bilateral war) sowie unspezifisch für semantische Verarbeitung und deshalb auch noch in der Artikulationsbedingung enthalten war. Die Differenzbildung scheint somit einen echten Bereinigungseffekt auf die EKPs visueller semantischer Sprachverarbeitung zu haben. Dies ermöglichte es, trotz der im Zuge der Differenzbildung abnehmender Reliabilität, Zusammenhänge zwischen dem bedeutungsspezifischen Anteil der PSA und verbaler Intelligenz zu finden, wobei die Varianz letzterer in Studierendenstichproben ohnehin eher eingeschränkt sein sollte. Bemerkenswerterweise blieb dieser Zusammenhang in vergleichbarer Höhe auch dann noch bestehen, wenn für den Einfluss nonverbaler Intelligenz kontrolliert wurde (Studie 2). Die Nullkorrelation zum Maß für nonverbale Intelligenz kann als divergente Validität im Sinne der Sprachspezifität der PSA interpretiert werden. Die Interpretation erhöhter PSA-Amplituden als Indikator eines höheren Verarbeitungsaufwandes und mehr zugewendeten Ressourcen ist ebenfalls mit den Befunden aus der Gedächtnisstudie (Studie 4) vereinbar. Hier ging die Enkodierung distinkter Stimuli, denen naturgemäß mehr Aufmerksamkeit zugewendet wird, mit erhöhten (d. h. negativeren) Amplituden der späten PSA einher (Abbildung 7 A und B) und die Ergebnisse lieferten Evidenz für das Auftreten der Komponente auch in anderen experimentellen Kontexten.

Die Ergebnisse von Studie 2 und 3 in denen weder für Bilder noch für gesprochene Wörter eine PSA auftrat (siehe Abbildungen 3 und 6) weisen darauf hin, dass die PSA einen Anteil semantischer

Sprachverarbeitung widerspiegelt, der als materialspezifisch (visuell und verbal) beschrieben werden muss und zeitlich *vor* amodaler semantischer Verarbeitung stattfindet. Das Auftreten einer, wenn auch zeitlich etwas verzögerten, jedoch topographisch vergleichbaren PSA beim Enkodieren visueller Einzelwörter mit unterschiedlicher Distinktheit (Studie 4), kann als weitere Evidenz für die Validität der PSA als bedeutsames Maß im Kontext der Verarbeitung visuell-verbaler Materials verstanden werden¹³.

Amodale semantische Aktivität in EKPs wird vermutlich weiterhin am besten durch die N400-Komponente abgebildet, die für unterschiedlichste Arten von Stimuli beobachtet werden konnte: Für auditiv- und visuell-verbales Material, aber auch für andere Stimuli wie Zeichnungen, Bilder und Videos (siehe Reviews von Kutas & Federmeier, 2011; Swaab et al., 2012). Ungeklärt ist hierbei noch die genaue Beziehung zwischen PSA und N400. Zwar weisen beide zeitlich distinkte Peaks auf, die Komponenten sind aber dennoch zeitlich überlappend. Zusätzlich gibt es für beide Komponenten Hinweise auf eine links-temporale Quelle. Dies macht es nicht unwahrscheinlich, dass die PSA möglicherweise auch eine Rolle für die Initiierung von Prozessen spielt, die sich in der zeitlich nachfolgenden N400-Komponente widerspiegeln. Eine Studie zur Untersuchung der genauen Beziehung zwischen den beiden Komponenten steht jedoch noch aus. Die Studien dieser Arbeit liefern diesbezüglich keine verwertbaren Informationen, da keine der Studien Aufgabenbedingungen umfasste, die eine Verletzung des semantischen Kontextes beinhalteten. Solch eine semantische Verletzung hätte den Aufwand der Integration für bestimmte Stimuli erhöht und stellt eine übliche experimentelle Manipulation zur Modulation der N400-Komponente dar (Brown & Hagoort, 1993; Swaab et al., 2012; van den Brink et al., 2001).

4.2 Mögliche konfundierende Variablen, Alternativerklärungen und Kontrollanalysen

Trotz der insgesamt guten Übereinstimmung der PSA-Befunde mit den Ergebnissen von Läsions- und Bildgebungsstudien ist neben einer unabhängigen Replikation durch andere Arbeitsgruppen eine Untersuchung der PSA hinsichtlich des potenziellen Einflusses zahlreicher möglicher konfundierender Variablen notwendig. Zudem müssen alternative Interpretationen der aktuell angenommenen Spezifität der PSA für visuelle semantische Wortverarbeitung diskutiert und untersucht werden.

Zu den möglichen konfundierenden Variablen zählen unter anderem Eigenschaften der Probanden, wie ihre Händigkeit oder ihr Geschlecht, die möglicherweise Auswirkungen auf die Lateralisierung von Sprachverarbeitung haben (Clements et al., 2006; Hagmann et al., 2006; Kansaku, 2000; Knecht

¹³ Dieser Befund ist zwar nicht als direkter Hinweis der Spezifität der PSA für visuell-verbales Material misszuverstehen, widerspricht dieser jedoch auch nicht und kann als wiederholte, die Validität der PSA stützende, Replikation verstanden werden.

et al., 2000). Die Händigkeit wurde in allen Studien gleich gehalten, indem nur Rechtshänder in die Analysen eingeschlossen wurden. Die erhobenen Stichproben setzten sich zwar aus weiblichen und männlichen Probanden zusammen, insgesamt waren in allen Studien jedoch die weiblichen Studierenden deutlich in der Überzahl. Da es Evidenz dafür gibt, dass Frauen tendenziell weniger lateralisierte Aktivität bei der Sprachverarbeitung aufweisen als Männer (Clements et al., 2006; Hagmann et al., 2006; Kansaku, 2000; Knecht et al., 2000), sollte dieses Ungleichgewicht jedoch, wenn überhaupt, das Auffinden lateralisierter Aktivität erschwert und nicht etwa begünstigt haben. Eine Analyse der vorliegenden Daten zur Überprüfung potenzieller Geschlechtseffekte auf die lateralisierten Komponenten ergab - übereinstimmend mit aktuellen Übersichtsarbeiten zur Lateralisierung von Sprachprozessen im Gehirn (Sommer, Aleman, Somers, Boks & Kahn, 2008; Sommer, Aleman, Bouma & Kahn, 2004; Wallentin, 2009) - auch in den Studien der vorliegenden Arbeit keine Unterschiede zwischen Frauen und Männern¹⁴.

Gerade für frühe EKP-Komponenten der visuellen Wortverarbeitung sind Einflüsse von Eigenschaften wie der Wortlänge oder der Worthäufigkeit bekannt (Hauk & Pulvermüller, 2004a; Penolazzi et al., 2007; Pulvermüller et al., 2009). Diese Eigenschaften wurden deshalb in den Studien 1, 2 und 3 zwischen den Stimulussets, die den unterschiedlichen Aufgabenbedingungen zugeordnet wurden, gleichgehalten (Studien 1, 2 und 3). Für Studie 4 wurden die Stimulussets randomisiert aus einem Pool von Wörtern gewählt. In Studie 5 wurde die Länge der verwendeten Stimuli gleich gehalten, aber die Häufigkeit experimentell manipuliert und als Variable in der Auswertung berücksichtigt.

