

Aus dem Physiologischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Prof. Dr. Magdalena Götz

**Untersuchung der zeitlichen Abfolge hirnelektrischer Aktivität vom reizabhängigen
Deliberationsprozess bis zur motorischen Handlung**

Dissertation

Zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Sonja Schönecker

aus

Temeschburg (Rumänien)

2016

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München**

Berichterstatter: PD. Dr. Dieter Kutz

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Kai Bötzel

Priv. Doz. Dr. Christoph Lücking

Mitbetreuung durch den

promovierten Mitarbeiter: Prof. Dr. Florian P. Kolb

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2016

Eidesstattliche Versicherung

Schönecker, Sonja

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

**Untersuchung der zeitlichen Abfolge hirnelektrischer Aktivität vom reizabhängigen
Deliberationsprozess bis zur motorischen Handlung**

selbstständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

.....
Ort , Datum

.....
Unterschrift Doktorandin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
1.1	Willensfreiheit	7
1.2	Der Stroop-Effekt	11
1.3	Die Elektroenzephalographie (EEG).....	12
1.4	Die Kortexanatomie.....	13
1.4.1	Motorkortex.....	16
1.4.2	Parietalkortex	17
1.5	Fragestellung	19
2	Material und Methoden.....	20
2.1	Probanden	20
2.2	Versuchsvorbereitung.....	20
2.3	Stimulationsprotokoll	21
2.3.1	Erfassung und Mapping eines VEP.....	22
2.3.2	Erfassung der Reaktionszeiten nach Reizpräsentation mittels Tastendruck (rein motorische Aufgabe).....	23
2.3.3	Erfassung der hirnelektrischen Aktivität nach verschiedenen Interferenzaufgaben	24
2.4	Messeinrichtung.....	25
2.5	Auswertung.....	27
2.6	Statistik.....	28
3	Ergebnisse	30

3.1	Reaktionszeitanalyse	30
3.2	Elektrophysiologische Analyse der Test-Phase.....	34
3.2.1	Prästimulusaktivität.....	34
3.2.2	Stimulus ausgerichtete ereigniskorrelierte Potentiale	36
3.2.3	Auf den Tastendruck ausgerichtete ereigniskorrelierte Potentiale des Motorkortex	51
3.2.4	Auf den Tastendruck ausgerichtete ereigniskorrelierte Potentiale des Parietalkortex	59
3.2.5	Ergebnisse des Kepner-Randals-Test.....	64
4	Diskussion.....	66
4.1	Methodendiskussion	66
4.2	Probandenauswahl.....	68
4.3	Reaktionszeiten.....	69
4.4	Analyse der EEG-Aktivität vor Stimuluspräsentation.....	70
4.5	Analyse der auf den Stimulus-ausgerichteten ereigniskorrelierten Potentiale	71
4.6	Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten ereigniskorrelierten Potentiale des Motorkortex	76
4.7	Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten ereigniskorrelierten Potentiale des Parietalkortex.....	79
4.8	Ausblick.....	82
5	Zusammenfassung.....	83
6	Summary	85
7	Literaturverzeichnis	87

8	Abbildungsverzeichnis.....	99
9	Tabellenverzeichnis	100
10	Abkürzungsverzeichnis	101
11	Danksagung	102
12	Anhang	103
12.1	Probandenanweisung	103
12.2	Versuchsprotokoll.....	105
12.3	Aufklärung.....	107

1 Einleitung

1.1 Willensfreiheit

Schon seit langem ist bekannt, welche große Bedeutung dem Nervensystem in Bezug auf das menschliche Leben innewohnt. Bereits vor 7000 Jahren wurden in Europa therapeutische Trepanationen am Lebenden durchgeführt (Alt et al. 1997). Doch erst um 500 vor Christus wurde das Hirn zum ersten Mal von Hippokrates und seinen Schülern als Sitz der Seele und der Gedanken beschrieben: *„Die Menschen sollten wissen, dass von nichts anderem als dem Gehirne unsere Freuden, unser Entzücken, Lachen und Vergnügen herrühren, woher auch Kummer und Schmerzen, Angst und Trauer stammen. ... Deshalb bin ich der Meinung, dass das Gehirn im Menschen die größte Macht hat.“* (Hippocrates, Über die heilige Krankheit, 460-370 vor Chr.). Nun stellt sich jedoch die Frage: Wenn das Gehirn eine derart große „Macht“ besitzt, ist es dann unser Bewusstsein, das unsere Handlungen bestimmt oder sind wir durch die im Gehirn stattfindenden Prozesse in unseren Entscheidungen vordeterminiert? Diese Frage konnte bis heute nicht mit Sicherheit beantwortet werden.

Descartes (Des-Cartes 1641) beispielsweise, stellte die Theorie auf, dass die Seele zwischen verschiedenen Handlungsalternativen entscheidet und den Körper durch das Gehirn zu einer Aktion veranlasst. Dieses Konzept ist in vielen modernen Kulturen tief verankert. Doch neuere neurophysiologische Studien stellen diese Geist-Körper-Kausalität in Frage. 1982 löste Benjamin Libet mit seinen Experimenten eine bis heute anhaltende kontroverse Diskussion bezüglich dieser Fragestellung aus (Libet et al. 1982; Libet et al. 1983).

Er untersuchte die zeitliche Abfolge zwischen einer simplen motorischen Handlung, dem Willensakt zur Initiation besagter Handlung sowie der frühesten mittels Elektroenzephalographie (EEG) nachweisbaren hirnelektrischen Aktivität, die einer motorischen Handlung vorausgeht. Die Probanden wurden aufgefordert zu einem selbst gewählten Zeitpunkt eine einfache Bewegung der rechten Hand durchzuführen und sich

zudem zu merken, wann sie sich zur Ausführung der Bewegung entschlossen hatten. Hierzu sollten sie die Position eines sich auf einem Oszilloskop innerhalb von 2,56 Sekunden ein Mal im Kreis bewegenden Lichtpunkts angeben. Anhand der Position des Lichtpunktes sollte auf den Zeitpunkt des bewussten Willensakts zurückgerechnet werden. Parallel wurde mittels EEG das Bereitschaftspotential (BP) abgeleitet. Hierbei handelt es sich um ein erstmals von Kornhuber und Deecke beschriebenes (Kornhuber and Deecke 1964) langsam ansteigendes negatives Hirnpotential im Vorfeld von Willkürbewegungen. Libet stellte fest, dass der Beginn des BP dem Willensakt um 350 ms vorauseilte.

Aus diesen Ergebnissen zog er die Schlussfolgerung, dass eine Willkürbewegung durch unbewusste Gehirnprozesse eingeleitet wird, bevor die Absicht der Bewegungsinitiation ins Bewusstsein gelangt. Die bewusste Entscheidung zu handeln sei daher nicht die Ursache für die Initiierung und Kontrolle motorischer Handlung. Folge dieser Interpretation ist eine Negation der menschlichen Willensfreiheit. Doch selbst Libet räumte dem Bewusstsein innerhalb eines 100 bis 200 ms vor Beginn der Bewegung gelegenen Zeitfensters ein Veto-Recht ein (Libet 1985).

Die Interpretation der Ergebnisse Libets wird von vielen namhaften Wissenschaftlern wie Wolf Singer und John-Dylan Haynes unterstützt (Singer 2003; Soon et al. 2008). Auch Wolfgang Prinz unterstützt Libets These, indem er behauptet: „Wir tun nicht was wir wollen, wir wollen was wir tun“ (Prinz 1996). Seiner Meinung nach stellt der bewusste Willensimpuls eine Ratifizierung einer Entscheidung dar, die das Gehirn bereits getroffen hat. Gerhard Roth geht sogar so weit zu sagen: „Das bewusste, denkende und wollende Ich ist nicht im moralischen Sinne verantwortlich für dasjenige, was das Gehirn tut, auch wenn dieses Gehirn, perfiderweise dem Ich die entsprechende Illusion verleiht“ (Roth 2003).

Dennoch bleibt die Interpretation der erhobenen Daten strittig (Libet 1985). Einige Kritiker bemängeln, dass die vom Probanden auszuführende Bewegung in Libets Experiment vom

Experimentator festgelegt war (Bridgeman 1985). Die Probanden waren nur in der Hinsicht frei, dass sie selbst entscheiden konnten, wann sie die Bewegung ausführten. Um jedoch eine freie Entscheidung untersuchen zu können muss eine Handlungsalternative in Form einer alternativen motorischen Handlung oder auch der Möglichkeit des Nicht-Handelns gegeben sein. Es besteht daher die Möglichkeit, dass das BP eher einen generellen Zustand der Aufmerksamkeitssteigerung darstellt (Haggard and Eimer 1999).

Ein weiterer Kritikpunkt besteht darin, dass die Latenzzeit des BPs bei Libet überschätzt sei (Trevena and Miller 2002). Bei einem über mehrere Durchgänge gebildeten Mittelwert des EEGs fällt der erste Anstieg der Kurve mit dem frühesten Wert zusammen, der in einem der Durchgänge gemessen wurde („Smearing Artifact“). Demzufolge kann es sein, dass das BP fälschlicherweise vor dem Bewusstwerden der Entscheidung eingeordnet wurde und es daher keine kausale Ursache für die bewusste Entscheidung darstellen kann. Außerdem wurde Libets Messmethode des Willensakts von vielen Wissenschaftlern kritisiert und als unzuverlässig eingestuft (Breitmeyer 1985; Gomes 1998).

In jüngster Zeit wurde Libets Experiment des Öffteren in abgewandelter Form wiederholt. Haggard und Eimer (1999) beispielsweise führten ein Experiment durch, bei dem die Probanden zwischen einer Bewegung der linken und der rechten Hand entscheiden konnten. Neben dem BP untersuchten sie auch das lateralisierte BP. Dieses gibt den Aktivitätsunterschied des kontralateral zu einer Bewegung gelegenen Motorkortex im Vergleich zum ipsilateral gelegenen Motorkortex wieder und stellt ein spezifisches Korrelat der Vorbereitung einer motorischen Handlung dar (Coles 1989; De Jong et al. 1990). Hierbei stellten sie fest, dass der Anstieg des lateralisierten BPs, aber nicht des BPs, mit dem Willensakt zeitlich kovarierte und folgerten daraus einen möglichen kausalen Zusammenhang.

Auch bei den Experimenten der Arbeitsgruppe um John-Dylan Haynes hatten die Probanden die freie Wahl zwischen einem Tastendruck der rechten oder linken Hand (Soon et al. 2008). Anstelle eines EEGs wurde bei ihnen mit bildgebenden Verfahren (funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) und einer speziellen Mustererkennungssoftware versucht vorherzusagen, wie sich die Probanden entscheiden würden. Das Ergebnis dieser Studie besagte, dass bis zu 10 s vor der bewussten Entscheidung Aktivität im frontopolen Kortex und im Precuneus vorhanden war, die für das Abwägungsergebnis kodierte. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 60% konnten die Forscher vorhersagen, welche Taste die Probanden drücken würden.

Doch es gab auch einige Nachfolgeexperimente, die Libets Ergebnisse zu widerlegen scheinen. So haben Herrmann und Kollegen (2008) ihre Probanden eine Reaktionsaufgabe bearbeiten lassen, bei der sie je nach visuellem Stimulus entweder mit der rechten oder mit der linken Hand eine Taste drücken sollten. Es zeigte sich, dass das BP bereits vor der Präsentation des Stimulus auftrat. Hieraus folgerten sie, dass das BP nicht ein Signal zur Initiation einer Bewegung, sondern eher eine unspezifische Vorbereitung einer erwarteten motorischen Handlung darstellt.

Trevena und Miller verglichen 2010 die elektrophysiologische Aktivität vor einer Bewegungsentscheidung mit der Aktivität vor einer Entscheidung, sich nicht zu bewegen (Trevena and Miller 2010). Sie stellten fest, dass die BPs dieser zwei Konditionen sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Hieraus schlossen sie, dass das BP kein spezifisches Signal einer Bewegungsvorbereitung sein könne und dass das Libet-Experiment keinen Beweis dafür darstelle, dass Willkürbewegungen unterbewusst eingeleitet würden. Aufgrund der widersprüchlichen Datenlage bleibt also die Frage, ob unbewusste Hirnprozesse unsere Handlungen determinieren und dadurch die Willensfreiheit einschränken, weiterhin ungeklärt.

1.2 Der Stroop-Effekt

Bereits 1886 berichtete James McKeen Cattell, dass es länger dauert eine Farbe oder ein Objekt zu benennen, als das entsprechende Wort vorzulesen (Cattell 1886). Er erklärte diesen Umstand dadurch, dass das Lesen ein automatisierter Prozess sei, wohingegen das Benennen einer Farbe eine vorsätzliche Bemühung darstelle.

Erst knapp ein halbes Jahrhundert später untersuchte Stroop die Interferenz inkongruenter Schriftzüge und Farben (Stroop 1935). Er präsentierte 70 gesunden Probanden Schriftzüge, die eine Farbe in Wortform angaben, jedoch in Konflikt standen mit der Farbe, in der der Schriftzug geschrieben war. Es zeigte sich, dass die Probanden keine Schwierigkeiten hatten den Schriftzug zu lesen, jedoch erheblich länger dafür brauchten, die Textfarbe zu benennen. Es ergab sich also eine sogenannte asymmetrische Interferenz. Stroop sah in seinen Ergebnissen den Beweis für den automatisierten Prozess des Lesens und unterstützte des Weiteren die Erklärung seines Doktorvaters Peterson (Peterson et al. 1925), dass Worte nur eine einzelne Reaktion, nämlich sie zu lesen hervorrufen, wohingegen Farben multiple Reaktionen auslösen können.

Seitdem wurden zahlreiche Abwandlungen von Stroops ursprünglichem Versuch durchgeführt (MacLeod 1991). Im Verlauf wurden unterschiedliche Modelle entwickelt, um die zeitliche Verzögerung zu erklären, die durch einen inkongruenten Reiz hervorgerufen wird. Eines der geläufigsten Modelle ist die „speed of processing“ Theorie (Morton and Chambers 1973; Posner and Snyder 1975). Sie geht davon aus, dass Wortverarbeitung im Gehirn schneller geschieht als Farberkennung, so dass die Wortinformation dann in Konflikt mit der Farbinformation tritt.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit stellt das konnektivistische „parallel distributed processing“ Modell nach Cohen dar (Cohen et al. 1990). Es besagt, dass die

Informationsverarbeitung innerhalb von verschiedenen Pfaden verläuft. Diese bestehen aus miteinander verbundenen Einheiten. Zur Prozessierung von Information kommt es durch eine sich in diesem Netzwerk ausbreitende Aktivierung. Bei Aktivierung zweier verschiedener Pfade kann es an den Schnittstellen des Netzwerks durch ein Aufeinandertreffen der beiden Aktivierungsmuster zur Interferenz kommen, was im Stroop-Test der Fall ist.

Gegen viele der bisher entwickelten Modelle wurden fundierte Einwände erhoben (Kahneman and Chajczyk 1983; Dunbar and MacLeod 1984). Welches der genannten Modelle sich im Endeffekt durchsetzen wird, müssen weitere Versuche zeigen.