Auch hinsichtlich der gefundenen PSA-Amplitudenunterschiede zwischen der semantischen Aufgabenbedingung im Vergleich zu beiden Kontrollbedingungen der Studien 1, 2 und 3 gibt es einige diskussionswürdige Alternativerklärungen. So wäre es beispielsweise denkbar, dass nicht das Ausmaß der semantischen Aktivierung, sondern vielmehr erhöhte Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis und exekutive Funktionen in der Bedeutungsbedingung zu erhöhten PSA-Amplituden geführt haben. So mussten in der Bedeutungsbedingung die Tierwörter gezählt werden, die aktuelle Anzahl gemerkt und mit jedem neuen Tierwort deren Anzahl um eins erhöht werden. Dem ist jedoch entgegenzuhalten, dass die Trials in denen Tierwörter präsentiert wurden (d. h. die aktuelle Anzahl reaktiviert und aktualisiert werden musste), nicht in die Analysen eingeschlossen wurden. Weiterhin würde man EKP-Effekte von Arbeitsgedächtnis und exekutiven Funktionen eher in frontalen

¹⁴ Angaben ergänzend zu den in den Veröffentlichungen berichteten Analysen. Keine Haupteffekte (HE) des Geschlechts und keine Interaktionen (IAs) von Geschlecht und Aufgabenbedingung auf die PSA in den Studien 1 bis 3 (Studie 1, HE: $F(1, 38) = 0.98, p = .330$, IA: $F(2, 76) = 0.70, p = .499$; Studie 2, HE: $F(1, 40) = 0.09, p = .762$, IA: $F(2, 80) = 1.54, p = .221$; Studie 3, HE: $F(1, 18) = 0.41, p = .528$, IA: $F(2, 36) = 1.29, p = .289$). Kein HE des Geschlechts und keine IAs von Geschlecht mit Distinktheit ($IA_{G \times D}$) oder Erinnerung ($IA_{G \times E}$) und keine 3-fach IA zwischen den Faktoren ($IA_{G \times D \times E}$) auf die späte PSA in Studie 4 (HE: $F(1, 43) = 0.47, p = .497$, $IA_{G \times D}$: $F(1, 43) = 0.33, p = .568$, $IA_{G \times E}$: $F(1, 43) = 0.15, p = .698$, $IA_{G \times D \times E}$: $F(1, 43) = 2.82, p = .100$). Kein HE und keine IAs von Geschlecht mit Aufmerksamkeit ($IA_{G \times A}$) oder Stimulustyp ($IA_{G \times S}$) und keine 3-fach Interaktion zwischen den Faktoren ($IA_{G \times A \times S}$) in Studie 5 (HE: $F(1, 23) = 0.3, p = .865$, $IA_{G \times A}$: $F(1, 23) = 3.49, p = .075$, $IA_{G \times S}$: $F(3, 69) = 1.07, p = .366$, $IA_{G \times A \times S}$: $F(3, 69) = 0.41, p = .744$).

Regionen erwarten (Binder et al., 2009; Bookheimer, 2002; Gernsbacher & Kaschak, 2003; Price, 2000), was nicht zur Topographie der beobachteten PSA (Abbildungen 1 B, 2 B, 5 B und 7 A) und ihres maximalen Aufgabenunterschieds passt (Abbildungen 1 D, 2 D und 5 D).

Eine weitere Alternativerklärung für die beobachteten PSA-Amplitudenunterschiede könnte in Unterschieden früherer perzeptuell-visueller EKP-Komponenten wie der P1 oder der N170 zu suchen sein. Effekte der Aufgabenbedingungen auf solche frühen EKPs wurden untersucht, resultierten aber entweder in gar keinen signifikanten Amplitudenunterschieden (Studie 2) oder lediglich in Aufgabeneffekten der Art, dass sich die beiden aktiven Aufgabenbedingungen (Artikulations- und Bedeutungsbedingung) nicht signifikant voneinander, aber beide von der Formbedingung unterschieden (Studie 1 und 3), was zeitlich spätere PSA-Amplitudenunterschiede zwischen der Artikulations- und der Bedeutungsbedingung nicht erklären kann. In Studie 1 wurden zudem die Peak-Latenzen aus den drei Aufgabenbedingungen auf Unterschiede geprüft, hier zeigten sich jedoch keinerlei Effekte. Dies spricht dafür, dass die linkslateralisierte Verarbeitungsnegativität in allen drei Bedingungen einen ähnlichen Verlauf aufwies und sich lediglich in ihrem Ausmaß (der Amplitude) unterschied.

Auch die Analyse von Bedingungseffekten auf das horizontale und das vertikale EOG (Analysen in den Artikeln zu Studie 2 und 3) ergab keine systematischen Unterschiede. Dementsprechend ist anzunehmen, dass die beobachtete Aufgabenvariation der PSA nicht auf EOG-Artefakten beruht. Um sicherzustellen, dass eine einzelne Bedingung (insbesondere die Bedeutungsbedingung) nicht stärker von Artefakten betroffen war als die anderen Bedingungen, wurde auch der prozentuale Anteil der Artefakttrials an allen Trials der Aufgabenbedingungen auf Unterschiede getestet, wobei aber in keiner der Studien (1 bis 3) Unterschiede auftraten. Sofern statistische Kennwerte zu den Kontrollanalysen in diesem Unterkapitel nicht berichtet wurden, finden sich diese in den zugehörigen Publikationen.

4.3 Bewertung und Ausblick auf zukünftige Studien und mögliche Anwendungsbereiche

Insgesamt ist aufgrund der sehr einfachen Aufgabenbedingungen unter relativ natürlichen Lesebedingungen die ökologische Validität der ersten drei Studien zur Etablierung eines lateralisierten EKP-Maßes semantischer Wortverarbeitung hervorzuheben. Das neue Lateralisierungsmaß ermöglichte es erstmals bei Betrachtung von EKPs linkslateralisierte Effekte semantischer Sprachverarbeitung zu betrachten, die in den unlateralisierten EKPs in dieser Form nicht transparent wurden. Hierzu war lediglich die Berechnung eines Lateralisierungsmaßes notwendig, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden. Dies stellt vor allem im Vergleich mit aufwendigeren Verfahren, wie der Berechnung

einer PCA oder der Anwendung eines Quellenlokalisationsverfahren wie der sLORETA einen denkbar einfachen Verarbeitungsschritt dar. Zudem stellt das EEG insgesamt ein kostengünstiges und breit verfügbares Verfahren dar, zumindest im Vergleich zu fMRT und MEG (Luck, 2014).

Des Weiteren kann positiv hervorgehoben werden, dass die Aufgabenbedingungen, im Gegensatz zu Gibbons und Kollegen (2014), experimentell manipuliert und im Innersubjekt-Design untersucht wurden. Dementsprechend kann ausgeschlossen werden, dass Aufgabeneffekte auf systematische Unterschiede zwischen Versuchspersonen zurückzuführen sind. Außerdem sind die gefundenen Aufgabenunterschiede in der PSA-Amplitude insofern bemerkenswert, als dass die Kontrollbedingungen eher konservativ gewählt wurden, was das Auffinden von Aufgabenunterschieden erschwerte. Dies gilt insbesondere dann, wenn man wie manche Autoren annimmt, dass es beim Lesen von Wörtern unvermeidbar ist auch deren Bedeutung zu aktivieren (Simon et al., 2004).

Für einen Großteil der Probanden (im Mittel 86% der Probanden der Studien 1 bis 3)¹⁵ war die PSA-Amplitude in der Bedeutungsbedingung in den lateralisierten EKPs absolut negativ und somit als Verarbeitungsnegativität erkennbar. Dies kann als erster Hinweis auf die potenzielle, über eine Analyse auf Gruppenebene hinausgehende, Anwendbarkeit der PSA auch für die Untersuchung semantischer Verarbeitung auf Individualebene gesehen werden. Im Vorfeld solcher individueller Analysen wären allerdings zusätzliche umfassende Validierungsmaßnahmen sowie die Untersuchung in anderen Stichproben vonnöten.

Die Limitationen der vorliegenden Arbeit bieten größtenteils zugleich auch spannende Ansätze für weitere EKP-Studien zur Untersuchung semantischer Sprachverarbeitung unter Verwendung des Lateralisierungsmaßes. So wurden in allen Studien lediglich Einzelwörter und ausschließlich studentische Stichproben untersucht, welche hinsichtlich einiger Eigenschaften wie Alter, Geschlecht, und Intelligenz insbesondere im Fach Psychologie sehr homogen sind. Diese Stichprobeneigenschaften führen zu einer stark eingeschränkten Generalisierbarkeit der Befunde. Zukünftig wäre es deshalb wünschenswert, die PSA-Komponente auch an anderen Stichproben zu untersuchen. Da die bisherigen Studien ausschließlich Rechtshänder und größtenteils weibliche Probandinnen umfassten (im Mittel 75%)¹⁶ wäre in einem ersten Schritt eine Replikation der Befunde in einer Stichprobe von Linkshändern, sowie die Untersuchung männlicher Probanden von Interesse. Außerdem sollte die Replizierbarkeit der PSA in weiteren Aufgabenbedingungen und unter Verwendung anderen visuellen Sprachmaterials, z. B. Wörter im Satzkontext, überprüft werden.

¹⁵ Studie 1: 31 von 40 Probanden (78%); Studie 2: 40 von 42 Probanden (95%); Studie 3: 17 von 20 der Probanden (85%), die zuerst visuelle Wörter gesehen hatten.

¹⁶ Studie 1: 31 weibliche von 40 Probanden (78%); Studie 2: 26 weibliche von 42 Probanden (62%); Studie 3: 33 weibliche von 38 Probanden (87%).