1.3 Die Elektroenzephalographie (EEG)

1929 veröffentlichte der Neurologe Hans Berger erstmals seine Untersuchungen zur Ableitung elektrischer Aktivität am menschlichen Gehirn und berichtete: „Das EEG ist nicht bedingt durch Muskelaktivität, nicht durch Spannungen an der menschlichen Haut, nicht durch andere Generatoren wie das Herz, sondern entsteht zerebral: Ich glaube in der Tat, dass die von mir hier ausführlich geschilderte Kurve im Gehirn entsteht“ (Berger 1929). Zunächst ging man davon aus, dass EEG-Signale die Aktionspotentiale synchron aktivierter Nervenzellen widerspiegeln (Adrian and Matthews 1934). Doch Li und Jasper konnten 1953 mit Hilfe von Mikroelektroden nachweisen, dass es sich bei den Potentialgeneratoren des EEGs um Effekte kortikaler synaptischer Aktivität handelt (Li and Jasper 1953). Aufgrund einer somanahen, synaptischen Aktivierung einer Pyramidenzelle entsteht ein Einstrom positiver Ionen. Dadurch kommt es im Extrazellulärraum zu einer Elektronegativität, die als aktive Stromsenke bezeichnet wird. In der Folge wird ein zum apikalen Dendriten gerichteter intrazellulärer Fluss positiver Ladungsträger verursacht, der dort wiederum zu einem Ausstrom positiver Ladungsträger in den Extrazellulärraum führt. Dadurch kommt es am apikalen Dendriten zur Ausbildung einer passiven Stromquelle. Eine solche

Ladungsverteilung repräsentiert folglich einen Dipol. Eine zeitgleiche Aktivierung parallel zueinander und senkrecht zur Hirnoberfläche orientierter Pyramidenzellen führt zur Ausbildung eines an der Kopfoberfläche, in Form von Summenpotentialen elektrischer Dipole ableitbaren, elektrischen Feldes. Bei gleichzeitiger Aktivierung einer Vielzahl von Pyramidenzellen ist im EEG eine Positivität ableitbar. Erfolgt am Soma ein inhibitorisches statt eines exzitatorischen postsynaptischen Potentials oder kommt es am apikalen Dendriten zur Ausbildung eines postsynaptischen exzitatorischen Potentials, verkehrt sich die Polarität des EEG (Steinhausen and Gulbins 2003; Kandel et al. 2013)

Sind die Neurone hingegen nicht parallel ausgerichtet, wie z.B. in den Nuclei, kann es zur Entstehung so genannter geschlossener Felder kommen (De Nó 1947). Die Ionenflüsse finden zwar weiterhin statt, doch statt zu einer Summation kommt es zu einer gegenseitigen Aufhebung der resultierenden elektrischen Dipole, so dass an der Kopfoberfläche ein Nullpotential ableitbar ist.

Das EEG wird heute klinisch hauptsächlich zur Charakterisierung von Epilepsien und Bewusstseinsstörungen eingesetzt. Für die Hirntoddiagnostik, das Schlaflabor und die Forschung ist es unverzichtbar.

1.4 Die Kortexanatomie

Bereits makroskopisch gliedert sich das Großhirn mit seiner stark gefalteten Rinde in zwei symmetrische Hemisphären, die über den Balken miteinander in Verbindung stehen. Jede Hemisphäre lässt sich in vier kortikale Lappen einteilen, denen verschiedene Hauptfunktionen zugeschrieben werden. Diese Lobi werden durch die großen Furchen (Sulci) voneinander getrennt. Der Sulcus centralis trennt den Lobus frontalis vom Lobus parietalis. Die Begrenzung des Lobus temporalis wird durch den Sulcus lateralis definiert. Der Lobus occipitalis wird durch den Sulcus parietooccipitalis vom Lobus parietalis getrennt.

Mikroskopisch ist der größte Teil des Kortex durch einen 6-schichtigen Aufbau gekennzeichnet. Von der Oberfläche ausgehend handelt es sich dabei um folgende Schichten:

- Lamina molecularis: zellarme Schicht, Dendriten tiefer gelegener Neurone
- Lamina granularis externa: Körnerzellen
- Lamina pyramidalis externa: kleine Pyramidenzellen
- Lamina granularis interna: Körnerzellen
- Lamina pyramidalis interna: große Pyramidenzellen
- Lamina multiformis: heterogene Schicht multiformer Zellen

Auf der Basis diverser zytoarchitektonischer Unterschiede in verschiedenen Bereichen der Großhirnrinde führte 1909 der Neurologe Korbinian Brodmann eine Unterteilung in 52 Areae ein (Brodmann 1909) (*Abbildung 1-1*).

Brodmanns Theorie der Lokalisation bestimmter Funktionen wurde durch die Forschungsergebnisse Edgar Adrians unterstützt (Adrian 1941). Er entdeckte, dass die taktile Stimulation verschiedener Stellen am Körper einer Katze zu einer elektrischen Aktivität in bestimmten Kortexregionen führt. Bereits 1870 führten Gustav Fritsch und Eduard Hitzig erste Stimulationsexperimente durch und fanden dabei heraus, dass bestimmte Regionen des Motorkortex des Hundes für die Bewegung spezifischer Körperteile zuständig sind (Fritsch and Hitzig 1870). Diese Entdeckung konnte kurz darauf ebenfalls an Affen und Menschen bestätigt werden (Ferrier 1873; Jackson 1873). Doch erst 60 Jahre später wurde die somatotopie Gliederung des Kortex durch Penfield eingehender untersucht. Mit Hilfe epikortikaler elektrischer Stimulation an wachen Patienten während einer Hirnoperation

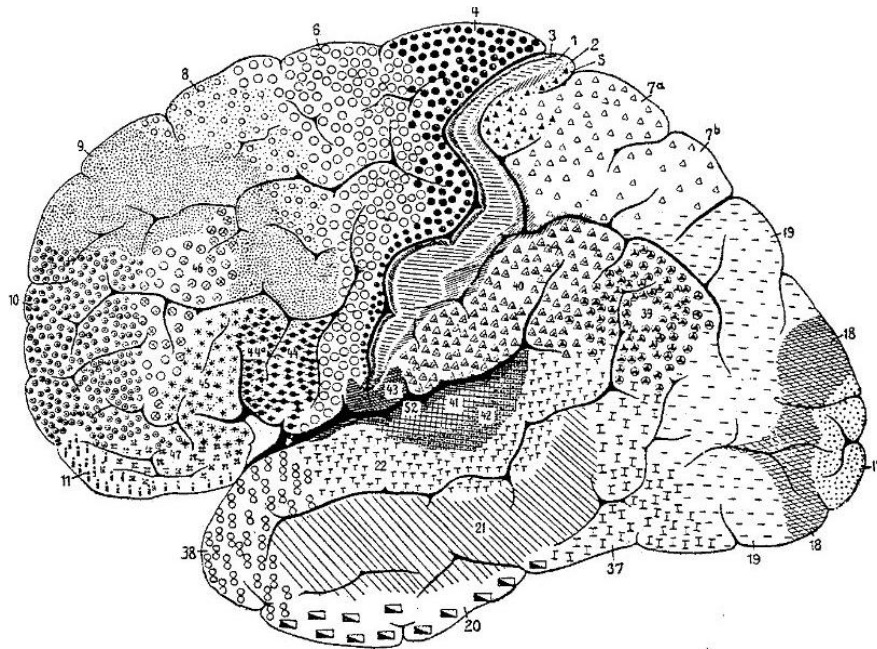


Abbildung 1-1: Hirnkarte Brodmanns aus „Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund ihres Zellenbaues“, 1909

gelang es ihm die somatotope Gliederung des motorischen sowie des somatosensorischen Kortex nachzuweisen (Penfield and Boldrey 1937). Aufgrund der Kreuzung der motorischen und sensorischen Bahnen ist die linke Körperhälfte im rechten Kortex repräsentiert und vice versa. Mit dieser Methode konnte man inzwischen einigen, der von Brodmann beschriebenen Areae, eine bestimmte Funktion zuschreiben. So ist z.B. die Area 4 für Willkürbewegungen zuständig. Die Areae 3,1 und 2 umfassen den primärsensorischen Kortex und die Area 17 den primär visuellen Kortex.

Neben diesen sogenannten primären Rindenfeldern, gibt es Assoziationsfelder, die weder rein motorisch noch rein sensorisch sind, sondern höhere integrative Leistungen vollbringen (Jackson 1884). Man geht davon aus, dass sie sensorische Informationen abstrahieren, zu bewussten Gedanken zusammenfügen und dadurch adäquates Verhalten ermöglichen. Zu den bekanntesten Assoziationsfeldern, denen man eine bestimmte Funktion zuordnen konnte, gehören das Broca- und das Wernickesprachzentrum, die für die Sprachmotorik bzw. das

Sprachverständnis zuständig sind (Broca 1865; Wernicke 1874). Die Assoziationsfelder nehmen insgesamt ca. 80% des Kortex ein.

1.4.1 Motorkortex

Drei rostral des Sulcus centralis gelegene Kortexgebiete sind direkt an der Steuerung der Willkürbewegung beteiligt. Dies sind der primär motorische Kortex (MI), sowie zwei sekundär motorische Regionen: der prämotorische (PMA) (Fulton 1935) und der supplementär motorische Kortex (SMA). Das gemeinsame zytoarchitektonische Merkmal der motorischen Kortexareale ist das Fehlen der Lamina granularis interna (Brodmann 1909). Man spricht deshalb vom sogenannten agranulären Kortex. Stattdessen ist die Lamina pyramidalis interna verbreitert. In ihr liegen die, nur in MI vorkommenden, Perikarya der sogenannten Betz-Riesenzellen (Betz 1874), deren Axone einen wichtigen Bestandteil des Cortico-Spinal-Traktes darstellen.

Die motorischen Kortexareale sind über reziproke Verbindungen miteinander verknüpft. Durch Assoziationsfasern erhalten sie Eingänge aus dem posterior parietalen Kortex (PPC) und dem präfrontalen Kortex (Rizzolatti et al. 1998). Über thalamokortikale Projektionen erreichen vorverarbeitete Informationen aus Zerebellum und Basalganglien die motorischen Kortexareale (Matelli et al. 1989). Die efferenten Projektionen der motorischen Kortexgebiete ziehen als Tractus corticonuclearis zu den Hirnnervenkernen und als Tractus corticospinalis zum Rückenmark. Durch sie steuert der Motorkortex die Willkürbewegungen. Vor allem MI, das der Brodmann Area 4 entspricht, entsendet viele kortikospinale Projektionen. Die Brodmann Area 6 wird von der lateral gelegenen PMA und der medial liegenden SMA gebildet. Aufgabe der PMA ist die Planung und Ausführung sensorisch ausgelöster Bewegungsabläufe (Wise 1985). Sie ist insbesondere bei feinmotorischen Aufgaben aktiv (Rizzolatti et al. 1988). Die SMA scheint eine wichtige Rolle bei der Kopplung bimanueller Bewegungen zu spielen (Brinkman 1981). Außerdem ist sie an der Planung willkürlich

initiiertes Bewegungssequenzen beteiligt (Roland et al. 1980). Bei einer alleinigen Schädigung von MI kommt es zu einer schlaffen Parese der kontralateralen Körperhälfte. Eine Läsion der PMA hingegen kann zu einer spastischen Lähmung führen (Fulton 1935). Umschriebene Läsionen der SMA bewirken eine kontralaterale Hypokinese und Apraxie (Brust 1996).

1.4.2 Parietalkortex

Im Anschluss an den Frontallappen, hinter dem Sulcus centralis, befindet sich der primär somatosensorische Kortex (SI). Hier enden die afferenten Fasern aus dem Thalamus mit der sensorischen Information der kontralateralen Körperhälfte. Der sensorische Kortex ist in funktionelle Einheiten, vertikal orientierter Kolumnen gegliedert (Mountcastle 1957; Hubel and Wiesel 1962). Jede Kolumne wird nur durch eine spezifische Sinnesmodalität innerhalb eines rezeptiven Feldes erregt. Ebenso wie beim motorischen Kortex, lässt sich eine somatotopie Gliederung mit einer Überrepräsentation bestimmter Körperregionen erkennen (Penfield and Boldrey 1937). Die Repräsentation der Beine befindet sich mittelliniennah im Bereich der Mantelkante. Oberkörper, Hände und Gesicht hingegen werden von weiter lateral lokalisierten Neuronen repräsentiert.

Kaudal von SI, dicht am Sulcus lateralis, befindet sich der sekundär somatosensorische Kortex (SII), der ebenfalls somatotop aufgebaut ist (Adrian 1940; Woolsey 1943). Er entspricht den Brodmann Areae 40 und 43. Neben einer seriellen Informationsverarbeitung von SI nach SII, scheint auch eine parallele Verarbeitung, sowohl ipsilateraler als auch kontralateraler Information, vorzuliegen (Zhang et al. 1996). Über Verbindungen zu Amygdala und Hippocampus, die für Lernprozesse zuständig sind, nimmt SII Einfluss auf die Ausbildung eines taktilen Gedächtnisses (Mishkin 1979). Bei Läsionen von SII kommt es zu einer taktilen Agnosie (Caselli 1993).

Kaudal von SI befinden sich die Brodmann Areae 5, 7 und 39 (Gyrus angularis), die dem PPC entsprechen. Anhand von Untersuchungen an Kriegsveteranen des ersten Weltkrieges, die eine Schussverletzung im Bereich des PPC hatten, erkannte man dessen Bedeutung für die räumliche Orientierung (Holmes 1918). Nach Schädigung des PPC kommt es, trotz erhaltenem Sehvermögen, zu Ungenauigkeit beim Greifen und Zeigen von Objekten, Defiziten bei der Wahrnehmung räumlicher Beziehungen und der visuellen Fixation, sowie Aufmerksamkeitsstörungen. Des Weiteren führen Läsionen der dominanten Hemisphäre zu einer Apraxie, Läsionen der nicht-dominanten Hemisphäre zu einem Neglect der kontralateralen Körperhälfte (Brain 1941). Eine isolierte Schädigung des Gyrus angularis führt aufgrund dessen Funktion als Schaltstelle zwischen sekundärer Seh- und Hörrinde zum sogenannten Gerstmann-Syndrom mit Fingeragnosie, Akalkulie und Agraphie (Gerstmann 1924). Der PPC erhält über den dorsalen Pfad visuelle Informationen über die Bewegung und Position von Objekten (Ungerleider and Mishkin 1982). Außerdem erhält er weitere Afferenzen aus dem auditorischen und somatosensorischen System (Mountcastle et al. 1975) und integriert die jeweiligen Informationen, um eine Bewegungsabsicht zu generieren (Gnadt and Andersen 1988). Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass im PPC auch der freie Wille und die bewusste Absicht sich zu bewegen lokalisiert sind (Sirigu et al. 2004; Haggard 2009). So hat beispielsweise die Arbeitsgruppe um Michel Desmurget festgestellt, dass eine epikortikale Reizung des PPC bei wachen Patienten zu einer Bewegungsintention führt (Desmurget et al. 2009).

1.5 Fragestellung

Experimente vom Libet-Typ scheinen zu belegen, dass motorische Handlungen durch unbewusste Hirnprozesse eingeleitet werden ehe die Entscheidung zur Bewegungsinitiation ins Bewusstsein gelangt. Die Entscheidung zu einer motorischen Handlung basiert jedoch auf einem, ihr vorhergehenden, Deliberationsprozess, i.e. einer Abwägung von Gründen. Das Ziel dieser Studie war, elektrophysiologische Korrelate eines Deliberationsprozesses mittels EEG zeitlich und räumlich exakt zu erfassen und zu analysieren. Es sollte zwar nicht der Nachweis zur Willensfreiheit, jedoch immerhin eine Darstellung ihrer Möglichkeit erbracht werden. Besagter Deliberationsprozess wurde in Form einer, zu einer Entscheidung für eine motorische Handlung führenden, Evaluierung visueller Stimuli realisiert. Hierzu wurden gesunden Probanden weder zeitlich noch inhaltlich antizipierbare visuelle Stimuli präsentiert, die sie mit einem Tastendruck der rechten oder linken Hand beantworten sollten. Mit diesem Ansatz sollte ein schlüssiges Modell für die, einer motorischen Handlung vorhergehende, hirnelektrische Aktivität erarbeitet werden.

2 Material und Methoden

2.1 Probanden

An der Studie nahmen 28 gesunde Probanden (13 weiblich) teil. Das Durchschnittsalter betrug $22,9 \pm 2,2$ Jahre (18 bis 27). Das Probandenkollektiv setzte sich aus Studierenden der LMU München zusammen. Alle Probanden waren Rechtshänder und hatten ein normales oder korrigiertes Sehvermögen. Keiner von ihnen ist in der Vergangenheit psychiatrisch oder neurologisch auffällig geworden. Sie erhielten einen schriftlichen Aufklärungsbogen (*siehe Anhang 11.3*) über die Versuchsdurchführung und willigten mit ihrer Unterschrift ein. Die Teilnahme wurde mit 35 Euro vergütet.