Weitere Aufgabenbedingungen könnten z. B. komplexere Anforderungen an die semantische Verarbeitung stellen und/oder andere Teilaspekte semantischer Verarbeitung (als die Aktivierung der semantischen Kategorie) ansprechen. Möglich wäre auch die Variation der Komplexität der verwendeten Stimuli selbst; so wäre es denkbar die PSA in Reaktion auf ambigüe Wörter (d. h. Wörter mit mehreren Bedeutungen) mit der auf Wörter mit nur einer Bedeutung zu vergleichen. Der Aufwand der Bedeutungsaktivierung bei mehrdeutigen Wörtern sollte hierbei höher sein als bei eindeutigen Wörtern. Eine weitere Möglichkeit wäre auch der Vergleich der PSA für häufige und seltene Wörter, wobei der Aufwand der Bedeutungsaktivierung für letztere höher ausfallen sollte.

Die beobachteten Zusammenhänge mit verbaler Intelligenz und die daraus resultierende Interpretation der PSA-Amplitude als Aufwand der semantischen Aktivierung machen die Komponente zur Untersuchung von Stichproben mit Schwierigkeiten bei der Aktivierung der Wortbedeutung interessant. Solche Stichproben könnten sich aus Populationen von Patienten mit semantischer Demenz, Herpes Simplex Virus Enzephalitis oder Schlaganfall mit Athrophien im linken Temporallappen zusammensetzen, die Probleme beim Verständnis visueller Wörter aufweisen. Ebenfalls interessant wären Untersuchungen von Personen mit Legasthenie. Sollten in solchen Stichproben Zusammenhänge zwischen der PSA-Amplitude und Verhaltensdefiziten auftreten, wäre dies ein weiterer Hinweis auf die Validität der PSA als Maß für den Aufwand der semantischen Aktivierung. Die PSA könnte dann gegebenenfalls zukünftig auch als Indikator für das Ausmaß kognitiver Einschränkungen bei ebendiesen Patientengruppen interessant werden.

In Hinblick auf die weitere Validierung der Komponente wären ebenfalls im Idealfall Längs-, aber auch Querschnittstudien, interessant, welche die Eigenschaften der PSA im Verlauf des Erwerbs der Lesefertigkeit untersuchen könnten. Mit zunehmender Lesekompetenz der Kinder sollte der zu betreibende Aufwand im Zuge der semantischen Aktivierung von Wörtern generell abnehmen. Dies sollte, basierend auf den vorliegenden Befunden, entweder mit einer Reduktion der absoluten PSA-Amplitude in der Bedeutungsbedingung oder einer Reduktion des bedeutungsspezifischen Anteils der PSA-Amplitude einhergehen. Eventuell ließe sich bei entsprechenden Befunden so auch ein indirekter, elektrophysiologischer Indikator für die Früherkennung von Schwierigkeiten beim Erwerb der Lesekompetenz (im Sinne von Verständnisdefiziten) bei Leseanfängern entwickeln. Als Vorstufe solcher aufwendigen, im Idealfall im Längsschnitt angelegten Studien mit Kindern, könnten Unterschiede im Sprachverständnis auch bei Erwachsenen über einen Vergleich der Verarbeitung von Wörtern aus der Erst- und Zweitsprache (L1 und L2) untersucht werden. Hierbei müssten neben zahlreichen weiteren Variablen auch der Wortschatz in L1 und L2 kontrolliert sowie die Bekanntheit und Vertrautheit der verwendeten Wörter, bestenfalls auf den individuellen Probanden abgestimmt, variiert werden. Eine solche Studie könnte dann aber weitere Hinweise darauf geben, ob die PSA-

Amplitude tatsächlich mit dem Aufwand der semantischen Aktivierung von visuellen Einzelwörtern variiert und auch für andere als die deutsche Sprache nachgewiesen werden kann.

Wie bereits zu Beginn dieses Unterkapitels angedeutet und unter Berücksichtigung der aktuellen Replizierbarkeitsdebatte, wäre es äußerst wünschenswert, dass die Idee der Verwendung des Lateralisierungsmaßes, insbesondere zur Untersuchung semantischer Sprachverarbeitung, von unabhängigen Arbeitsgruppen aufgegriffen werden würde. Kooperationsstudien eventuell unter der kombinierten Verwendung von EEG und fMRT wären ebenfalls von hohem Wert, um die PSA bei denselben Probanden und denselben Aufgabenbedingungen direkt mit den vorgeschlagenen Aktivitätsquellen eines bildgebenden Verfahrens in Beziehung setzen zu können.

4.4 Fazit zur PSA und der Nützlichkeit von Lateralisierungsmaßen in der EKP-

Sprachforschung

Lateralisierte, sprachspezifische Aktivität wie sie durch Bildgebungsstudien nahegelegt wird, kann durch den Einsatz eines simplen Lateralisierungsmaßes, gewonnen aus der Subtraktion rechtsseitiger von linksseitiger Aktivität homologer Elektroden, bei exzellenter zeitlicher Auflösung mit EKPs sichtbar gemacht werden. Für semantische Sprachverarbeitung visueller Wörter trat in den EKPs eine Verarbeitungsnegativität auf, die erst in den lateralisierten EKPs transparent wurde und als posteriore semantische Asymmetrie benannt wurde. Diese erwies sich als sensitiv für die Anforderungen von Aufgaben an die semantische Verarbeitung von visuellen Wörtern und zeigte in allen drei Studien eine maximale Amplitude um 300 ms sowie eine temporoparietale Topographie. Diese Topographie stimmt mit Aktivitätsquellen semantischer Sprachverarbeitung überein, wie sie von einer Vielzahl von Läsions- und Bildgebungsstudien vorgeschlagen wurden. Zudem konnte sie durch die Anwendung weiterer methodischer Ansätze, einer CSD-Transformationen, einer PCA, sowie einer sLORETA, Ansätze die ebenso wie der Hemisphärendifferenzansatz das Überlagerungsproblem bei EKPs verringern sollten, bestätigt werden.

Die PSA tritt zeitlich nach der visuell-perzeptuellen N170-Komponente aber vor der N400-Komponente, welche bisher in erster Linie mit semantischer Sprachverarbeitung in Verbindung gebracht wurde, auf. Diese zeitliche Einordnung legt eine Interpretation der PSA als Indikator eines Prozesses nahe, der *nach* basalen perzeptuellen, aber *vor* der semantischen Integration von Stimuli stattfindet. Ein solcher Prozess könnte zum Beispiel die Aktivierung der Stimuluskategorie visueller Wörter sein, wie sie in der semantischen Aufgabenbedingung von Studien 1, 2 und 3 vonnöten war. Der Befund stellt insofern eine Neuheit in der EKP-Forschung dar, als dass bisher keine EKP-Komponente beschrieben wurde, die frühe posteriore linkslateralisierte semantische Aktivität

reflektierte und in Abhängigkeit unterschiedlicher Anforderungen von Aufgabenbedingungen an die semantische Verarbeitung variierte.

Die Berechnung eines Lateralisierungsmaßes scheint insbesondere zur Herausarbeitung sprachlicher Aktivität in Reaktion auf visuelle Wörter nützlich zu sein, da sich für die PSA Zusammenhänge mit verbaler Intelligenz erst nach Differenzbildung nicht aber für die unlateralisierten linkshemisphärischen EKP-Wellenformen zeigten. Der Nutzen des Lateralisierungsmaßes im Zusammenhang mit visueller Sprachverarbeitung zeigte sich zudem im Rahmen einer Wiedererkennungsaufgabe (Studie 5): Die simultane Betrachtung von Aufmerksamkeits- und Stimulustypeffekten sowie deren Interaktion war hier nur nach Berechnung der lateralisierten EKPs möglich. Auf Grundlage der empirischen Evidenz der vorliegenden Studien erscheinen Lateralisierungsmaße allgemein zur Untersuchung von Sprachverarbeitung nützlich sowie die PSA-Komponente insbesondere zur Untersuchung der semantischen Verarbeitung visueller Einzelwörter vielversprechend. Die PSA birgt hierbei möglicherweise über die Grundlagenforschung hinausgehendes Potential zur Anwendung in der Einzelfalldiagnostik sowie zur Erforschung anwendungsorientierter Fragen.

Literaturverzeichnis

- Abbott, D. F., Waites, A. B., Lillywhite, L. M., & Jackson, G. D. (2010). fMRI assessment of language lateralization: An objective approach. *NeuroImage*, *50*(4), 1446–1455.
doi:10.1016/j.neuroimage.2010.01.059
- Amthauer, R., Brocke, B., Liepmann, D., & Beauducel, A. (2001). *Intelligenz-Struktur-Test 2000 R*. Göttingen: Hogrefe.
- Amunts, K., & Zilles, K. (2012). Architecture and organizational principles of Broca's region. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(8), 418–426. doi:10.1016/j.tics.2012.06.005
- Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016). How localized are language brain areas? A review of Brodmann Areas involvement in oral language. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *31*(1), 112–122. doi:10.1093/arclin/acv081
- Assadollahi, R., & Pulvermüller, F. (2001). Neuromagnetic evidence for early access to cognitive representations: *Neuroreport*, *12*(2), 207–213. doi:10.1097/00001756-200102120-00007
- Bates, E., Wilson, S. M., Saygin, A. P., Dick, F., Sereno, M. I., Knight, R. T., & Dronkers, N. F. (2003). Voxel-based lesion–symptom mapping. *Nature Neuroscience*, *6*(5), 448–450.
doi:10.1038/nn1050
- Bentin, S., Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M., Echallier, J., & Pernier, J. (1999). ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(3), 235–260.
doi:10.1162/089892999563373
- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, *87*(1), 527–570. doi:10.1007/BF01797193
- Bertrand, O., Perrin, F., & Pernier, J. (1985). A theoretical justification of the average reference in topographic evoked potential studies. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *62*, 462–464. doi:10.1016/0168-5597(85)90058-9
- Binder, J. R., & Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(11), 527–536. doi:10.1016/j.tics.2011.10.001
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, *19*(12), 2767–2796. doi:10.1093/cercor/bhp055
- Boatman, D. (2000). Transcortical sensory aphasia: revisited and revised. *Brain*, *123*(8), 1634–1642.
doi:10.1093/brain/123.8.1634

- Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: Approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25(1), 151–188. doi:10.1146/annurev.neuro.25.112701.142946
- Brem, S., Bucher, K., Halder, P., Summers, P., Dietrich, T., Martin, E., & Brandeis, D. (2006). Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence. *NeuroImage*, 29(3), 822–837. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.09.023
- Broca, M. P. (1861). Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d’une observation a’apéhmie (perte de la parole). *Bulletin et Memoires de la Societe anatomique de Paris*, 6, 330–357.
- Brown, C., & Hagoort, P. (1993). The processing nature of the N400: Evidence from masked priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(1), 34–44. doi:10.1162/jocn.1993.5.1.34
- Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the brain*. Oxford ; New York: Oxford University Press.
- Buzsáki, G., Anastassiou, C. A., & Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents — EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(6), 407–420. doi:10.1038/nrn3241
- Cabeza, R., & Nyberg, L. (2000). Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Imaging*, 12(1), 1–47. doi:10.1162/08989290051137585
- Caramazza, A., & Zurif, E. B. (1976). Dissociation of algorithmic and heuristic processes in language comprehension: Evidence from aphasia. *Brain and Language*, 3(4), 572–582. doi:10.1016/0093-934X(76)90048-1
- Chan, D., Whitwell, J. L., Leschziner, G., Cipolotti, L., & Rossor, M. N. (2001). Patterns of temporal lobe atrophy in semantic dementia and Alzheimer’s disease. *Annals of Neurology*, 49, 433–442.
- Chatrian, G.-E., Lettich, E., & Nelson, P. L. (1988). Modified nomenclature for the “10%” electrode system. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 5(2), 183–186.
- Clements, A. M., Rimrodt, S. L., Abel, J. R., Blankner, J. G., Mostofsky, S. H., Pekar, J. J., ... Cutting, L. E. (2006). Sex differences in cerebral laterality of language and visuospatial processing. *Brain and Language*, 98(2), 150–158. doi:10.1016/j.bandl.2006.04.007
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M.-A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123, 291–307. doi:10.1093/brain/123.2.291
- Cohen, L., Lehéricy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., & Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, 125, 1054–1069. doi:10.1093/brain/awf094

- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, *108*(1), 204–256. doi:10.1037/0033-295X.108.1.204
- Constable, R. T., Pugh, K. R., Berroya, E., Mencl, W. E., Westerveld, M., Ni, W., & Shankweiler, D. (2004). Sentence complexity and input modality effects in sentence comprehension: an fMRI study. *NeuroImage*, *22*(1), 11–21. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.01.001
- Cornelissen, P. L., Kringelbach, M. L., Ellis, A. W., Whitney, C., Holliday, I. E., & Hansen, P. C. (2009). Activation of the left inferior frontal gyrus in the first 200 ms of reading: evidence from Magnetoencephalography (MEG). *PLoS ONE*, *4*(4), e5359. doi:10.1371/journal.pone.0005359
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *11*(6), 671–684. doi:10.1016/S0022-5371(72)80001-X
- Craik, F. I. M., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *104*(3), 268–294. doi:10.1037/0096-3445.104.3.268
- Davidson, R. J., Jackson, D. C., & Larson, C. L. (2000). Human electroencephalography. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (Eds.), *Handbook of Psychophysiology* (2nd ed., pp. 27–52). New York, NY: Cambridge University Press.
- Davies, R. R., Hodges, J. R., Kril, J. J., Patterson, K., Halliday, G. M., & Xuereb, J. H. (2005). The pathological basis of semantic dementia. *Brain*, *128*(9), 1984–1995. doi:10.1093/brain/awh582
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 335–341. doi:10.1016/j.tics.2005.05.004
- Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuciu, P., Poline, J.-B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2004). Letter binding and invariant recognition of masked words behavioral and neuroimaging evidence. *Psychological Science*, *15*(5), 307–313. doi:10.1111/j.0956-7976.2004.00674.x
- Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Le Bihan, D., Mangin, J.-F., Poline, J.-B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature Neuroscience*, *4*(7), 752–758. doi:10.1038/89551
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes Filho, G., Jobert, A., ... Cohen, L. (2010). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science*, *330*(6009), 1359–1364. doi:10.1126/science.1194140
- Dejerine, J. (1891). Sur un cas de cécité verbale avec agraphie, suivi d'autopsie. *Mémoires de La Société Biologique*, *3*, 197–201.

- Dejerine, J. (1892). Contribution a l'étude anatomoclinique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Compte Rendu Hebdomadaire Des Séances et Mémoires de La Société de Biologie*, 4, 61–90.
- Demb, J. B., Desmond, J. E., Wagner, A. D., Vaidya, C. J., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. E. (1995). Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: A functional MRI study of task difficulty and process specificity. *The Journal of Neuroscience*, 15(9), 5870–5878. doi:10.1523/JNEUROSCI.15-09-05870.1995
- Démonet, J.-F., Thierry, G., & Cardebat, D. (2005). Renewal of the neurophysiology of language: functional neuroimaging. *Physiological Reviews*, 85(1), 49–95. doi:10.1152/physrev.00049.2003
- Dien, J. (1998). Issues in the application of the average reference: Review, critiques, and recommendations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 30(1), 34–43. doi:10.3758/BF03209414
- Dien, J. (2009). The neurocognitive basis of reading single words as seen through early latency ERPs: A model of converging pathways. *Biological Psychology*, 80(1), 10–22. doi:10.1016/j.biopsycho.2008.04.013
- Dien, J. (2012). Applying principal components analysis to event-related potentials: a tutorial. *Developmental Neuropsychology*, 37(6), 497–517. doi:10.1080/87565641.2012.697503
- Dien, J., Brian, E. S., Molfese, D. L., & Gold, B. T. (2013). Combined ERP/fMRI evidence for early word recognition effects in the posterior inferior temporal gyrus. *Cortex*, 49(9), 2307–2321. doi:10.1016/j.cortex.2013.03.008
- Dien, J., Frishkoff, G. A., Cerbone, A., & Tucker, D. M. (2003). Parametric analysis of event-related potentials in semantic comprehension: evidence for parallel brain mechanisms. *Cognitive Brain Research*, 15(2), 137–153. doi:10.1016/S0926-6410(02)00147-7
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, 11(03), 357. doi:10.1017/S0140525X00058027
- Dronkers, N. F., Wilkins, D. P., Van Valin, R. D., Redfern, B. B., & Jaeger, J. J. (2004). Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition*, 92(1–2), 145–177. doi:10.1016/j.cognition.2003.11.002
- Eimer, M. (1998). The lateralized readiness potential as an on-line measure of central response activation processes. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 30(1), 146–156. doi:https://doi.org/10.3758/BF03209424
- Embick, D., Hackl, M., Schaeffer, J., Kelepir, M., & Marantz, A. (2001). A magnetoencephalographic component whose latency reflects lexical frequency. *Cognitive Brain Research*, 10(3), 345–348. doi:10.1016/S0926-6410(00)00053-7