Tabelle 2-1: Basisdaten der 28 gesunden Probanden deren Reaktionszeiten in die Analyse eingegangen sind. Abkürzungen: w=weiblich, m=männlich

Code	Geschlecht	Alter [Jahre]		Code	Geschlecht	Alter
Ys01	m	23		Ys15	w	22
Ys02	m	24		Ys16	m	24
Ys03	m	23		Ys17	w	24
Ys04	m	24		Ys18	m	23
Ys05	w	26		Ys19	w	22
Ys06	m	24		Ys20	m	19
Ys07	w	23		Ys21	m	23
Ys08	w	19		Ys22	w	22
Ys09	w	22		Ys23	w	27
Ys10	m	24		Ys24	w	22
Ys11	m	23		Ys25	m	22
Ys12	m	23		Ys26	m	27
Ys13	w	18		Ys27	m	21
Ys14	w	21		Ys28	w	26
Mittelwert \pm Standardabweichung						22,9 \pm 2,2
Median						23

2.2 Versuchsvorbereitung

Die Probanden wurden aufgefordert, am Tag der Untersuchung die Haare zu waschen. Für die elektrophysiologischen Aufnahmen standen zwei EEG-Hauben (Montage No. 10, Easycap GmbH, Herrsching, Deutschland) mit 61 äquidistant eingearbeiteten Ringelektroden zur

Verfügung (*Abbildung 2-1*). Die Hauben waren für einen Kopfumfang von 54-58 cm bzw. 58-62 cm angefertigt. Um die passende EEG-Haube zu wählen und die Vertexelektrode Cz korrekt positionieren zu können, wurde die Länge Nasion zu Inion eines jeden Probanden, sowie sein Kopfumfang gemessen. Zur Minimierung des Elektrodenwiderstands wurde über ein Befüllungsloch ein Elektrodengel (Electro-Gel; Electro-Cap International Inc., Eaton, Ohio, USA) in die Silber-Silberchlorid Ringelektroden appliziert. Während des kompletten Versuchs wurde versucht den Widerstand unter 50 k Ω zu halten. Es wurden regelmäßige online Widerstandsmessungen durchgeführt. Am linken Ohr wurde eine Referenzelektrode (Ref) und am rechten Ohr eine Erdungselektrode (Gnd) platziert. Nachdem die EEG-Haube auf Cz angepasst war, wurde der Proband aufgefordert, sich auf einen fest montierten Stuhl in 80 cm Abstand vor einen 22 Zoll Bildschirm (BenQ GL2250M, 16:9) zu setzen. Um die Konzentration der Probanden nicht durch Umgebungsgeräusche zu stören, wurden hinter ihnen zwei Lautsprecher aufgestellt, über die ein rosa Rauschen zu hören war.

2.3 Stimulationsprotokoll

Bezüglich unserer Fragestellung wurde das Experiment in drei Phasen eingeteilt: VEP (visuell evoziertes Potential)-Phase, rein motorische Aufgabe und Deliberationsaufgabe. Die VEP-Phase stellte eine Kontrollmessung dar und diente dazu, das zeitliche Auftreten und die Polarität der Antwortkomponenten eines Probanden auf einen visuellen Stimulus zu erfassen. Auch die rein motorische Aufgabe fungierte als Kontrollmessung. Sie wurde durchgeführt, um die individuellen Reaktionszeiten der rechten und linken Hand der Probanden zu messen. Die Deliberationsaufgabe wurde in drei weitere Teilerperimente untergliedert: Lern-, Leer- und Testphase. Während dieser Phase des Experiments wurde die Versuchsperson mit der eigentlichen Fragestellung vertraut gemacht. Sie diente der Erfassung der hirnelektrischen Aktivität nach verschiedenen Interferenzaufgaben. Insgesamt dauerten

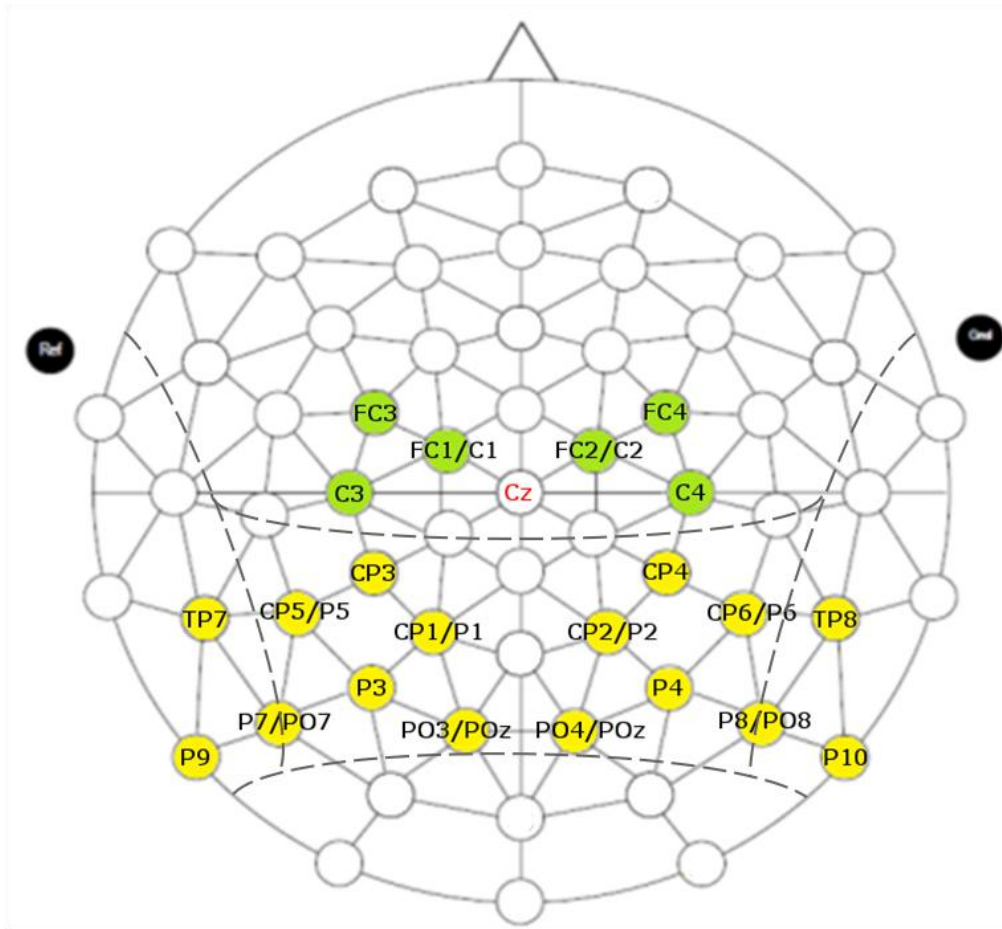


Abbildung 2-1: 61-Kanal EEG der Firma Easy Cap (Herrsching, Germany). Die untersuchten Elektroden des Motorkortex sind grün, die Elektroden des Parietal- bzw. Temporalkortex gelb markiert. Sulcus centralis, lateralis und parietooccipitalis sind in Form gestrichelter Linien dargestellt. Abkürzungen: Ref =Referenzelektrode, Gnd = Erdungselektrode, Elektrode 1 $\hat{=}$ Cz

die Versuche in etwa zwei Stunden (*Tabelle 2-2*). Zwischen den einzelnen Versuchsteilen wurden kurze Erholungspausen von ca. 10 min eingelegt. Zu Beginn jedes Versuchsteils wurde die Probandenanweisung verlesen (*siehe Anhang 11.1*).

2.3.1 Erfassung und Mapping eines VEP

Die Versuchsperson saß vor dem Bildschirm und sollte einen zentralen, grau markierten, Fixationspunkt fixieren. Währenddessen wurde ein Standard-visuell-evoziertes Potential gemessen, das durch ein invertierendes Schachbrettmuster ausgelöst wurde. Die einzelnen

Felder des Schachbretts hatten eine Größe von ca. 1 Grad Sehwinkel, sowohl in vertikaler, als auch in horizontaler Richtung. Der Fixationspunkt nahm 33% eines Schachbrettfeldes ein. Das Schachbrettmuster sprang in festen Intervallen von 750 ms um. Insgesamt wurde diese Versuchsanordnung 360-mal wiederholt.

Da in den folgenden Phasen des Versuchs Schriftzüge in Kombination mit Farbwerten präsentiert wurden, untersuchte man auch das VEP, das durch besagte Schriftzüge evoziert wurde. Hierbei sprang das Schachbrettmuster ebenfalls in einem Intervall von 750 ms um. Zeitgleich mit dem Musterwechsel wurde ein mittiges Textfeld, in dem ein Schriftzug zu sehen war, eingespielt. Der Schriftzug gab die Bezeichnung einer Farbe in Wortform (Textinhalt) an, war jedoch in verschiedenen Textfarben geschrieben z.B. in blau, rot, grün, lila, rosa... und war für ca. 300 ms zu sehen. Es wurden sieben Grundfarben und die Farbempfindung Schwarz verwendet, so dass insgesamt 64 verschiedene Kombinationen aus Textinhalt und Textfarbe zur Verfügung standen, die in zufälliger Reihenfolge präsentiert wurden. Auch diese Versuchsanordnung wurde 360-mal durchgeführt.

2.3.2 Erfassung der Reaktionszeiten nach Reizpräsentation mittels Tastendruck (rein motorische Aufgabe)

Statt der zuvor beschriebenen Kombinationen aus Textinhalt und Textfarbe wurde in diesem Versuch entweder ein nach rechts oder nach links weisender Pfeil eingespielt. Die Probanden waren darüber informiert, dass während der ersten Versuchsserie von 50 Durchgängen nur Pfeile nach rechts, bzw. während der zweiten Serie nur Pfeile nach links erscheinen würden. Sie wurden aufgefordert, weiterhin den Fixationspunkt auf dem Schachbrettmuster zu fokussieren. Bei Erscheinen eines Pfeils nach rechts sollten sie mit dem Zeigefinger der rechten Hand eine vorliegende Taste, bei einem Pfeil nach links mit dem Zeigefinger der linken Hand eine entsprechende Taste drücken. Die Darstellungsdauer der Pfeile betrug 300 ms. Die Intervalle zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen (Intertrialintervalle, ITIs)

variierten in einem Bereich von 12 und 15s und wurden zufällig generiert. Sie entsprachen den ITIs der Deliberationsaufgabe (siehe 2.3.3.).

2.3.3 Erfassung der hirnelektrischen Aktivität nach verschiedenen

Interferenzaufgaben

In randomisierten ITIs von 12 bis 15 s sprang das Schachbrettmuster um. Gleichzeitig erschien das bereits unter 2.3.1. beschriebene Textfeld. Um den Probanden die Möglichkeit der Antizipation zu nehmen, wurden auch hier die verschiedenen Kombinationen aus Textinhalt und Textfarbe in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Alle Schriftzüge waren für 300 ms zu sehen.

Bei der „kongruenten Aufgabe“ stimmte der Textinhalt mit der Textfarbe überein, z.B. der Schriftzug „blau“ in der Textfarbe Blau. Eine Ausnahme stellte der Schriftzug „schwarz“ in der Textfarbe Schwarz dar. Hierbei handelte es sich um die „Aufgabenstellung ohne motorische Reaktion“. Wurde ein Textinhalt präsentiert, der nicht mit der Textfarbe übereinstimmte, z.B. der Schriftzug „blau“ in der Textfarbe Rot, so handelte es sich um die „inkongruente Aufgabe“. In ca. 33% der Fälle stimmte der präsentierte Textinhalt nicht mit der Textfarbe überein. Das Textfeld nahm 66% der Bildschirmbreite und 20% der Bildschirmhöhe ein.

Lernphase: Während der Lernphase wurden insgesamt 50 Durchgänge durchgeführt, also ca. 17 Durchgänge pro Aufgabentyp. Bei der „kongruenten Aufgabe“ sollte mit einem Tastendruck des Zeigefingers der rechten Hand, bei der „inkongruenten Aufgabe“ mit einem Tastendruck des Zeigefingers der linken Hand reagiert werden. Im Falle der „Aufgabenstellung ohne motorische Reaktion“ wurden die Probanden aufgefordert keine motorische Handlung durchzuführen.

Leerphase: Während der Leerphase wurden wiederum 50 Durchgänge mit der oben beschriebenen Stimulation durchgeführt. Allerdings sollten die Probanden in diesem Fall keine motorische Handlung durchführen, sondern sich lediglich überlegen, um welchen Aufgabentypus es sich gehandelt hat und welche Taste sie gedrückt hätten.

Testphase: Die Testphase unterschied sich von der Lernphase nur durch die Anzahl der Durchgänge. Es wurden 300 Wiederholungen durchgeführt, also ca. 100 Durchgänge pro Aufgabentyp. Aufgrund der hohen erforderlichen Konzentration und Anstrengung der Probanden wurde nach jeweils 100 Durchgängen eine kurze Erholungspause von 10 Minuten eingelegt.

2.4 Messeinrichtung

Durch einen Stimulationslaptop (ASUS Pro, B53E) wurden die Stimulationssignale (Schachbrettmuster, Pfeile nach links und nach rechts, Kombinationen aus Textinhalt und Textfarbe) in zufälliger Reihenfolge und mit variablen ITIs generiert und über einen Bildschirm den Probanden präsentiert. Parallel wurde über den Laptop ein Protokoll mitgeschrieben, in dem Datum und Uhrzeit jeder Stimulation, sowie die den Probanden dargebotenen Kombinationen aus Textinhalt und Textfarbe dokumentiert wurden. Für die EEG-Aufzeichnung stand ein PC-gestütztes Aufnahmesystem (Neurofax EEG 1200) der Firma Nihon Kohden (Tokyo, Japan) zur Verfügung. Die Datenaufnahme erfolgte kontinuierlich mit einer Abtastrate von 200 Hz. Des Weiteren wurden mittels einer Kamera (Sony EVI-D70P) die Augenbewegungen und die Mimik der Probanden aufgezeichnet. Dies sollte die Bereinigung von Augen- und Muskelartefakten, wie Beißen, Schlucken, Husten, Niesen und Mimik, erleichtern. Auch der exakte Zeitpunkt des Tastendrucks wurde registriert. Durch einen Phototransistor (OPB 813S) wurde der genaue Zeitpunkt der Stimuluspräsentation (Zeitnullpunkt) gemessen.

Tabelle 2-2: Aufgaben/Messungen in zeitlicher Abfolge mit Wiederholungen; die zeitlichen Angaben berücksichtigen ausschließlich die reine Messzeit; nicht eingerechnet ist das initiale Setzen der Ableitelektroden, sowie die zwischen den Versuchen liegenden Pausen, die Gesamtzeit beträgt in etwa vier Stunden.

Phase	Messung	Aufgabe	Analysedauer	Wiederholungen
VEP-Phase	VEP	Betrachten eines Fixationspunktes innerhalb eines invertierenden Schachbrettmusters auf einem Bildschirm	ca. 5 Min.	360
	VEP der Schrift	Betrachten eines Fixationspunktes innerhalb eines invertierenden Schachbrettmusters in dessen Mitte ein Schriftzug erscheint	ca. 5 Min	360
Rein motorische Aufgabe	Reaktionszeitmessung	Drücken einer Taste (rechte Hand) nach nicht vorhersehbarem, zufälligen Signal auf dem Bildschirm	ca. 12,5 Min	50
		Drücken einer Taste (linke Hand) nach nicht vorhersehbarem, zufälligen Signal auf dem Bildschirm	ca. 12,5 Min	50
Deliberationsaufgabe	Lernphase der Textpräsentation	Beantwortung der Entscheidung durch Drücken einer der beiden Tasten	ca. 12,5 Min	50
	Leerphase der Textpräsentation	Überlegung der korrekten Entscheidung ohne Tastendruck	ca. 12,5 Min	50
	Testphase der Textpräsentation	Beantwortung der Entscheidung durch Drücken einer der beiden Tasten	ca. 3x25 Min	3x100
		Gesamt (reine Messzeit)	2 Stunden 15 Minuten	1220

2.5 Auswertung

Die aufgenommenen EEG-Daten wurden mit Hilfe einer Software von Brain Electrical Source Analysis (BESA, Gräfelfing, Deutschland) bearbeitet und ausgewertet. Als Referenz für die Elektroden wurde der Potentialmittelwert aller Elektroden (Common-Average-Reference) verwendet. Zur Datenfilterung wurden ein Bandpassfilter von 0,01 bis 40 Hz und ein notch filter von 50 Hz eingestellt. Augenartefakte konnten mit BESA erkannt und herausgerechnet werden. Hierzu wurde für horizontale Augenbewegungen ein Grenzwert von 150 μV und für vertikale Augenbewegungen ein Grenzwert von 250 μV verwendet. Wenn diese Grenzwerte von den EEG-Signalen überschritten wurden, wurden die Signale automatisch als Augenartefakt erkannt und subtrahiert. Einige wenige Probanden machten nur sehr geringfügige Augenbewegungen, so dass die voreingestellten Grenzwerte keine Wirkung zeigten. In diesen Fällen wurde der Wert für die vertikalen Augenbewegungen auf bis zu 150 μV herabgesetzt.