- Fabiani, M., Gratton, G., & Federmeier, K. D. (2007). Event-related brain potentials: Methods, theory and applications. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (Eds.), *Handbook of Psychophysiology* (3rd ed, S. 85–119). New York: Cambridge University Press.
- Fabiani, M., Karis, D., & Donchin, E. (1990). Effects of mnemonic strategy manipulation in a von Restorff paradigm. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *75*, 22–35. doi:10.1016/0013-4694(90)90149-E
- Fiebach, C. J., Friederici, A. D., Müller, K., & von Cramon, Y. (2002). fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(1), 11–23. doi:10.1162/089892902317205285
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (3rd edition). Los Angeles: Sage.
- Friederici, A. D., & Kilborn, K. (1989). Temporal constraints on language processing: syntactic priming in broca's aphasia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *1*(3), 262–272. doi:10.1162/jocn.1989.1.3.262
- Friederici, A. D., Opitz, B., & von Cramon, Y. (2000). Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: An fMRI investigation of different words. *Cerebral Cortex*, *10*, 698–705. doi:10.1093/cercor/10.7.698
- Fuchs, M., Wagner, M., Köhler, T., & Wischmann, H.-A. (1999). Linear and nonlinear current density reconstructions: *Journal of Clinical Neurophysiology*, *16*(3), 267–295. doi:10.1097/00004691-199905000-00006
- Galton, C. J., Patterson, K., Graham, K., Lambon Ralph, M. A., Williams, G., Antoun, N., ... Hodges, J. R. (2001). Differing patterns of temporal atrophy in Alzheimer's disease and semantic dementia. *Neurology*, *57*, 216–225. doi:10.1212/WNL.57.2.216
- Ganis, G., Kutas, M., & Sereno, M. I. (1996). The search for "common sense": an electrophysiological study of the comprehension of words and pictures in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(2), 89–106. doi:10.1162/jocn.1996.8.2.89
- Gehring, W. J., Liu, Y., Orr, J. M., & Carp, J. (2012). The error-related negativity (ERN/Ne). In *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components* (S. 231–292). New York: Oxford University Press.
- Gernsbacher, M. A., & Kaschak, M. P. (2003). Neuroimaging studies of language production and comprehension. *Annual Review of Psychology*, *54*(1), 91–114. doi:10.1146/annurev.psych.54.101601.145128
- Gibbons, H., Bachmann, O., & Stahl, J. (2014). The more you ignore me the closer I get: An ERP study of evaluative priming. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *14*(4), 1467–1484. doi:10.3758/s13415-014-0289-4

- Glezer, L. S., Jiang, X., & Riesenhuber, M. (2009). Evidence for highly selective neuronal tuning to whole words in the “visual word form area.” *Neuron*, *62*(2), 199–204.
doi:10.1016/j.neuron.2009.03.017
- Goldstein, F. C., Levin, H. S., Boake, C., & Lohrey, J. H. (1990). Facilitation of memory performance through induced semantic processing in survivors of severe closed-head injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *12*(2), 286–300.
doi:10.1080/01688639008400975
- Hagmann, P., Cammoun, L., Martuzzi, R., Maeder, P., Clarke, S., Thiran, J.-P., & Meuli, R. (2006). Hand preference and sex shape the architecture of language networks. *Human Brain Mapping*, *27*(10), 828–835. doi:10.1002/hbm.20224
- Hagoort, P., & Brown, C. M. (2000). ERP effects of listening to speech: semantic ERP effects. *Neuropsychologia*, *38*(11), 1518–1530. doi:10.1016/S0028-3932(00)00052-X
- Hagoort, P., Hald, L., Bastiaansen, M., & Petersson, K. M. (2004). Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension. *Science*, *304*(5669), 435–438.
doi:10.1126/science.1097196
- Halgren, E., Dhond, R. P., Christensen, N., Van Petten, C., Marinkovic, K., Lewine, J. D., & Dale, A. M. (2002). N400-like magnetoencephalography responses modulated by semantic context, word frequency, and lexical class in sentences. *NeuroImage*, *17*(3), 1101–1116.
doi:10.1006/nimg.2002.1268
- 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*(2), 413–497.
doi:10.1103/RevModPhys.65.413
- Hart, J., & Gordon, B. (1990). Delineation of single-word semantic comprehension deficits in aphasia, with anatomical correlation. *Annals of Neurology*, *27*(3), 226–231.
doi:10.1002/ana.410270303
- Hauk, O., Coutout, C., Holden, A., & Chen, Y. (2012). The time-course of single-word reading: Evidence from fast behavioral and brain responses. *NeuroImage*, *60*(2), 1462–1477.
doi:10.1016/j.neuroimage.2012.01.061
- Hauk, O., Davis, M. H., Ford, M., Pulvermüller, F., & Marslen-Wilson, W. D. (2006). The time course of visual word recognition as revealed by linear regression analysis of ERP data. *NeuroImage*, *30*(4), 1383–1400. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.11.048
- Hauk, O., Patterson, K., Woollams, A., Watling, L., Pulvermüller, F., & Rogers, T. T. (2006). [Q:] When would you prefer a SOSSAGE to a SAUSAGE?[A:] At about 100 msec. ERP correlates of

- orthographic typicality and lexicality in written word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(5), 818–832.
- Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2004a). Effects of word length and frequency on the human event-related potential. *Clinical Neurophysiology*, 115(5), 1090–1103.
doi:10.1016/j.clinph.2003.12.020
- Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2004b). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Human Brain Mapping*, 21(3), 191–201. doi:10.1002/hbm.10157
- Hauk, O., Pulvermüller, F., Ford, M., Marslen-Wilson, W. D., & Davis, M. H. (2009). Can I have a quick word? Early electrophysiological manifestations of psycholinguistic processes revealed by event-related regression analysis of the EEG. *Biological Psychology*, 80(1), 64–74.
doi:10.1016/j.biopsycho.2008.04.015
- Helenius, P., Salmelin, R., Service, E., & Connolly, J. F. (1998). Distinct time courses of word and context comprehension in the left temporal cortex. *Brain*, 121(6), 1133–1142.
doi:10.1093/brain/121.6.1133
- Helenius, P., Salmelin, R., Service, E., Connolly, J. F., Leinonen, S., & Lyytinen, H. (2002). Cortical activation during spoken-word segmentation in nonreading-impaired and dyslexic adults. *The Journal of Neuroscience*, 22(7), 2936–2944. doi:10.1523/JNEUROSCI.22-07-02936.2002
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 393–402. doi:10.1038/nrn2113
- Hillyard, S. A., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (1998). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 353(1373), 1257–1270.
doi:10.1098/rstb.1998.0281
- Hinojosa, J. A., Martin-Loeches, M., Casado, P., Munoz, F., Fernandez-Frias, C., & Pozo, M. A. (2001). Studying semantics in the brain: the rapid stream stimulation paradigm. *Brain Research Protocols*, 8(3), 199–207. doi:10.1016/S1385-299X(01)00117-9
- Hodges, J. R., Salmon, D. P., & Butters, N. (1992). Semantic memory impairment in Alzheimer's disease: Failure of access or degraded knowledge? *Neuropsychologia*, 30(4), 301–314.
doi:10.1016/0028-3932(92)90104-T
- Holcomb, P. J., & Neville, H. J. (1990). Auditory and visual semantic priming in lexical decision: a comparison using event-related brain potentials. *Language and Cognitive Processes*, 5(4), 281–312. doi:10.1080/01690969008407065
- Hunt, R. R., & Lamb, C. A. (2001). What causes the isolation effect? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(6), 1359–1366. doi:10.1037//0278-7393.27.6.1359