Versuchsdurchgänge, in denen die Probanden die falsche Taste oder mehr als 2000 ms nach Stimuluspräsentation gedrückt haben, wurden nicht in die weitere Analyse einbezogen. Insgesamt lag die Fehlerquote unter 2%.

Bei einigen Probanden waren einzelne Elektrodenkanäle stark verrauscht. Diese Kanäle wurden nach Möglichkeit mit den Werten benachbarter Kanäle interpoliert. Waren jedoch zu viele Kanäle artefaktbehaftet, so wurden diese Versuchsdurchgänge ebenfalls aus der Analyse ausgeschlossen.

Die auf diese Weise bereinigten EEG-Daten wurden baseline korrigiert. Der Referenzzeitraum umfasste ein 400 ms Intervall vor Stimuluspräsentation. Hierfür sowie für eine halb-automatische Detektion der Extrema der EEG-Daten wurde ein maßgefertigtes Softwarepaket mit entsprechenden Algorithmen basierend auf der freien Programmiersprache R für statistisches Rechnen und statistische Grafiken (R-Version 3.0.2, The R Foundation For

Statistical Computing) verwendet. In die elektrophysiologische Analyse flossen die Daten des Motor- sowie des Parietalkortex ein (*Abbildung 2-1*). Die Mittelwerte wurden nach vier verschiedenen Verfahren gebildet: bezogen auf den Zeitpunkt der Stimuluspräsentation, auf den Zeitpunkt des Tastendrucks, den Zeitpunkt der maximalen Negativität N_0 sowie auf den Zeitpunkt der parietalen Positivität P_{Par} . Die auf den Zeitpunkt des Tastendrucks bezogenen Mittelwerte konnten folglich nur bei der „kongruenten“ und „inkongruenten Aufgabe“ sowie bei der rein motorischen Aufgabe und die auf die N_0 und die P_{Par} ausgerichteten Mittelwerte nur bei der „kongruenten“ und „inkongruenten Aufgabe“ gebildet werden.

2.6 Statistik

Auf den Zeitpunkt der Stimuluspräsentation bezogene Mittelwerte wurden über einen Zeitraum 500 ms vor bis 2000 ms nach Stimuluspräsentation, auf den Tastendruck bezogene Mittelwerte über den Zeitraum 1000 ms vor bis 500 ms nach Tastendruck, auf N_0 bezogene Mittelwerte über den Zeitraum 750 ms vor bis 250 ms nach N_0 und auf P_{Par} bezogene Mittelwerte über den Zeitraum 500 ms vor bis 500 ms nach P_{Par} gebildet. Die Reaktionszeit wurde vom Beginn des Stimulus bis zum Tastendruck gemessen. Die Erfassung statistischer Basisdaten (Reaktionszeiten, Mittelwerte, Varianzen, Standardabweichungen, Standardfehler, Median), die Ermittlung der Latenzen und Amplituden der Extrema sowie die graphische Darstellung elektrophysiologischer Daten erfolgte mittels der freien Programmiersprache R für statistisches Rechnen und statistische Grafiken. Statistische Tests hingegen wie z.B. t-Tests und Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests wurden mit SPSS 21 durchgeführt. Hierbei wurde ein Signifikanzniveau von 5% angesetzt.

Zur Bestimmung des Beginns der in N_0 bzw. in P_{Par} terminierenden Negativität bzw. Positivität wurde ein Regressionsmodell angewendet. Das Zeitfenster zwischen Stimuluspräsentation und N_0 bzw. P_{Par} wurde in zwei Intervalle mit einer minimalen Länge von 50ms geteilt. Eine Regressionsanalyse wurde in beiden Intervallen durchgeführt. Der

Beginn der Negativierung bzw. Positivierung wurde durch die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und wurde durch den Zeitpunkt definiert, an dem die Residuen beider Regressionsgeraden den geringsten Wert annahmen (*Abbildung 3-9*).

Um herauszufinden ob die von uns detektierten Extrema mit dem Stimulus oder dem Tastendruck korrelieren, wurde die Varianz der Intervalle Stimulus-Extremum bzw. Extremum-Tastendruck mittels einer modifizierten Version des Kepner-Randals Test analysiert (Kepner and Randles 1982; Kutz et al. 2003). Um eine Alpha-Kumulierung bei multiplem Testen zu vermeiden wurde hierbei eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Ein Z-Wert $< -3,254$ spricht für eine Korrelation des untersuchten Extremums mit dem Stimulus, ein Z-Wert $> +3,254$ hingegen für eine Korrelation mit dem Tastendruck.

3 Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war es den Deliberationsprozess, der einer motorischen Handlung vorausgeht, zu analysieren. Es wurden ereigniskorrelierte Potentiale motorischer sowie parietaler Kortexareale untersucht. In beiden Kortexarealen konnte ein, der Handlung vorausgehendes, elektrophysiologisches Korrelat des Deliberationsprozesses nachgewiesen werden.

Hierzu wurde eine Deliberationsaufgabe durchgeführt, bei der 28 jungen, gesunden Probanden ein weder zeitlich noch inhaltlich antizipierbarer, visueller Stimulus präsentiert wurde, den sie mit einem Tastendruck der rechten bzw. der linken Hand beantworten mussten. Um die motorischen EEG-Komponenten vom Deliberationsprozess differenzieren zu können, wurde zudem eine rein motorische Aufgabe durchgeführt.

Im vorliegenden Ergebnisteil erscheint zuerst die Analyse der Reaktionszeiten. Anschließend folgen die elektrophysiologischen Ergebnisse der Messungen im Motor- sowie im Parietalkortex, die sowohl vom Stimulus als auch vom Tastendruck ausgehend untersucht wurden.

3.1 Reaktionszeitanalyse

In die Reaktionszeitanalyse wurden die Daten aller 28 Probanden mit einbezogen. Als Reaktionszeit ist der zeitliche Abstand zwischen Stimulus und Tastendruck zu verstehen. Es wurden Mittelwerte, Standardabweichung, Maxima und Minima, der Standardfehler des Mittelwerts sowie der Median eines jeden Probanden während der rein motorischen Aufgabe (*Kap. 2.3.2*), der Lern- und der Testphase (*Kap. 2.3.3*) bestimmt (*Tabelle 3-1*). Es zeigte sich, dass die Probanden bei der Messung der Reaktionszeit im Mittel mit der rechten Hand 259 ms und mit der linken Hand 264 ms benötigten. Im t-Test bei verbundenen Stichproben zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Reaktionszeiten der rechten und linken

Hand (Tabelle 3-2). Obwohl alle Probanden Rechtshänder waren, zeigte sich bei 11 der 28 Probanden sogar eine kürzere Reaktionszeit der linken Hand. Auch die Standardabweichungen waren beinahe identisch und beliefen sich auf ca. 65 ms für beide Hände.

Während der Deliberationsaufgabe zeigten die Probanden deutlich höhere Reaktionszeiten. Im Durchschnitt benötigten sie während der Lernphase mit der rechten Hand 768 ms und mit der linken Hand 810 ms. Hier zeigte sich also bereits eine Seitendifferenz von 41 ms. Während der Testphase belief sich die mittlere Reaktionszeit der rechten Hand auf 700 ms und die Reaktionszeit der linken Hand auf 760 ms. Auch hier fiel eine Seitendifferenz von 61 ms auf. Die Standardabweichungen stimmten beinahe überein und betragen ca. 185 ms. Auch die Mittelwerte und Mediane stimmten miteinander überein. Die hohe Präzision der Messung ist anhand des niedrigen Standardfehlers des Mittelwerts ersichtlich.

Tabelle 3-1: Reaktionszeiten der rein motorischen Aufgabe, der Lern- und der Testaufgabe. Für die drei verschiedenen Aufgabentypen „rein motorische Aufgabe“, „Lern“- und „Testphase“ sind jeweils die Anzahl (n) der insgesamt durchgeführten Durchgänge, die mittlere Reaktionszeit samt Standardabweichung (Mean \pm SD), der Standardfehler des Mittelwerts (SEM) und der Median dargestellt. In der 3. Zeile eines jeden Aufgabentyps ist jeweils die Differenz aus linker und rechter Hand ersichtlich.

Aufgabe	N	Mean \pm SD [ms]	SEM [ms]	Median [ms]
Pfeil rechts	1227	258,9 \pm 62,8	1,8	250
Pfeil links	1260	264,3 \pm 69,7	2,0	255
Delta		5,4		5
Lern rechts	379	768,9 \pm 231,6	11,9	720
Lern links	385	810,1 \pm 225,6	11,5	765
Delta		41,1		45
Test rechts	2438	699,8 \pm 181,9	3,7	665
Test links	2331	760,3 \pm 187,1	3,8	720
Delta		60,5		55

Wenn man die drei verschiedenen Aufgabenstellungen miteinander vergleicht (*Abbildung 3-1*), stellt man fest, dass die Reaktionszeiten der rein motorischen Aufgabe am niedrigsten ausfielen und sich die Zeiten in Bezug auf die Hand, mit der gedrückt wurde nur unwesentlich unterschieden. Die Reaktionszeiten während der beiden Deliberationsaufgaben hingegen waren um einiges höher. Auch war hier eine deutliche Seitendifferenz festzustellen. Während der Lernphase waren die Reaktionszeiten etwas länger als während der Testphase. Auch die Streuung war geringfügig größer.

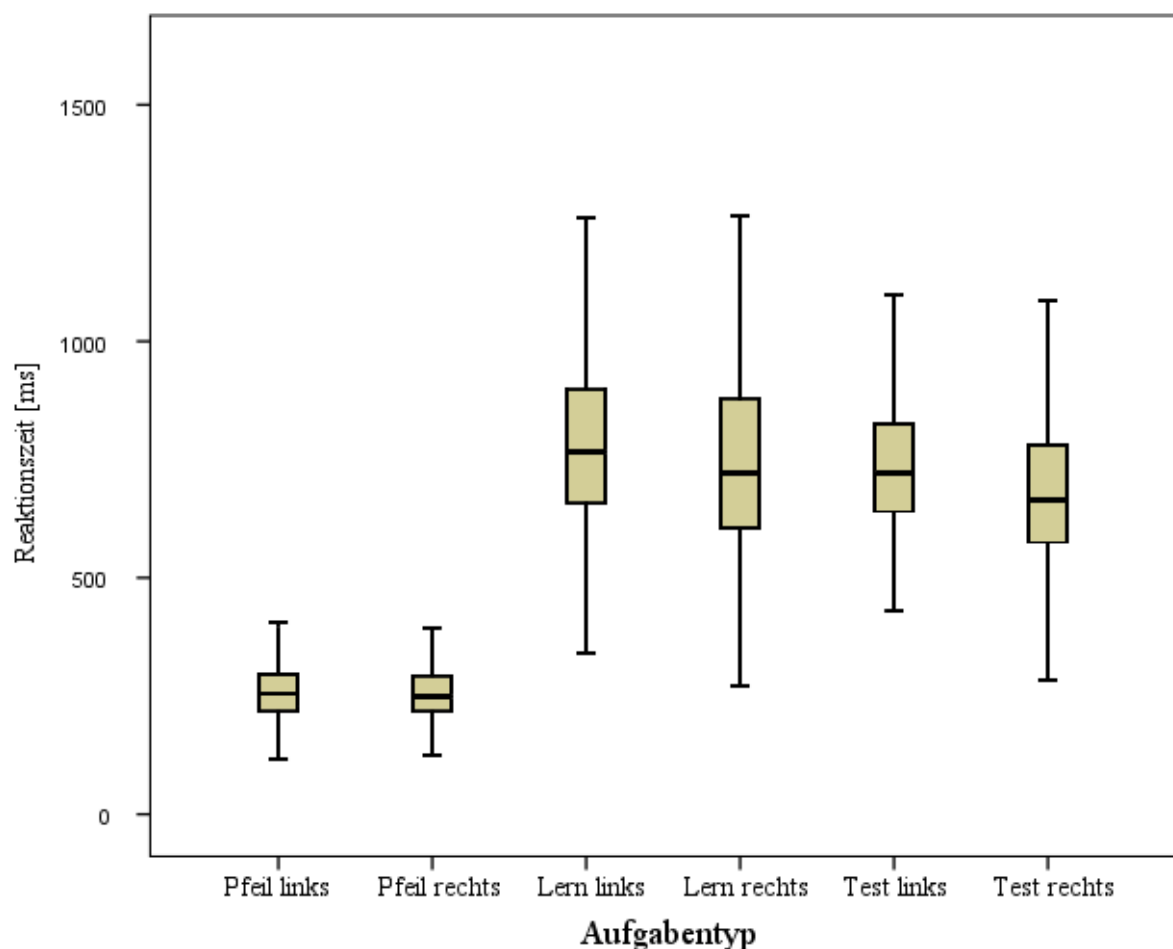


Abbildung 3-1: Reaktionszeiten der verschiedenen Aufgabentypen im Box-Plot. Es sind die Reaktionszeiten der verschiedenen Aufgabentypen in ms (0ms bis 1500ms) aufgetragen. Innerhalb der Box befinden sich die Werte zwischen dem 25% und dem 75% Perzentil sowie als schwarzer Balken der Median. Die Länge der Antennen beträgt das 1,5-Fache des Interquartilsabstands bzw. endet bei dem letzten Wert, der sich innerhalb dieser Grenze befindet. Der Übersichtlichkeit halber sind keine Ausreißer dargestellt.

Um zu untersuchen, ob bezüglich der Reaktionszeiten der verschiedenen Aufgabentypen ein signifikanter Unterschied besteht, wurde ein t-Test bei verbundenen Stichproben durchgeführt (Tabelle 3-2). Hierzu wurden für jeden Probanden die Variablenpaare „Pfeil nach rechts und Pfeil nach links“, „kongruente und inkongruente Aufgabe“, „Pfeil nach rechts und kongruente Aufgabe“ sowie „Pfeil nach links und inkongruente Aufgabe“ analysiert. Mit Ausnahme des Variablenpaars „Pfeil nach rechts und Pfeil nach links“ (p -Wert: 0,20) zeigte sich bei allen Paaren ein signifikanter Unterschied bezüglich ihrer Reaktionszeit.

Tabelle 3-2: T-Test bei verbundenen Stichproben zum Vergleich der Reaktionszeiten der verschiedenen Aufgabentypen. Die Variablenpaare „Pfeil nach rechts (PR) und Pfeil nach links (PL)“, „kongruente (kA) und inkongruente Aufgabe (ikA)“, Pfeil nach rechts und kongruente Aufgabe“ sowie „Pfeil nach links und inkongruente Aufgabe“ wurden mittels T-Test bei verbundenen Stichproben verglichen. Für die untersuchten Variablenpaare sind jeweils Standardabweichung, Standardfehler des Mittelwertes sowie der Mittelwert der gepaarten Differenz dargestellt. Des Weiteren sind der T-Wert, die Freiheitsgrade (df) sowie die Signifikanz abgebildet.

	Gepaarte Differenzen			T	df	Signifikanz
	Mean	SD	SEM			
Paar 1 PR - PL	-5,19	20,85	3,94	-1,31	27	0,199
Paar 2 kA - ikA	-62,08	44,40	8,39	-7,40	27	0,000
Paar 3 PR - kA	-438,12	94,38	17,83	-24,56	27	0,000
Paar 4 PL - ikA	-495,02	71,21	13,46	-36,78	27	0,000

3.2 Elektrophysiologische Analyse der Test-Phase

Nachfolgend wird die elektrophysiologische Aktivität des Motor- und Parietalkortex (*Abbildung 2-1*) während der rein motorischen Aufgabe sowie während der Deliberationsaufgabe untersucht. Die Daten dreier Probanden wurden aufgrund technischer Probleme von der elektrophysiologischen Analyse ausgeschlossen. Mit Ausnahme der Auswertung der Prästimulusaktivität wurden die Daten baseline korrigiert. Hierfür wurde ein Referenzzeitraum von 400 ms vor Stimuluspräsentation gewählt.