- Jefferies, E., & Lambon Ralph, M. A. (2006). Semantic impairment in stroke aphasia versus semantic dementia: a case-series comparison. *Brain*, *129*(8), 2132–2147. doi:10.1093/brain/awl153
- Kamp, S.-M., Brumback, T., & Donchin, E. (2013). The component structure of ERP subsequent memory effects in the Von Restorff paradigm and the word frequency effect in recall: ERP components in the Von Restorff paradigm. *Psychophysiology*, *50*(11), 1079–1093. doi:10.1111/psyp.12090
- Kansaku, K. (2000). Sex differences in lateralization revealed in the posterior language areas. *Cerebral Cortex*, *10*(9), 866–872. doi:10.1093/cercor/10.9.866
- Kant, I. (2003). *Anthropologie in pragmatischer Hinsicht*. Felix Meiner Verlag.
- Kappenman, E. S., & Luck, S. J. (2012). ERP components: The ups and downs of brainwave recordings. In *The Oxford Handbook of event-related potential components* (S. 3–30). New York: Oxford University Press.
- Kapur, N., Barker, S., Burrows, E. H., Ellison, D., Brice, J., Illis, L. S., ... Loates, M. (1994). Herpes simplex encephalitis: long term magnetic resonance imaging and neuropsychological profile. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *57*(11), 1334–1342. doi:10.1136/jnnp.57.11.1334
- Karis, D., Fabiani, M., & Donchin, E. (1984). “P300” and memory: Individual differences in the von Restorff effect. *Cognitive Psychology*, *16*(2), 177–216. doi:10.1016/0010-0285(84)90007-0
- Kayser, J., & Tenke, C. E. (2003). Optimizing PCA methodology for ERP component identification and measurement: theoretical rationale and empirical evaluation. *Clinical Neurophysiology*, *114*(12), 2307–2325. doi:10.1016/S1388-2457(03)00241-4
- Klem, G. H., Lüders, H. O., Jaspers, H. H., & Elger, C. (1999). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *52*(3), 3–6. doi:10.1080/00029238.1961.11080571
- Knecht, S., Dräger, B., Deppe, M., Bobe, L., Lohmann, H., Flöel, A., ... Henningsen, H. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, *123*, 2512–2518. doi:10.1093/brain/123.12.2512
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, *38*(3), 557–577. doi:10.1017/S0048577201990559
- Korinth, S. P., Sommer, W., & Breznitz, Z. (2012). Does silent reading speed in normal adult readers depend on early visual processes? Evidence from event-related brain potentials. *Brain and Language*, *120*(1), 15–26. doi:10.1016/j.bandl.2011.08.003
- Kronbichler, M., Hutzler, F., Wimmer, H., Mair, A., Staffen, W., & Ladurner, G. (2004). The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *NeuroImage*, *21*(3), 946–953. doi:10.1016/j.neuroimage.2003.10.021

- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(12), 463–470. doi:10.1016/S1364-6613(00)01560-6
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62(1), 621–647. doi:10.1146/annurev.psych.093008.131123
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Sciences*, 207(4427), 203–205. doi:10.1126/science.7350657
- Kutas, M., & Van Petten, C. (1988). Event-related brain potential studies of language. *Advances in Psychophysiology*, 3, 139–187.
- Laszlo, S., & Federmeier, K. D. (2014). Never seem to find the time: evaluating the physiological time course of visual word recognition with regression analysis of single-item event-related potentials. *Language, Cognition and Neuroscience*, 29(5), 642–661. doi:10.1080/01690965.2013.866259
- Lau, E. F., Phillips, C., & Poeppel, D. (2008). A cortical network for semantics: (De)constructing the N400. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(12), 920–933. doi:10.1038/nrn2532
- Lehrl, S. (2005). *Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest MWT-B*. (5th ed.). Balingen: Spitta Verlag.
- Levelt, W. J. M. (2013). *A history of psycholinguistics: The pre-Chomskyan era*. Oxford: Oxford University Press.
- Levy, D. A., Bayley, P. J., & Squire, L. R. (2004). The anatomy of semantic knowledge: Medial vs. lateral temporal lobe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(17), 6710–6715. doi:10.1073/pnas.0401679101
- Lichtheim, L. (1885). On aphasia. *Brain*, 7, 433–484. doi:10.1093/acprof:oso/9780195177640.003.0020
- Lindell, A. K. (2006). In Your Right Mind: Right Hemisphere Contributions to Language Processing and Production. *Neuropsychology Review*, 16(3), 131–148. doi:10.1007/s11065-006-9011-9
- Linden, D. E. J. (2005). The P300: Where in the Brain Is It Produced and What Does It Tell Us? *The Neuroscientist*, 11(6), 563–576. doi:10.1177/1073858405280524
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. London: The MIT press.
- Luck, S. J., Kappenman, E. S., Fuller, R. L., Robinson, B., Summerfelt, A., & Gold, J. M. (2009). Impaired response selection in schizophrenia: Evidence from the P3 wave and the lateralized readiness potential. *Psychophysiology*, 46(4), 776–786. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00817.x
- Luck, S. J., Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 432–440. doi:10.1016/S1364-6613(00)01545-X

- MacGregor, L. J., Pulvermüller, F., van Casteren, M., & Shtyrov, Y. (2012). Ultra-rapid access to words in the brain. *Nature Communications*, 3(1), 711–717. doi:10.1038/ncomms1715
- Marinkovic, K., Dhond, R. P., Dale, A. M., Glessner, M., Carr, V., & Halgren, E. (2003). Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron*, 38(3), 487–497. doi:10.1016/S0896-6273(03)00197-1
- Maurer, U., Brandeis, D., & McCandliss, B. D. (2005). Fast, visual specialization for reading in English revealed by the topography of the N170 ERP response. *Behavioral and Brain Functions*, 1(1), 1–12. doi:10.1186/1744-9081-1-13
- Maurer, U., Zevin, J. D., & McCandliss, B. D. (2008). Left-lateralized N170 effects of visual expertise in reading: evidence from Japanese syllabic and logographic scripts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(10), 1878–1891. doi:10.1162/jocn.2008.20125
- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 293–299. doi:10.1016/S1364-6613(03)00134-7
- McCarthy, G., & Nobre, A. C. (1993). Modulation of semantic processing by spatial selective attention. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 88(3), 210–219. doi:10.1016/0168-5597(93)90005-A
- Mechelli, A., Gorno-Tempini, M. L., & Price, C. J. (2003). Neuroimaging studies of word and pseudoword reading: consistencies, inconsistencies, and limitations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 260–271. doi:10.1162/089892903321208196
- Mecklinger, A., Kramer, A. F., & Strayer, D. L. (1992). Event related potentials and EEG components in a semantic memory search task. *Psychophysiology*, 29(1), 104–119. doi:10.1111/j.1469-8986.1992.tb02021.x
- Moscoso del Prado Martín, F., Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2006). Category specificity in the processing of color-related and form-related words: An ERP study. *NeuroImage*, 29(1), 29–37. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.07.055
- Mummery, C. J., Patterson, K., Price, C. J., Ashburner, J., Frackowiak, R. S. J., & Hodges, J. R. (2000). A voxel-based morphometry study of semantic dementia: relationship between temporal lobe atrophy and semantic memory. *Annals of Neurology*, 47(1), 36–45. doi:10.1002/1531-8249(200001)47:1<36::AID-ANA8>3.0.CO;2-L
- Murdoch, B. E. (1990). *Acquired speech and language disorders: a neuroanatomical and functional neurological approach* (1st ed). London: Chapman and Hall.
- Murdock, B. B., Jr. (1962). The serial position effect of free recall. *Journal of Experimental Psychology*, 64(5), 482–488. doi:10.1037/h0045106

- Näätänen, R., & Kreegipuu, K. (2012). The mismatch negativity (MMN). In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *Oxford handbook of event-related potential components* (pp. 143–157). New York: Oxford University Press.
- Neville, H. J., Mills, D. L., & Lawson, D. S. (1992). Fractionating language: Different neural subsystems with different sensitive periods. *Cerebral Cortex*, *2*(3), 244–258. doi:10.1093/cercor/2.3.244
- Noppeney, U., Patterson, K., Tyler, L. K., Moss, H., Stamatakis, E. A., Bright, P., ... Price, C. J. (2007). Temporal lobe lesions and semantic impairment: a comparison of herpes simplex virus encephalitis and semantic dementia. *Brain*, *130*(4), 1138–1147. doi:10.1093/brain/awl344
- Ocklenburg, S., Beste, C., Arning, L., Peterburs, J., & Güntürkün, O. (2014). The ontogenesis of language lateralization and its relation to handedness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *43*, 191–198. doi:10.1016/j.neubiorev.2014.04.008
- Otten, L. J., & Donchin, E. (2000). Relationship between P300 amplitude and subsequent recall for distinctive events: dependence on type of distinctiveness attribute. *Psychophysiology*, *37*(5), 644–661. doi:10.1111/1469-8986.3750644
- Paller, K. A., & Wagner, A. D. (2002). Observing the transformation of experience into memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*(2), 93–102. doi:https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01845-3
- Pammer, K., Hansen, P. C., Kringelbach, M. L., Holliday, I., Barnes, G., Hillebrand, A., ... Cornelissen, P. L. (2004). Visual word recognition: the first half second. *NeuroImage*, *22*(4), 1819–1825. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.05.004
- Pascual-Marqui, R. D. (1999). Review of methods for solving the EEG inverse problem. *International Journal of Bioelectromagnetism*, *1*(1), 75–86.
- Pascual-Marqui, R. D. (2002). Standardized low resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods & Findings in Experimental & Clinical Pharmacology*, *24*, 5–12.
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M., & Lehmann, D. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology*, *18*(1), 49–65. doi:10.1016/0167-8760(84)90014-X
- Penolazzi, B., Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2007). Early semantic context integration and lexical access as revealed by event-related brain potentials. *Biological Psychology*, *74*(3), 374–388. doi:10.1016/j.biopsycho.2006.09.008
- Perrin, F., Pernier, J., Bertrand, O., & Echallier, J. (1989). Spherical splines for scalp potential and current density mapping. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *72*, 184–187. doi:10.1016/0013-4694(89)90180-6

- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, *331*(6157), 585–589. doi:10.1038/331585a0
- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., ... Taylor, M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, *37*, 127–152. doi:10.1111/1469-8986.3720127
- Pietrini, V., Nertempi, P., Vaglia, A., Revello, M. G., Pinna, V., & Ferro-Milone, F. (1988). Recovery from herpes simplex encephalitis: selective impairment of specific semantic categories with neuroradiological correlation. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *51*(10), 1284–1293. doi:10.1136/jnnp.51.10.1284
- Pillay, S. B., Binder, J. R., Humphries, C., Gross, W. L., & Book, D. S. (2017). Lesion localization of speech comprehension deficits in chronic aphasia. *Neurology*, *88*(10), 970–975. doi:10.1212/WNL.0000000000003683
- Pizzagali, D. A. (2007). Electroencephalography and high-density electrophysiological source localization. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (3rd ed, S. 56–84). Cambridge [England] ; New York: Cambridge University Press.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, *118*(10), 2128–2148. doi:10.1016/j.clinph.2007.04.019
- Polich, J. (2012). Neuropsychology of P300. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *Oxford handbook of event-related potential components* (S. 159–188). New York: Oxford University Press.
- Potts, G. F. (2004). An ERP index of task relevance evaluation of visual stimuli. *Brain and Cognition*, *56*(1), 5–13. doi:10.1016/j.bandc.2004.03.006
- Potts, G. F., Liotti, M., Tucker, D. M., & Posner, M. I. (1996). Frontal and inferior temporal cortical activity in visual target detection: Evidence from high spatially sampled event-related potentials. *Brain Topography*, *9*(1), 3–14. doi:10.1007/BF01191637
- Price, C. J. (2000). The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. *Journal of Anatomy*, *197*(03), 335–359. doi:10.1017/s0021878299006901
- Price, C. J. (2010). The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1191*(1), 62–88. doi:10.1111/j.1749-6632.2010.05444.x
- Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, *62*(2), 816–847. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.04.062

- Proverbio, A. M., Vecchi, L., & Zani, A. (2004). From orthography to phonetics: ERP measures of grapheme-to-phoneme conversion mechanisms in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*(2), 301–317. doi:10.1162/089892904322984580
- Pujol, J., Deus, J., Losilla, J. M., & Capdevila, A. (1999). Cerebral lateralization of language in normal left-handed people studied by functional MRI. *Neurology, 52*(5), 1038–1038. doi:10.1212/WNL.52.5.1038
- Pulvermüller, F., Assadollahi, R., & Elbert, T. (2001). Neuromagnetic evidence for early semantic access in word recognition. *European Journal of Neuroscience, 13*(1), 201–205. doi:10.1046/j.0953-816X.2000.01380.x
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., & Hauk, O. (2009). Understanding in an instant: neurophysiological evidence for mechanistic language circuits in the brain. *Brain and Language, 110*(2), 81–94. doi:10.1016/j.bandl.2008.12.001
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., & Ilmoniemi, R. (2005). Brain signatures of meaning access in action word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience, 17*(6), 884–892. doi:10.1162/0898929054021111
- Pylkkänen, L., Stringfellow, A., & Marantz, A. (2002). Neuromagnetic evidence for the timing of lexical activation: An MEG component sensitive to phonotactic probability but not to neighborhood density. *Brain and Language, 81*(1–3), 666–678. doi:10.1006/brln.2001.2555
- Rabovsky, M., Sommer, W., & Abdel Rahman, R. (2012). The time course of semantic richness effects in visual word recognition. *Frontiers in Human Neuroscience, 6*. doi:10.3389/fnhum.2012.00011
- Rademacher, J., Galaburda, A. M., Kennedy, D. N., Filipek, P. A., & Caviness, V. S. (1992). Human cerebral cortex: Localization, parcellation, and morphometry with magnetic resonance imaging. *Journal of Cognitive Neuroscience, 4*(4), 352–374. doi:10.1162/jocn.1992.4.4.352
- Ralph, M. A. L., McClelland, J. L., Patterson, K., Galton, C. J., & Hodges, J. R. (2001). No Right to Speak? The Relationship between Object Naming and Semantic Impairment: Neuropsychological Evidence and a Computational Model. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*(3), 341–356. doi:10.1162/08989290151137395
- Robson, H., Sage, K., & Lambon Ralph, M. A. (2012). Wernicke's aphasia reflects a combination of acoustic-phonological and semantic control deficits: A case-series comparison of Wernicke's aphasia, semantic dementia and semantic aphasia. *Neuropsychologia, 50*(2), 266–275. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.11.021
- Robson, H., Specht, K., Beaumont, H., Parkes, L. M., Sage, K., Lambon Ralph, M. A., & Zahn, R. (2017). Arterial spin labelling shows functional depression of non-lesion tissue in chronic Wernicke's aphasia. *Cortex, 92*, 249–260. doi:10.1016/j.cortex.2016.11.002

- Rorden, C., & Karnath, H.-O. (2004). Using human brain lesions to infer function: a relic from a past era in the fMRI age? *Nature Reviews Neuroscience*, *5*(10), 812–819. doi:10.1038/nrn1521
- Rossion, B., Joyce, C. A., Cottrell, G. W., & Tarr, M. J. (2003). Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *NeuroImage*, *20*(3), 1609–1624. doi:10.1016/j.neuroimage.2003.07.010
- Rudell, A. P. (1991). The recognition potential contrasted with the P300. *International Journal of Neuroscience*, *60*(1), 85–111. doi:10.3109/00207459109082040
- Rudell, A. P. (1992). Rapid stream stimulation and the recognition potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *83*, 77–82. doi:10.1016/0013-4694(92)90135-5
- Ruz, M., & Nobre, A. C. (2008). Attention modulates initial stages of visual word processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(9), 1727–1736. doi:10.1162/jocn.2008.20119
- Segalowitz, S. J., & Zheng, X. (2009). An ERP study of category priming: Evidence of early lexical semantic access. *Biological Psychology*, *80*(1), 122–129. doi:10.1016/j.biopsycho.2008.04.009
- Seghier, M. L. (2008). Laterality index in functional MRI: methodological issues. *Magnetic Resonance Imaging*, *26*(5), 594–601. doi:10.1016/j.mri.2007.10.010
- Seghier, M. L. (2013). The Angular Gyrus: Multiple Functions and Multiple Subdivisions. *The Neuroscientist*, *19*(1), 43–61. doi:10.1177/1073858412440596
- Sereno, S. C. (2003). Measuring word recognition in reading: eye movements and event-related potentials. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(11), 489–493. doi:10.1016/j.tics.2003.09.010
- Sereno, S. C., Rayner, K., & Posner, M. I. (1998). Establishing a time-line of word recognition: evidence from eye-movements and event-related potentials. *NeuroReport*, *9*, 2195–2200.
- Shebani, Z., Patterson, K., Nestor, P. J., Diaz-de-Grenu, L. Z., Dawson, K., & Pulvermüller, F. (2017). Semantic word category processing in semantic dementia and posterior cortical atrophy. *Cortex*, *93*, 92–106. doi:10.1016/j.cortex.2017.04.016
- 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*(18), E1918–E1923. doi:10.1073/pnas.1323158111
- Simon, G., Bernard, C., Largy, P., Lalonde, R., & Rebai, M. (2004). Chronometry of visual word recognition during passive and lexical decision tasks: An ERP investigation. *International Journal of Neuroscience*, *114*(11), 1401–1432. doi:10.1080/00207450490476057
- Smulders, F. T. Y., & Miller, J. O. (2012). The lateralized readiness potential. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *Oxford handbook of event-related potential components* (S. 209–229). New York, NY: Oxford University Press.