3.2.1 Prästimulusaktivität

Bewusste oder unbewusste Erwartungen bei Aufgabenstellung können zu grundlegenden Potentialdrifts führen. Daher wurde die EEG-Aktivität vor Stimuluspräsentation untersucht. Hierzu wurde der Gesamtmittelwert aller Probanden über ein Intervall von 500 ms vor bis 200 ms nach Einsetzen des Stimulus gebildet. Die rein motorische Aufgabe sowie die verschiedenen Aufgabentypen der Deliberationsaufgabe wurden getrennt analysiert. In *Abbildung 3-2* sind exemplarisch die an den Elektroden O1, O2, C3 und C4 gebildeten Mittelwerte sowie die DC-Offsets vor Stimuluspräsentation abgebildet. Abgesehen von unterschiedlichen DC-Werten zeigte sich im Vorfeld der Stimuluspräsentation bei keiner der Aufgabenstellungen eine charakteristische EEG-Aktivität. Erst nach Stimuluspräsentation erfolgte das charakteristische visuell evozierte Potential, das sich bei den Elektroden C3 und C4 mit einer typischen initialen Negativierung und sich daran anschließenden Positivität präsentiert.

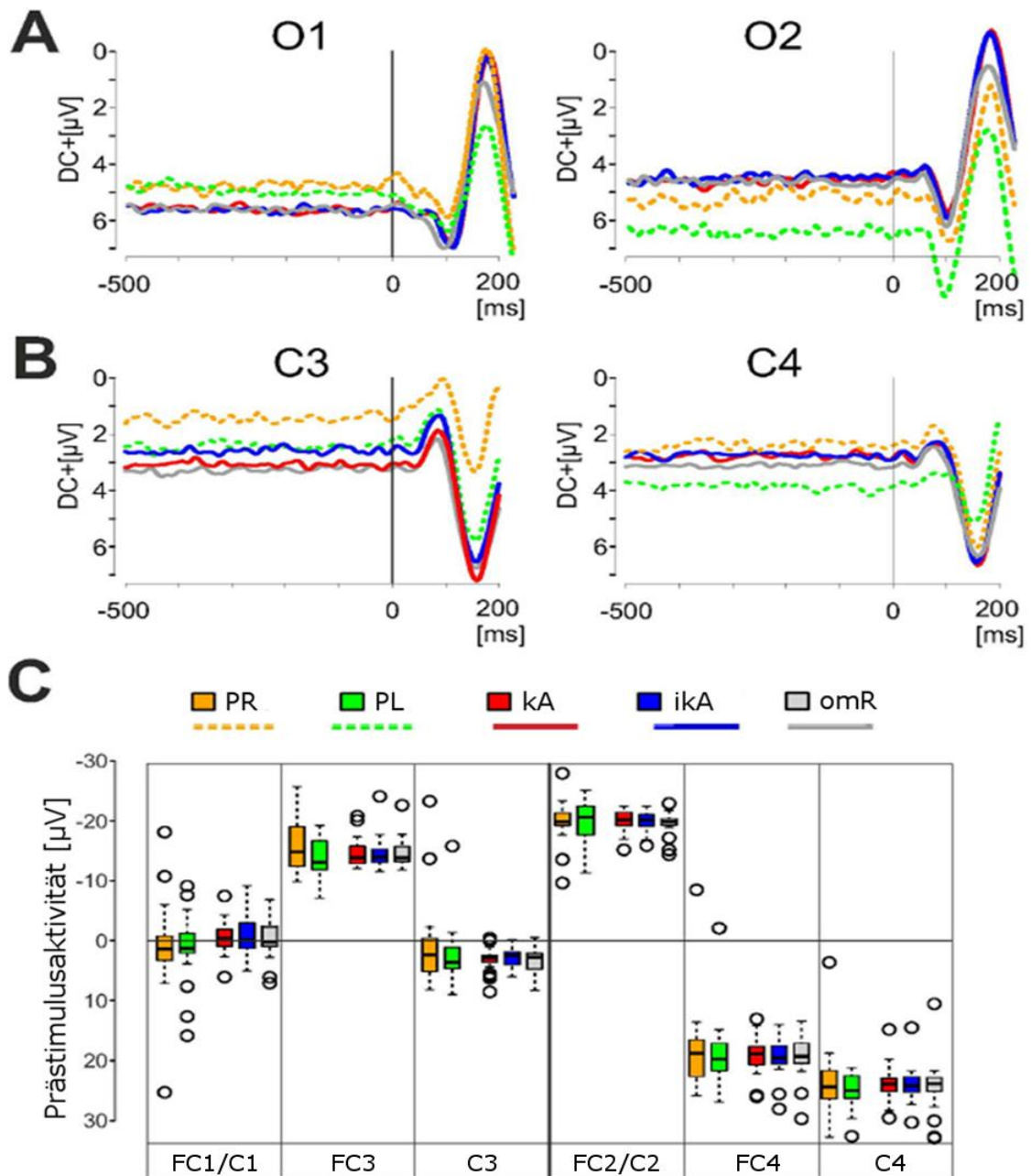


Abbildung 3-2: EEG-Aktivität vor Stimuluspräsentation. Abbildung A und B demonstrieren die an den Elektroden O1 und O2 bzw. C3 und C4 (siehe Abbildung 2-1) bestimmten Gesamtmittelwerte. Die EEG-Aktivität der „kongruenten Aufgabe“ ist in rot, die der „inkongruenten Aufgabe“ in blau und die der „Aufgabe ohne motorische Reaktion“ in grau abgebildet. Zur besseren Unterscheidbarkeit sind die Mittelwerte der rein motorischen Aufgabe mittels gestrichelter Linie dargestellt, bei Tastendruck der rechten Hand (PR) in orange und bei Tastendruck der linken Hand (PL) in grün. Auf der X-Achse ist die Zeit in ms (-500 ms bis 200 ms) und auf der Y-Achse die Amplitude in μV (0 μV bis 7 μV) aufgetragen. In **Abbildung C** sind für die Elektroden des Motorkortex (C3, FC3, FC1/C1, FC2/C2, FC4, C4, Abbildung 2-1), die, über ein Intervall von 400 ms vor Stimuluspräsentation ermittelten, DC-Niveaus mittels Box-Plot dargestellt. Die verschiedenen Aufgabentypen entsprechen farblich denen der Abbildung A. Ausreißer sind durch Kreise markiert.

3.2.2 Stimulus ausgerichtete ereigniskorrelierte Potentiale

Bei der Analyse der auf den Stimulus ausgerichteten Mittelwerte der Deliberationsaufgabe zeigten sich drei charakteristische hirnelektrische Aktivitätsmuster. Das erste Muster lässt sich besonders gut durch die bei der „kongruenten Aufgabe“ an Elektrodenposition CP2/P2 gebildeten Mittelwerte darstellen (*Abbildung 3-3.A*). Ca. 100ms nach Stimuluspräsentation zeigte sich eine initiale Negativität. Hierbei handelt es sich um Korrelat der P100, einem Bestandteil des visuell evozierten Potentials, das im Folgenden jedoch nicht näher analysiert wird. Anschließend zeigte sich eine Abfolge von fünf Extrema, die mit einer initialen, 186 ms nach Stimuluspräsentation auftretenden Positivität (P1) begann (*Tabelle 3-3*). Nach ca. 45 ms folgte eine relative Negativität (N1), an die sich nach weiteren 120 ms eine neuerliche Positivität (P2) anschloss. 415 ms nach Stimuluspräsentation erfolgte eine weitere Negativität (N2). Zuletzt zeigte sich ca. 503 ms nach dem Stimulus eine erneute Positivität (P3). Eine entsprechende Abfolge der Extrema zeigte sich in motorischen Kortexarealen sowie bei den Elektrodenpaaren CP1/P1 – CP2/P2 und CP3 – CP4.

Ein zweites Muster mit drei Extrema ließ sich an den Elektrodenpaaren CP5/P5 – CP6/P6, PO3/POz – PO4/POz sowie P3 – P4 identifizieren. Die typische, an besagten Elektrodenpositionen gemessene, hirnelektrische Aktivität wird am Beispiel des bei der „kongruenten Aufgabe“ an Position PO3/POz gebildeten Mittelwerts deutlich (*Abbildung 3-3.B*). Das EEG-Muster begann hier mit einer 308 ms nach Stimuluspräsentation einsetzenden Positivität (P2), an die sich nach ca. 80 ms eine Negativität anschloss (N2). Anschließend folgte nach weiteren 85 ms eine neuerliche Positivität (P3). Die Extrema erfolgten also in etwa zum gleichen Zeitpunkt wie die zuvor beschriebene P2, N2 und P3.

Bei den Elektrodenpaaren P7/PO7 – P8/PO8, TP7 – TP8 sowie P9 – P10 ließ sich ein drittes Aktivitätsmuster nachweisen. Es besteht aus einer Abfolge von 5 Extrema, die jedoch eine inverse Polarität zu Muster 1 und 2 aufweisen. Das EEG-Muster besagter

Elektrodenpositionen wird am Beispiel der während der „kongruenten Aufgabe“ abgeleiteten hirnelektrischen Aktivität von Elektrode TP7 demonstriert (*Abbildung 3-3.C*). Die an dieser Elektrodenposition beobachteten Extrema erfolgten zeitgleich mit den vorbeschriebenen Extrema P1, N1, P2, N2 und P3 des Musters 1 (*Tabelle 3-3*) und erhalten hier daher, trotz inverser Polarität, die gleiche Nomenklatur.

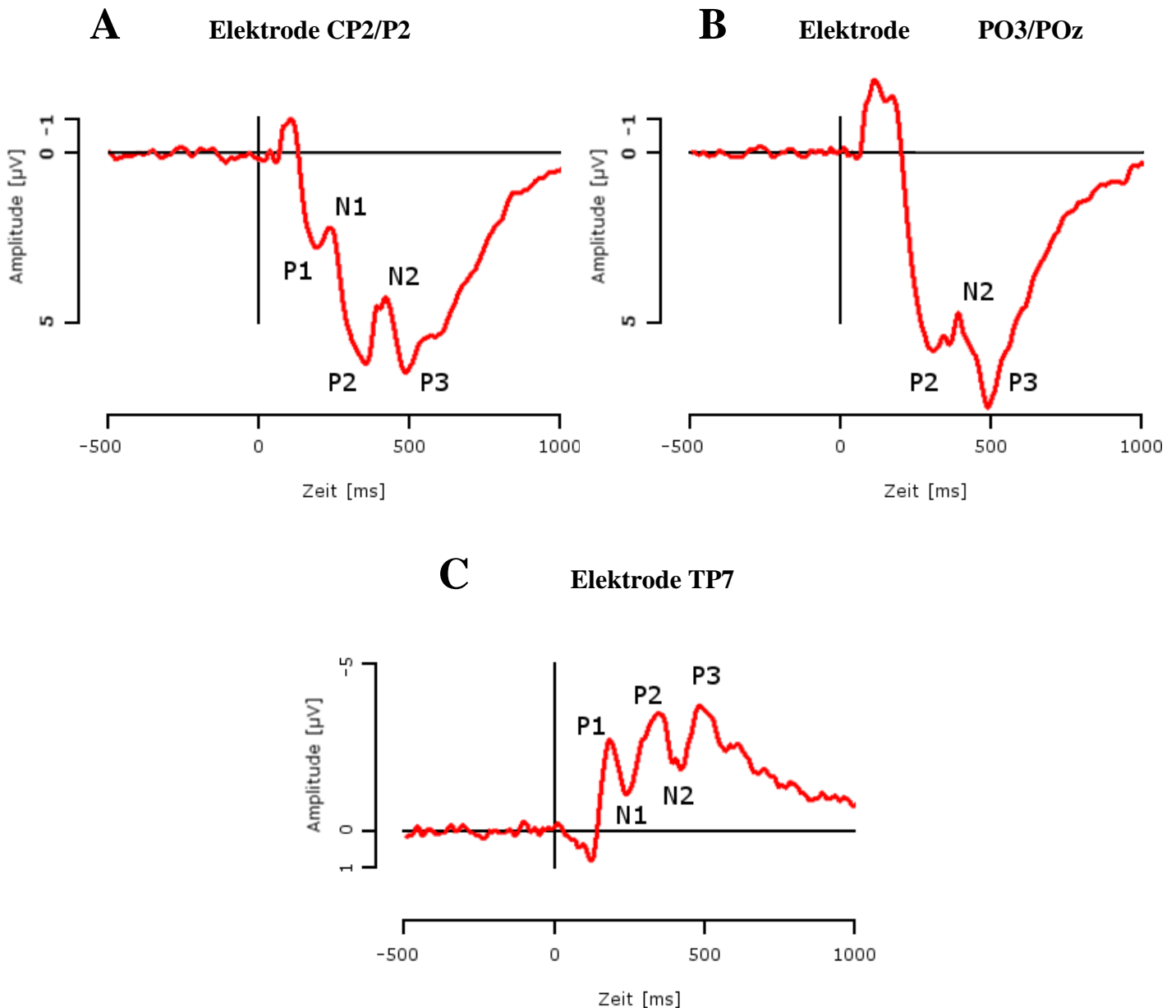


Abbildung 3-3: Stimulus ausgerichtete Mittelwerte der Deliberationsaufgabe. Dargestellt sind die drei detektierten Aktivitätsmuster. Muster 1 ist anhand der Mittelwerte von Elektrode CP2/P2 (A), Muster 2 anhand der Mittelwerte von Elektrode PO3/POz (B) und Muster 3 anhand der Mittelwerte von Elektrode TP7 (C) während der „kongruenten Aufgabe“ dargestellt. Muster 1 weist eine Abfolge von fünf Extrema: P1 - N1 - P2 - N2 - P3 auf. Bei Muster 2 hingegen zeigen sich lediglich drei Extrema, die in etwa zum Zeitpunkt der P2, N2 und P3 von Muster 1 auftreten. Muster 3 weist ebenfalls fünf Extrema, deren Polarität im Vergleich zu Muster 1 und 2 jedoch invers ist, auf. Aufgrund des zeitgleichen Auftretens der Extrema werden diese hier dennoch P1, N1, P2, N2 und P3 genannt. Auf der Y-Achse ist die Amplitude in μV (-1 μV bis 5 μV bei Muster 1 und 2, bzw. -5 μV bis 1 μV bei Muster 3) und auf der X-Achse die Zeit in ms (-500 ms bis 1000 ms) dargestellt.

In Abbildung 3-4 sind die Mittelwerte der „kongruenten Aufgabe“ der für diese Arbeit untersuchten Elektrodenpositionen dargestellt. Auf die Darstellung der Mittelwerte der „inkongruenten Aufgabe“ wird, da sich lediglich bezüglich der Amplitude der Extrema signifikante Unterschiede zur „kongruenten Aufgabe“ zeigten, verzichtet.

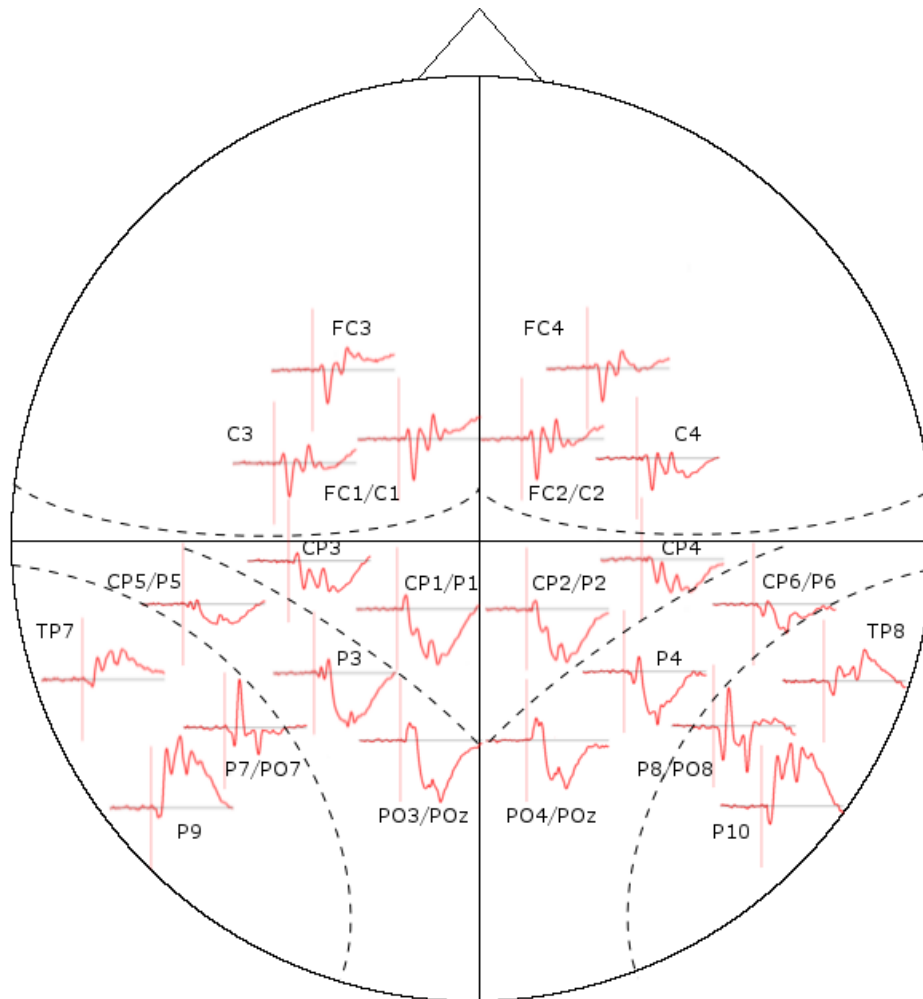


Abbildung 3-4: Mittelwerte der hirnelektrischen Aktivität der für diese Arbeit untersuchten Elektrodenpositionen während der "kongruenten Aufgabe". Für die untersuchten Elektroden sind die ermittelten Mittelwerte dargestellt. Die vertikale, rote Linie markiert den Zeitpunkt der Stimuluspräsentation. Die Elektroden der drei verschiedenen EEG-Muster bestehend aus fünf Extrema, drei Extrema bzw. fünf Extrema mit inverser Polarität sind graphisch durch gestrichelte Linien voneinander getrennt dargestellt. Die Elektroden des Motorkortex sind ebenfalls durch eine gestrichelte Linie von den Elektroden des Parietalkortex getrennt. Auf der Y-Achse ist die Amplitude in μV ($-7,5 \mu\text{V}$ bis $+7,5 \mu\text{V}$) und auf der X-Achse die Zeit in ms (-500 ms bis 1500 ms) aufgetragen. Der besseren Übersichtlichkeit halber sind ausschließlich die Mittelwerte der „kongruenten Aufgabe“ dargestellt. Es zeigten sich jedoch lediglich bezüglich der Amplitude Unterschiede zur „inkongruenten Aufgabe“.

Um sicherzugehen, dass es sich bei den an den verschiedenen Elektrodenpositionen gemessenen Extrema um ein Korrelat der gleichen elektrischen Grundaktivität handelt, wurden die jeweiligen Latenzen und deren Standardabweichungen miteinander verglichen (*Abbildung 3-5*). Es zeigte sich, dass die Latenzen der verschiedenen Elektroden bei allen Aufgabentypen nur geringfügig differierten. Die Standardabweichung der Latenz rangierte bei den meisten Elektroden in einem Bereich von 15 bis 60 ms.

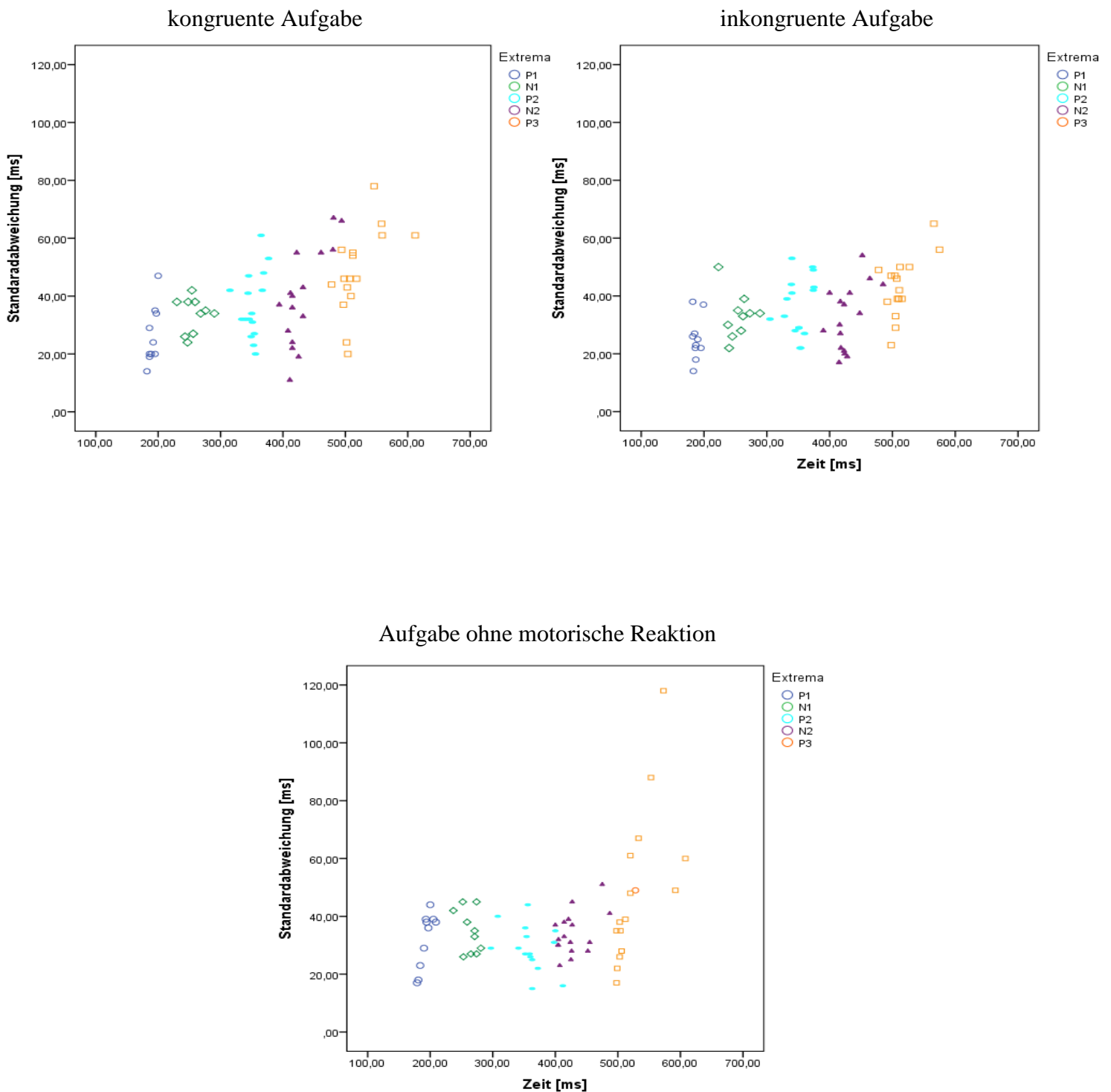


Abbildung 3-5: Streudiagramme der Latenz und ihrer Standardabweichung für alle Extrema und Aufgabentypen. Die fünf definierten Extrema sind durch unterschiedliche Farben und Symbole dargestellt. Da an den Elektrodenpaaren CP5/P5 und CP6/P6, PO3/POz und PO4/POz sowie P3 und P4 nur drei Extrema detektiert werden konnten, variiert die Anzahl der jeweils dargestellten Symbole. Auf der Y-Achse ist die Standardabweichung in ms (0 ms bis 120 ms) und auf der X-Achse die Zeit in ms (100 ms bis 700 ms) aufgetragen.

Unter Einbeziehung der Muster aller untersuchter Elektrodenpositionen und der beiden Aufgabentypen „kongruente“ und „inkongruente Aufgabe“ erfolgte die P1 $182,8 \pm 5,1$ ms nach Stimuluspräsentation (*Tabelle 3-3*). Die N1 folgte $261,6 \pm 15,9$ ms, die P2 $349,2 \pm 14,6$ ms und die N2 $429,5 \pm 23,0$ ms nach dem Stimulus. Zuletzt folgte die P3 $513,8 \pm 25,6$ ms nach dem Stimulus. Bezüglich der Latenz der Extrema zeigte sich kein Unterschied zwischen den an den Elektroden des Motor und des Parietalkortex gemessenen Aktivitäten. Auch zwischen den Latenzen der linken und rechten Hemisphäre ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Die drei an der Elektrode PO3/POz gemessenen Extrema zeigten sich ca. 9 ms vor dem durchschnittlichen Zeitpunkt von P2, N2 und P3, die an der kontralateralen Elektrode PO4/POz gemessenen Extrema erfolgten ca. 37 ms vor den entsprechenden Extrema P2, N2 und P3. Die drei an den Elektrodenpaaren CP5/P5 - CP6/P6 sowie P3 - P4 gemessenen Extrema präsentierten sich im Mittel 36 ms nach der mittleren P2, N2 und P3. Konträr zum Elektrodenpaar PO3/POz - PO4/POz erfolgten die N2 und P3 in der dominanten, linken Hemisphäre signifikant früher als in der nicht-dominanten, rechten Hemisphäre.

Tabelle 3-3: Latenzen und Amplituden der Extrema während der Deliberationsaufgabe.

Es sind die Latenzen in ms und die Amplituden in μV der P1, N1, P2, N2 sowie P3 während der Deliberationsaufgabe dargestellt. In der oberen Tabelle sind die ermittelten Werte der „kongruenten Aufgabe“, in der unteren Tabelle die Werte der „inkongruenten Aufgabe“ dargestellt. Die Elektroden der drei verschiedenen EEG-Muster bestehend aus fünf Extrema, drei Extrema bzw. fünf Extrema mit inverser Polarität sind graphisch durch schwarze Linien voneinander getrennt dargestellt. Die Elektroden des Motorkortex sind ebenfalls durch eine Linie von den Elektroden des Parietalkortex getrennt.

	Elektrode	P1		N1		P2		N2		P3	
		ms	μV	ms	μV	ms	μV	ms	μV	ms	μV
kongruente Aufgabe	FC3	188	4,6	278	-1,6	343	1,1	441	-3,6	502	-0,7
	FC1/C1	184	5,5	267	-2,2	344	1,9	424	-3,4	503	1,0
	C3	187	4,6	273	-1,3	347	1,5	422	-2,6	503	1,2
	CP1/P1	200	4,5	254	2,2	351	6,3	415	3,2	507	7,2
	CP3	186	3,9	259	0,3	356	3,7	425	0,4	502	4,1
	CP5/P5					365	3,4	480	0,5	558	2,9
	PO3/Poz					345	7,9	415	3,8	497	8,1
	P3					369	7,7	461	3,7	546	6,8
	P7/PO7	182	-6,5	276	2,3	340	-0,7	415	3,9	494	-0,9
	TP7	192	-3,5	247	-0,6	334	-4,3	422	-0,8	512	-4,4
	P9	195	-8,3	248	-3,4	346	-9,6	432	-3,1	512	-7,8
	FC4	188	4,5	269	-1,5	349	1,4	429	-3,0	510	0,5
	FC2/C2	184	5,4	264	-2,1	345	2,3	427	-2,9	516	2,2
	C4	188	4,2	259	-1,1	350	2,5	422	-1,2	508	2,4
	CP2/P2	186	3,4	230	1,1	349	6,7	415	3,7	503	7,1
	CP4	186	3,3	243	0,0	344	4,3	412	1,3	498	4,7
CP6/P6					367	4,3	494	0,2	612	2,3	
PO4/Poz					315	5,9	394	2,0	478	7,1	
P4					377	7,4	481	2,1	559	4,8	
P8/PO8	189	-5,6	290	3,5	353	0,4	411	6,1	509	-1,6	
TP8	197	-2,8	268	0,3	350	-2,5	408	0,2	504	-4,5	
P10	195	-7,0	256	-2,5	354	-8,6	432	-2,1	518	-8,2	
inkongruente Aufgabe	FC3	186	4,5	283	-1,6	346	0,8	438	-3,5	503	-0,1
	FC1/C1	182	5,4	268	-2,1	344	1,9	426	-3,3	522	1,6
	C3	183	4,4	270	-1,3	348	1,5	421	-2,3	504	1,7
	CP1/P1	199	4,5	254	2,1	354	6,6	416	3,4	505	7,0
	CP3	187	3,8	262	0,2	360	3,7	423	0,5	515	4,2
	CP5/P5					375	3,5	452	1,0	566	3,1
	PO3/Poz					340	7,6	423	3,8	508	7,9
	P3					373	7,6	448	4,1	511	6,5
	P7/PO7	183	-6,4	273	1,9	332	-0,7	418	3,7	507	-1,2
	TP7	190	-3,1	245	-0,2	328	-3,9	417	-0,2	512	-4,0
	P9	187	-7,6	238	-3,1	340	-9,0	417	-2,7	498	-7,6
	FC4	188	4,5	273	-1,5	345	1,1	433	-3,3	495	-0,6
	FC2/C2	183	5,3	263	-2,3	348	1,9	423	-3,4	521	1,0
	C4	186	4,3	255	-1,0	347	2,2	427	-1,9	499	1,2
	CP2/P2	182	3,3	223	1,0	345	6,5	432	3,0	504	6,1
	CP4	182	3,3	240	0,0	351	4,4	424	0,9	492	3,4
CP6/P6					374	3,9	485	0,1	575	2,3	
PO4/Poz					305	5,7	390	1,9	478	7,0	
P4					374	7,0	464	2,5	527	5,0	
P8/PO8	186	-5,6	289	3,4	353	0,4	415	5,5	510	-1,5	
TP8	185	-2,8	264	0,3	339	-2,5	400	0,7	498	-4,1	
P10	195	-6,8	259	-2,4	351	-8,2	428	-1,7	505	-7,2	

Im Hemisphärenvergleich parietaler Elektrodenpositionen fiel auf, dass die linkshemisphärischen Extrema positivere, bzw. im Falle der Elektroden mit inverser Polarität negativere Werte als die rechtshemisphärischen Extrema aufwiesen. Die Extrema der „kongruenten Aufgabe“ fielen im Mittel positiver bzw. negativer als die der „inkongruenten Aufgabe“ aus. Abbildung 3-6 zeigt anhand des Elektrodenpaars P9 – P10 das typische Verhältnis der Amplituden der Extrema.

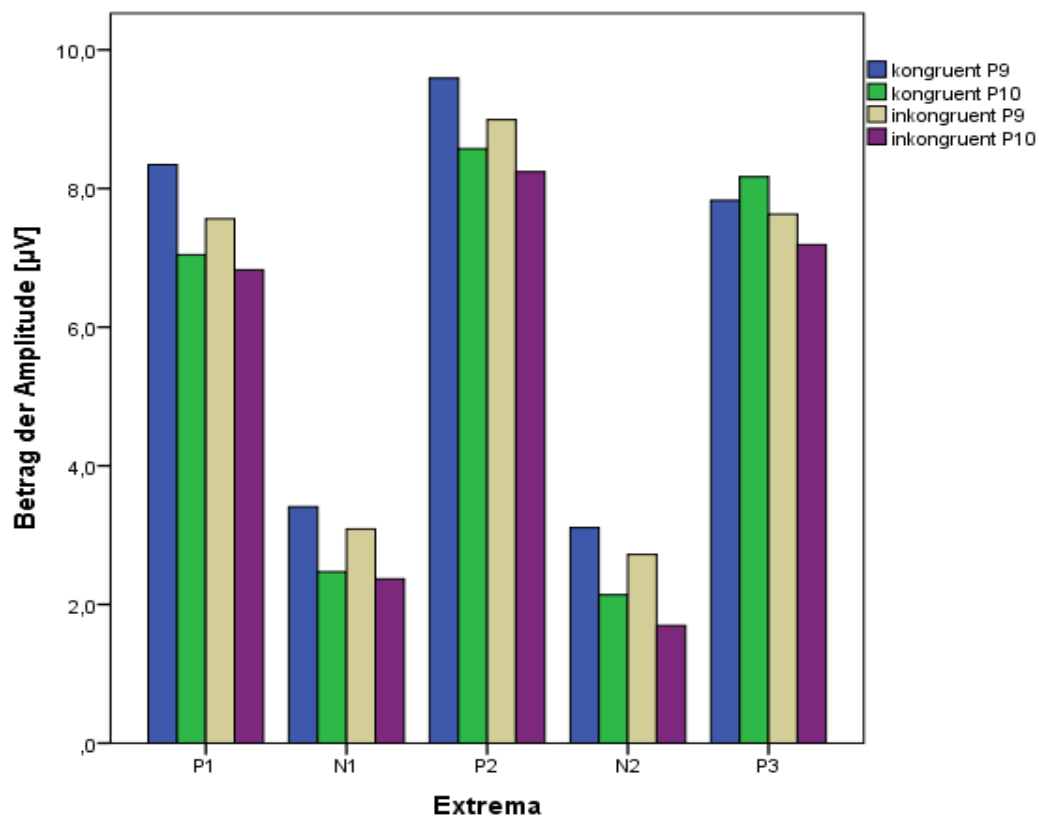


Abbildung 3-6: Balkendiagramm der Aktivität an Elektrode P9 und P10. Auf der X-Achse sind für die „kongruente“ sowie für die „inkongruente Aufgabe“ die fünf an den Elektroden P9 und P10 ermittelten Extrema P1, N1 P2, N2 und P3 dargestellt. Auf der Y-Achse ist der Betrag der Amplitude in μV ($0 \mu\text{V}$ bis $10 \mu\text{V}$) dargestellt. Für die dargestellten Extrema zeigen sich auf einem Signifikanzniveau von 5% sowohl signifikant höhere Amplitudenbeträge der linken Hemisphäre im Vergleich zur rechten Hemisphäre als auch signifikant höhere Amplitudenbeträge der „kongruenten“ im Vergleich zur „inkongruenten Aufgabe“. Lediglich die rechtshemisphärische P3 der „kongruenten Aufgabe“ weist eine höhere Amplitude als die korrespondierende linkshemisphärische P3 auf.