- Snodgrass, J. G., & Vanderwart, M. (1980). A standardized set of 260 pictures: norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *6*(2), 174. doi:10.1037/0278-7393.6.2.174
- Sommer, I. E. C., Aleman, A., Bouma, A., & Kahn, R. S. (2004). Do women really have more bilateral language representation than men? A meta-analysis of functional imaging studies. *Brain*, *127*(8), 1845–1852. doi:10.1093/brain/awh207
- Sommer, I. E. C., Aleman, A., Somers, M., Boks, M. P., & Kahn, R. S. (2008). Sex differences in handedness, asymmetry of the planum temporale and functional language lateralization. *Brain Research*, *1206*, 76–88. doi:10.1016/j.brainres.2008.01.003
- Swaab, T. Y., Ledoux, K., Camblin, C. C., & Boudewyn, M. A. (2012). Language-related ERP components. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *Oxford handbook of event-related potential components* (S. 397–439). New York, NY: Oxford University Press.
- Tarkiainen, A., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (2002). Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception. *Brain*, *125*(5), 1125–1136. doi:10.1093/brain/awf112
- Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, *122*, 2119–2131. doi:10.1093/brain/122.11.2119
- Tremblay, P., & Dick, A. S. (2016). Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology. *Brain and Language*, *162*, 60–71. doi:10.1016/j.bandl.2016.08.004
- Tse, C.-Y., Lee, C.-L., Sullivan, J., Garnsey, S. M., Dell, G. S., Fabiani, M., & Gratton, G. (2007). Imaging cortical dynamics of language processing with the event-related optical signal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(43), 17157–17162. doi:10.1073/pnas.0707901104
- Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., Jones, K. M., & Zeffiro, T. A. (2002). Meta-analysis of the functional neuroanatomy of single-word reading: method and validation. *NeuroImage*, *16*(3), 765–780. doi:10.1006/nimg.2002.1131
- Turken, A. U., & Dronkers, N. F. (2011). The neural architecture of the language comprehension network: converging evidence from lesion and connectivity analyses. *Frontiers in System Neuroscience*, *5*, 1–20. doi:10.3389/fnsys.2011.00001
- Tyler, K. L. (2004). Update on herpes simplex encephalitis. *Reviews in Neurological Diseases*, *1*(4), 169–178.
- Tyler, L. K., & Marslen-Wilson, W. (2008). Fronto-temporal brain systems supporting spoken language comprehension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *363*(1493), 1037–1054. doi:10.1098/rstb.2007.2158

- van den Brink, D., Brown, C. M., & Hagoort, P. (2001). Electrophysiological evidence for early contextual influences during spoken-word recognition: N200 versus N400 effects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(7), 967–985. doi:10.1162/089892901753165872
- Van Petten, C., & Luka, B. J. (2006). Neural localization of semantic context effects in electromagnetic and hemodynamic studies. *Brain and Language*, *97*(3), 279–293. doi:10.1016/j.bandl.2005.11.003
- Vartiainen, J., Parviainen, T., & Salmelin, R. (2009). Spatiotemporal convergence of semantic processing in reading and speech perception. *Journal of Neuroscience*, *29*(29), 9271–9280. doi:10.1523/JNEUROSCI.5860-08.2009
- Vigneau, M., Beaucoisin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., ... Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, *30*(4), 1414–1432. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.11.002
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, *55*(1), 143–156. doi:10.1016/j.neuron.2007.05.031
- Visser, M., Jefferies, E., & Ralph, M. L. (2010). Semantic processing in the anterior temporal lobes: a meta-analysis of the functional neuroimaging literature. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(6), 1083–1094. doi:10.1162/jocn.2009.21309
- Vitacco, D., Brandeis, D., Pascual-Marqui, R. D., & Martin, E. (2002). Correspondence of event-related potential tomography and functional magnetic resonance imaging during language processing. *Human Brain Mapping*, *17*(1), 4–12. doi:10.1002/hbm.10038
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, *428*, 748–751. doi:10.1038/nature02447
- Von Restorff, H. (1933). Über die Wirkung von Bereichsbildungen im Spurenfeld. *Psychologische Forschung*, *18*(1), 299–342.
- Wagner, A. D., Paré-Blagojev, E. J., Clark, J., & Poldrack, R. A. (2001). Recovering Meaning: Left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron*, *31*(2), 329–338. doi:10.1016/S0896-6273(01)00359-2
- Wallentin, M. (2009). Putative sex differences in verbal abilities and language cortex: A critical review. *Brain and Language*, *108*(3), 175–183. doi:10.1016/j.bandl.2008.07.001
- Webb, W. G. (2017). *Neurology for the speech-language pathologist* (Sixth edition). St. Louis, Missouri: Elsevier Inc.
- Wernicke, C. (1874). Der aphasische Symptomenkomplex. In C. Wernicke (Ed.), *Der aphasische Symptomenkomplex: Eine psychologische Studie auf anatomischer Basis* (S. 1–70). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-65950-8_1

- Wheat, K. L., Cornelissen, P. L., Frost, S. J., & Hansen, P. C. (2010). During visual word recognition, phonology is accessed within 100 ms and may be mediated by a speech production code: evidence from magnetoencephalography. *Journal of Neuroscience*, *30*(15), 5229–5233. doi:10.1523/JNEUROSCI.4448-09.2010
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., & Mulder, L. J. M. (1989). Event-related potentials during memory search and selective attention to letter size and conjunctions of letter size and color. *Psychophysiology*, *26*(5), 529–547. doi:10.1111/j.1469-8986.1989.tb00706.x
- Wilke, M., & Lidzba, K. (2007). LI-tool: a new toolbox to assess lateralization in functional MR-data. *Journal of Neuroscience Methods*, *163*(1), 128–136. doi:10.1016/j.jneumeth.2007.01.026
- Wiswede, D., Rüsseler, J., Hasselbach, S., & Münte, T. F. (2006). Memory recall in arousing situations— an emotional von Restorff effect? *BMC Neuroscience*, *7*(1), 1. doi:10.1186/1471-2202-7-57
- Wong, A. C., Gauthier, I., Woroch, B., Debusse, C., & Curran, T. (2005). An early electrophysiological response associated with expertise in letter perception. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *5*(3), 306–318. doi:10.3758/CABN.5.3.306
- Woodhead, Z. V. J., Barnes, G. R., Penny, W., Moran, R., Teki, S., Price, C. J., & Leff, A. P. (2014). Reading front to back: MEG evidence for early feedback effects during word recognition. *Cerebral Cortex*, *24*(3), 817–825. doi:10.1093/cercor/bhs365
- Yourganov, G., Smith, K. G., Fridriksson, J., & Rorden, C. (2015). Predicting aphasia type from brain damage measured with structural MRI. *Cortex*, *73*, 203–215. doi:10.1016/j.cortex.2015.09.005
- Zhang, Y., Liu, Q., & Zhang, Q. (2009). The recognition potential reflects an intermediate level of visual representation. *Neuroscience Letters*, *454*(1), 86–90. doi:10.1016/j.neulet.2009.02.047

Anhang

Aufgrund von Urheberrechtsbestimmungen gibt es nicht für alle Publikationen die Erlaubnis zur digitalen Veröffentlichung, deshalb werden im Folgenden nur die Referenz und der Link zu den entsprechenden Originalartikeln zur Verfügung gestellt.

Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (2016). A brain electrical signature of left-lateralized semantic activation from single words. *Brain and Language*, 157-158, 35-43.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2016.04.009>

Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (2018). The posterior semantic asymmetry (PSA): An early brain electrical signature of semantic activation from written words. *Brain and Cognition*, 125, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.05.011>

Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (in press). The posterior semantic asymmetry (PSA) - Specific to written not auditory semantic word processing. *Experimental Brain Research*.
<https://doi.org/10.1007/s00221-018-5379-z>

Koppehele-Gossel, J., Khosrowtaj, Z. & Gibbons, H. (2018). Effects of distinctiveness and memory on lateralized and unlateralized brain-electrical activity during visual word encoding. Manuscript submitted for publication.

Koppehele-Gossel, J., Schnuerch, R. & Gibbons, H. (in press). Lexical processing as revealed by lateralized event-related brain potentials. *Journal of Psychophysiology*.
<https://doi.org/10.1027/0269-8803/a000218>