Um die Amplitudendifferenz der Hemisphären zu überprüfen wurde über die Mittelwerte der verschiedenen Extrema ein Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test durchgeführt (Wilcoxon 1945). Die Signifikanz belief sich bei beiden Aufgabentypen auf unter 5%, so dass von einer signifikant positiveren bzw. bei inverser Polarität negativeren Amplitude der linken Hemisphäre auszugehen ist. Auch ein auf einem Signifikanzniveau von 5% durchgeführter Vorzeichentest bestätigte diese Ergebnisse.

Die Amplitudendifferenz der verschiedenen Aufgabentypen wurde ebenfalls mittels Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test analysiert. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen wurden hierfür nicht die Mittelwerte der Extrema, sondern die einzelnen Extrema eines jeden Probanden untersucht. Zwischen der „Aufgabe ohne motorische Reaktion“ und der „kongruenten“ bzw. der „inkongruenten Aufgabe“ zeigte sich kein signifikanter Unterschied. Der Vergleich der „kongruenten“ mit der „inkongruenten Aufgabe“ hingegen erbrachte signifikante Amplitudendifferenzen. Die Signifikanz belief sich auf $<0,0078$, was als Hinweis auf eine positivere bzw. bei den Elektroden mit inverser Polarität negativere, Amplitude der „kongruenten“ im Vergleich zur „inkongruenten Aufgabe“ zu werten ist. Auch diese Ergebnisse bestätigten sich im Vorzeichentest.

Im Gegensatz dazu zeigten sich beim Hemisphärenvergleich motorischer Kortexareale für die „Aufgabe ohne motorische Reaktion“ sowie für die „inkongruente Aufgabe“ sowohl im Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test als auch im Vorzeichentest keine signifikanten Amplitudenunterschiede zwischen den Hemisphären. Bei der „kongruenten Aufgabe“ hingegen fielen auf einem Signifikanzniveau von 5% signifikant negativere Amplituden der linken im Vergleich zur rechten Hemisphäre auf. Die Hemisphärendifferenz der „kongruenten Aufgabe“ wird anhand des Elektrodenpaars C3 – C4 verdeutlicht (*Abbildung 3-7*). Lediglich die an Elektrode C3 gemessene linkshemisphärische P1 ist positiver als die korrespondierende an Elektrode C4 abgeleitete rechtshemisphärische P1.

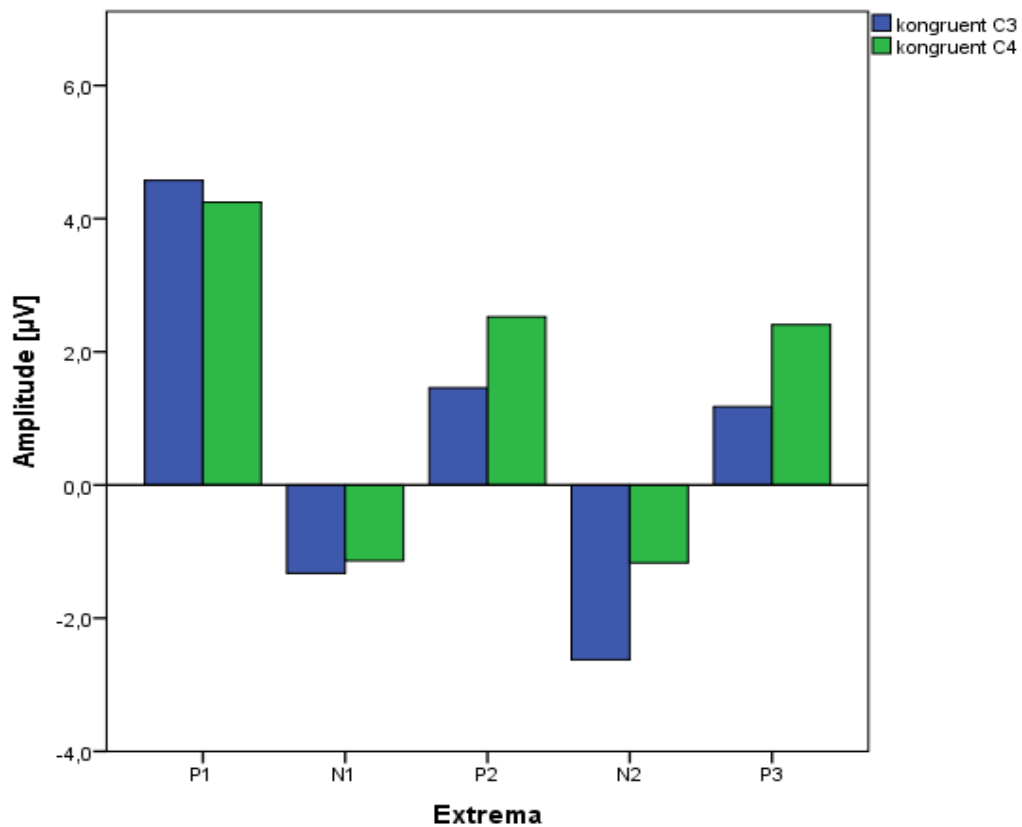


Abbildung 3-7: Balkendiagramm der Aktivität an Elektrode C3 und C4. Auf der X-Achse sind für die „kongruente Aufgabe“ die fünf an Elektrode C3 und C4 gemessenen Extrema P1, N1, P2, N2 und P3 dargestellt. Auf der Y-Achse ist die Amplitude in μV (-4 μV bis 6 μV) dargestellt.

Auch für die motorischen Kortexareale wurde die Amplitudendifferenz der verschiedenen Aufgabentypen untersucht. Konträr zu parietalen Elektrodenpositionen zeigten sich keine signifikanten Amplitudenunterschiede zwischen „kongruenter“ und „inkongruenter Aufgabe“. Die „Aufgabe ohne motorische Reaktion“ jedoch wies sowohl im Vergleich zur „kongruenten“ als auch zur „inkongruenten Aufgabe“ signifikant positivere Amplituden der Extrema auf (*Abbildung 3-8*).

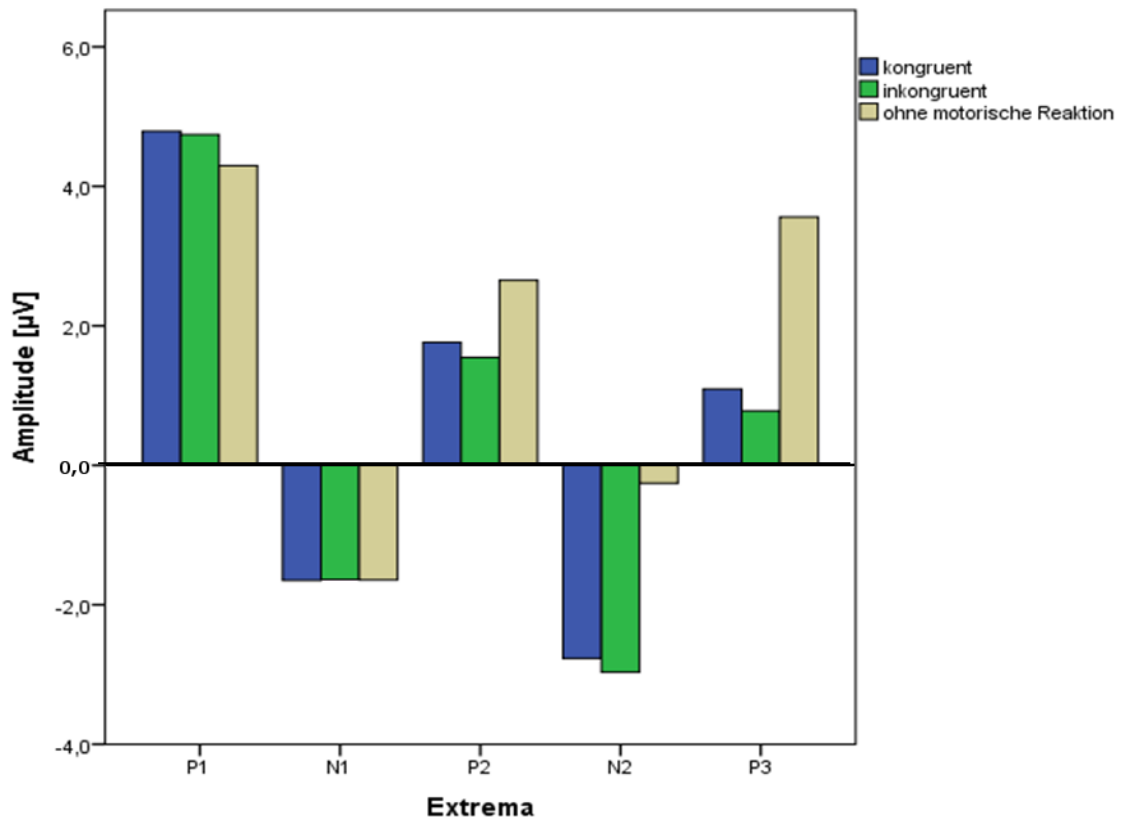


Abbildung 3-8: Balkendiagramm der Amplituden motorischer Kortextareale. Auf der X-Achse sind für die drei verschiedenen Aufgabentypen „kongruente“, „inkongruente Aufgabe“ und „Aufgabe ohne motorische Reaktion“ die fünf Extrema P1, N1, P2, N2 und P3 dargestellt. Auf der Y-Achse ist die Amplitude in μV ($-4 \mu\text{V}$ bis $6 \mu\text{V}$) dargestellt.

Die Hemisphärendifferenz der parietalen Elektrodenpositionen sowie der Amplitudenunterschied der „kongruenten“ und „inkongruenten Aufgabe“ werden durch Abbildung 3-9 deutlich. Das an der linkshemisphärischen Elektrode CP1/P1 gemessene EEG-Muster weist im Vergleich zu dem an der rechtshemisphärischen Elektrode CP2/P2 gemessenen Muster sowohl bei der „kongruenten“ als auch bei der „inkongruenten Aufgabe“ signifikant positivere Amplituden auf. Beim Vergleich der „kongruenten“ mit der „inkongruenten Aufgabe“ zeigen sich in beiden Hemisphären im relevanten Intervall von Stimuluspräsentation bis Tastendruck signifikant positivere Amplituden der „kongruenten Aufgabe“. Im Intervall zwischen Stimuluspräsentation und Tastendruck zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Quartilen.

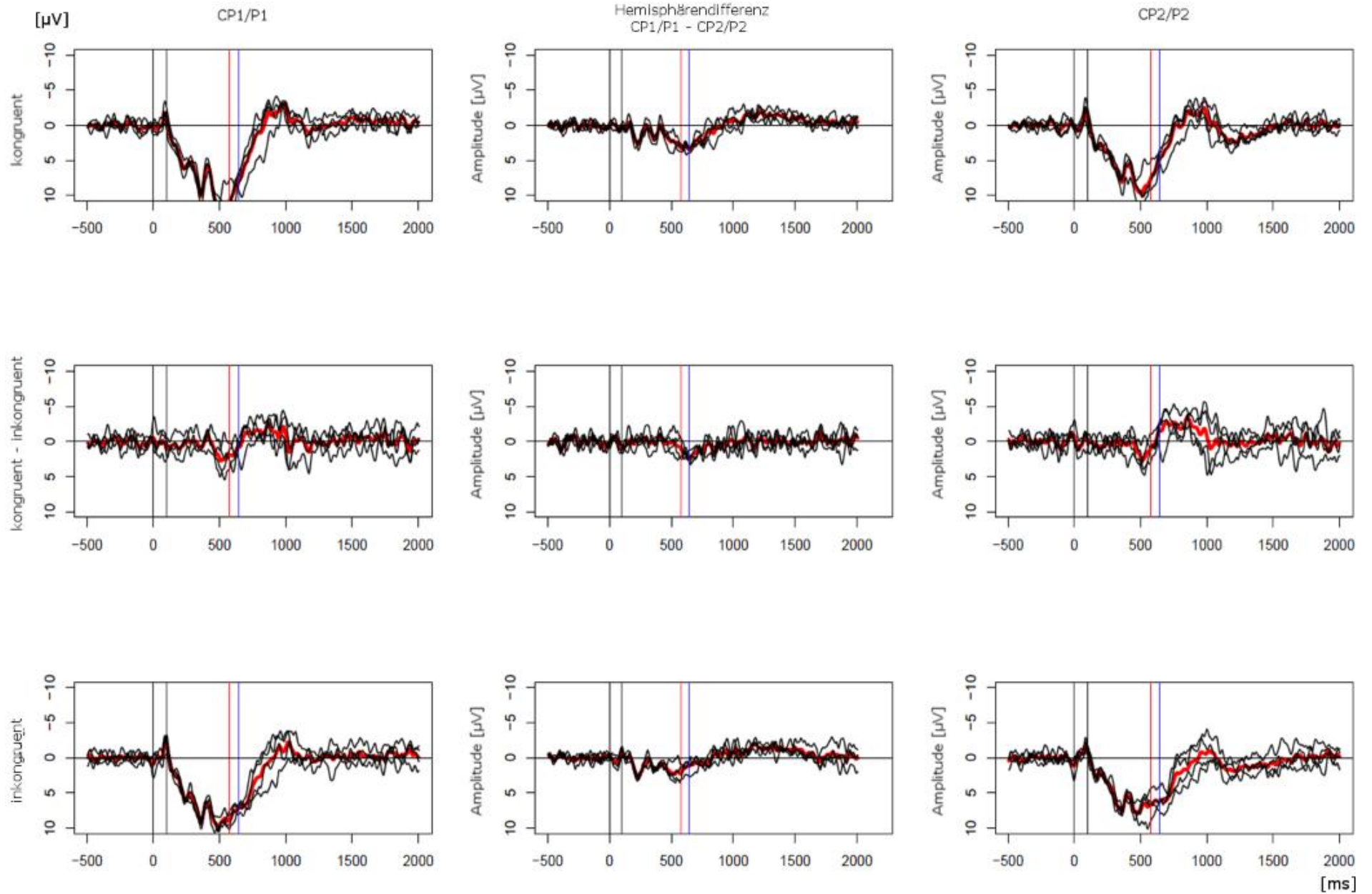


Abbildung 3-9: Quartilmittelwerte der Elektroden CP1/P1 und CP2/P2 des Probanden Ys07. Für jedes Quartil der Reaktionszeit wurde der Mittelwert der hirnelektrischen Aktivität berechnet. Die vier Quartile sind in schwarz, der Mittelwert ist in rot dargestellt. In der ersten Zeile ist für die „kongruente Aufgabe“ die elektrophysiologische Aktivität der Elektroden CP1/P1 und CP2/P2 dargestellt. Die mittlere Kolumne zeigt die Hemisphärendifferenz. In der 3. Zeile ist die Aktivität während der „inkongruenten Aufgabe“ sowie erneut die Hemisphärendifferenz aufgetragen. In der zweiten Zeile sind die jeweiligen Differenzen zwischen „kongruenter“ und „inkongruenter Aufgabe“ sowie mittig die Hemisphärendifferenz in Kombination mit der Differenz der Aufgabentypen zu sehen. Die erste vertikale, schwarze Linie markiert den Zeitpunkt der Stimuluspräsentation, die zweite Linie befindet sich 150ms nach Stimuluspräsentation. Die vertikale, rote Linie repräsentiert den Zeitpunkt des Tastendrucks der „kongruenten“, die blaue Linie den der „inkongruenten Aufgabe“. Die Y-Achsen sind auf $-10 \mu\text{V}$ bis $10 \mu\text{V}$ und die X-Achsen auf -500 ms bis 2000 ms skaliert.

Am Beispiel der Elektroden FC3 – FC4 des Probanden Ys07 wird für den Motorkortex die beobachtete Hemisphärendifferenz der „kongruenten Aufgabe“ sowie die Ähnlichkeit der „kongruenten“ und „inkongruenten Aufgabe“ bezüglich der Amplitude veranschaulicht (Abbildung 3-10). Das bei der „kongruenten Aufgabe“ an der linkshemisphärischen Elektrode FC3 gemessene Muster weist im Vergleich zu dem an der rechtshemisphärischen Elektrode FC4 gemessenen Muster signifikant negativere Amplituden auf. Bei der „inkongruenten Aufgabe“ hingegen zeigt sich keine signifikante Hemisphärendifferenz. Die Differenz aus „kongruenter“ und „inkongruenter Aufgabe“ weist ebenfalls lediglich Schwankungen um die Nulllinie, die sich auf einem Signifikanzniveau von 5% als nicht signifikant erwiesen, auf.

Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 verdeutlichen zudem am Beispiel des Probanden Ys07 die vergleichbare hirnelektrische Aktivität der Quartile motorischer sowie parietaler Kortexareale. Um auszuschließen, dass die EEG-Muster in Abhängigkeit von der Reaktionszeit der Probanden differieren, wurden für jeden Probanden und jedes Quartil der Reaktionszeit die Elektrodenmittelwerte berechnet und miteinander verglichen. Im Intervall zwischen Stimuluspräsentation und Tastendruck zeigten sich zwischen den Quartilen keine signifikanten Unterschiede, so dass davon auszugehen ist, dass sich das EEG-Muster nicht reaktionszeitabhängig verändert. Erst nach dem Tastendruck zeigte sich eine Diskrepanz der Quartile. Dieser Bereich spielt für den Entscheidungsprozess jedoch keine Rolle mehr.

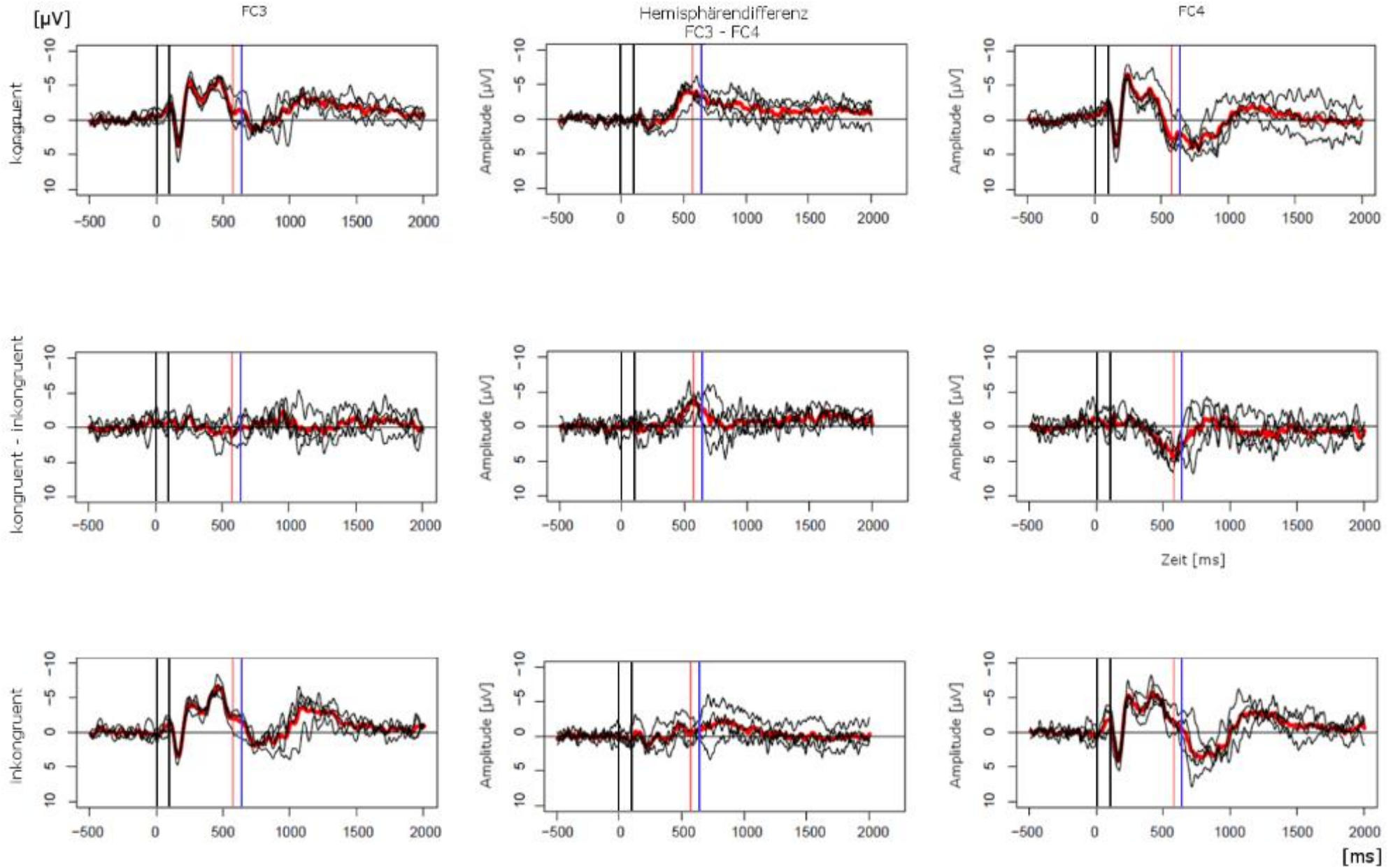


Abbildung 3-10: Quartilmittelwert der Elektroden C3 und C4 des Probanden Ys07.
Erklärung siehe Beschreibung der Abbildung 3-9.

3.2.3 Auf den Tastendruck ausgerichtete ereigniskorrelierte Potentiale des Motorkortex

Auch für die auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte der **rein motorischen** Aufgabe kristallisierte sich im Motorkortex ein charakteristisches Muster heraus (*Abbildung 3-11.A*). Während einer Bewegung der rechten Hand zeigte sich in der dominanten, linken Hemisphäre eine Abfolge von drei Extrema. Ersteres, eine Positivität ($P1_M$), erfolgte ca. 100 ms vor Tastendruck (*Abbildung 3-4*). Anschließend folgte, in etwa zum Zeitpunkt des Tastendrucks, eine Negativität ($N1_M$), an die sich ca. 90 ms nach Tastendruck eine neuerliche Positivität ($P2_M$) anschloss. Die maximale Amplitude der $P2_M$ wurde an Elektrode FC1/C1 gemessen. Die Extrema konnten am frühesten an Elektrode C3 und zuletzt an Elektrode FC3 abgeleitet werden. In der nicht-dominanten, rechten Hemisphäre zeigte sich eine entsprechende Abfolge. Die Extrema wiesen jedoch deutlich positivere Werte auf. Bei Bewegung der linken Hand zeigte sich in der nicht-dominanten, rechten Hemisphäre eine ähnliche Abfolge von $P1_M$ - $N1_M$ - $P2_M$. Die $P1_M$ erfolgte ca. 75 ms vor, die $N1_M$ ca. 10 ms vor und die $P2_M$ ca. 80 ms nach Tastendruck. Wie bei Bewegung der rechten Hand konnten die $N1_M$ sowie die $P2_M$ in der kontralateral zur Handbewegung gelegenen Hemisphäre am frühesten an Elektrode C4 und zuletzt an Elektrode FC4 abgeleitet werden. Die $P1_M$ hingegen trat bei allen drei Elektroden in etwa zum gleichen Zeitpunkt auf. Auch in der dominanten Hemisphäre war eine entsprechende Abfolge der Extrema zu erkennen. Wiederum wies die ipsilateral zur Handbewegung gelegene Hemisphäre deutlich positivere Amplituden auf. Die an einer Elektrode bestimmten Extrema traten unabhängig von der bewegten Hand in etwa zum gleichen Zeitpunkt auf. Lediglich die $P1_M$ während einer Bewegung der linken Hand erfolgte in beiden Hemisphären signifikant später als die in selbiger Hemisphäre auftretende $P1_M$.

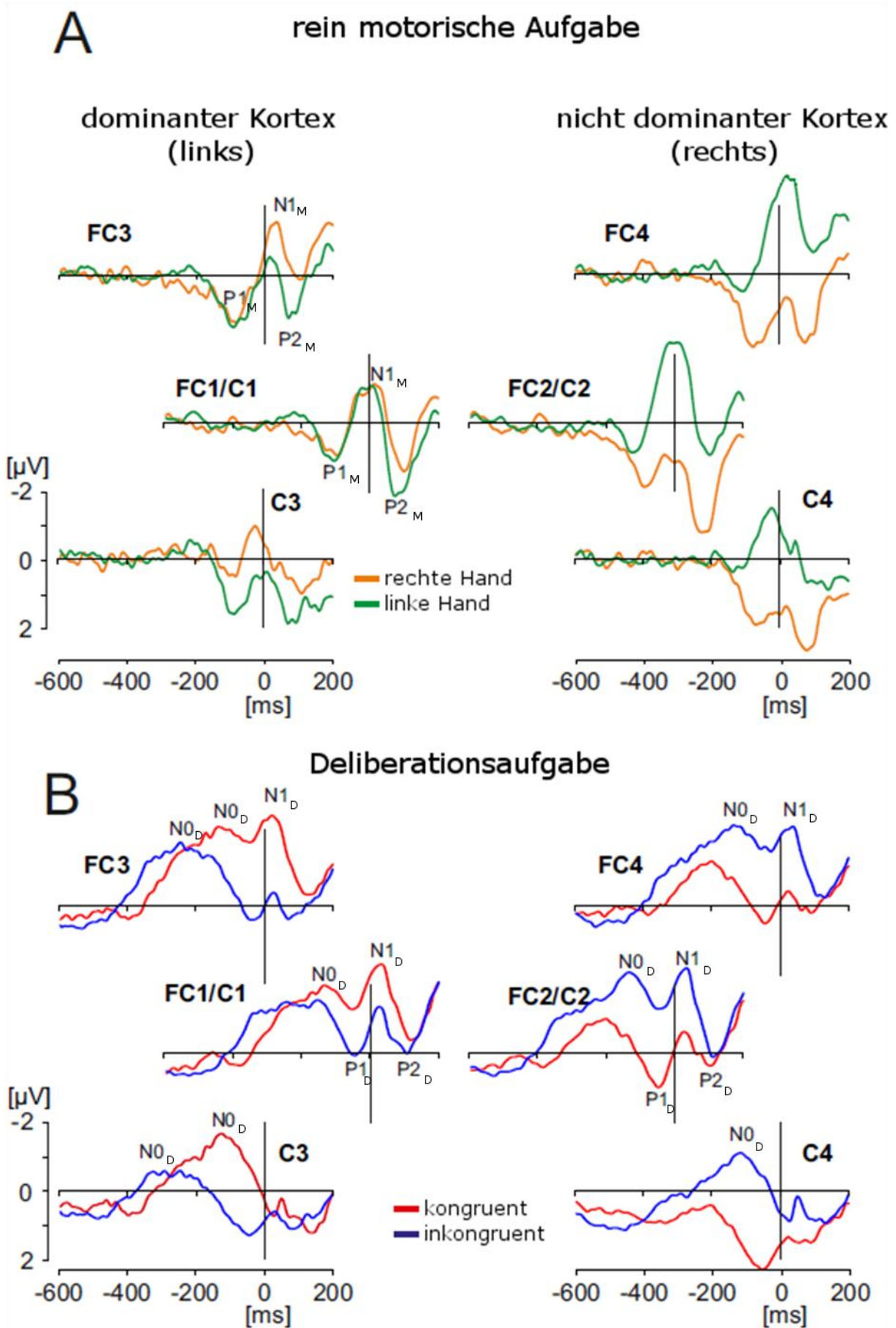


Abbildung 3-11: Auf den Tastendruck ausgerichtete Amplitudenmittelwerte des Motorkortex. A: Es sind die auf den Tastendruck ausgerichteten Amplitudenmittelwerte der **rein motorischen** Aufgabe dargestellt. Die EEG-Aktivität während einer Bewegung der rechten Hand ist in orange, die EEG-Aktivität während einer Bewegung der linken Hand ist in grün abgebildet. Es zeigt sich eine charakteristische Abfolge von drei Extrema. Auf eine initiale Positivität $P1_M$ folgt in etwa zum Zeitpunkt des Tastendrucks eine Negativität $N1_M$ an die sich eine zweite Positivität $P2_M$ anschließt. **B:** Abgebildet sind die auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte der **Deliberationsaufgabe**. Die EEG-Aktivität während einer Bewegung der rechten Hand ist in rot, die EEG-Aktivität während einer Bewegung der linken Hand ist in blau dargestellt. Während der Deliberationsaufgabe zeigt sich eine der rein motorischen Aufgabe entsprechende Abfolge von $P1_D, N1_D$ und $P2_D$ der ein steiles Extremum (N0) am Ende einer lang anhaltenden, stetig zunehmenden Negativität vorausgeht. Bei beiden Abbildungen ist auf der Y-Achse die Amplitude in μV ($-4 \mu V$ bis $4 \mu V$) und auf der X-Achse die Zeit in ms aufgetragen (-500 ms bis 200 ms). Die vertikale, schwarze Linie markiert den Zeitpunkt 0 des Tastendrucks.

Tabelle 3-4: Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte der rein motorischen sowie der Deliberationsaufgabe. Im oberen Teil der Tabelle sind für die linkshemisphärischen Elektroden C3, FC3 und FC1/C1 sowie für die rechtshemisphärischen Elektroden C4, FC4 und C2/C2 des Motorkortex die ermittelten Werte der Extrema während der rein motorischen Aufgabe dargestellt. Für die definierten Extrema P1, N1 und P2 sind Latenz und Amplitude samt Standardabweichung abgebildet. Der untere Teil der Tabelle zeigt die entsprechenden Werte der Deliberationsaufgabe, zudem Latenz und Amplitude der N0 sowie den Beginn der, in N0 terminierenden, Negativität. Die, neben der am linken Rand aufgeführten Aufgabenstellung (linke/rechte Hand bzw. „kongruente/inkongruente Aufgabe“) in Klammern angegebene Farbe bezieht sich auf die Darstellung in Abbildung 3-11. Alle Latenzen sind in ms angegeben und sind auf den Zeitpunkt des Tastendrucks bezogen. Die Amplitude ist in μV angegeben. Die in dieser Tabelle dargestellten, numerischen Werte müssen nicht zwingend mit den in Abbildung 3-11 abgebildeten Extrema übereinstimmen.

		P1 _M		N1 _M		P2 _M	
Elektrode		[ms]	[μ V]	[ms]	[μ V]	[ms]	[μ V]
rechte Hand (orange)	C3	-107,8 \pm 1,6	1,6 \pm 0,1	-22,8 \pm 1,8	-2,3 \pm 0,1	85,0 \pm 2,0	2,5 \pm 0,1
	FC3	-89,2 \pm 1,8	2,7 \pm 0,1	13,4 \pm 1,3	-2,6 \pm 0,1	93,0 \pm 1,6	1,3 \pm 0,1
	FC1/C1	-106,4 \pm 2,0	2,1 \pm 0,1	-9,0 \pm 1,6	-3,0 \pm 0,1	89,4 \pm 1,8	2,9 \pm 0,2
	C4	-82,0 \pm 1,3	3,0 \pm 0,1	-7,0 \pm 1,5	0,1 \pm 0,1	71,8 \pm 1,3	3,8 \pm 0,1
	FC4	-82,8 \pm 1,5	3,2 \pm 0,1	0,0 \pm 1,6	-0,8 \pm 0,1	69,2 \pm 1,2	3,1 \pm 0,2
	FC2/C2	-91,2 \pm 1,8	3,2 \pm 0,1	-12,6 \pm 1,7	-1,0 \pm 0,1	83,6 \pm 1,7	4,9 \pm 0,2
linke Hand (grün)	C3	-69,6 \pm 0,7	4,1 \pm 0,1	-6,0 \pm 0,7	-1,0 \pm 0,1	74,0 \pm 0,8	3,0 \pm 0,1
	FC3	-71,4 \pm 0,7	3,7 \pm 0,1	0,2 \pm 1,1	-1,8 \pm 0,1	75,8 \pm 1,0	2,5 \pm 0,1
	FC2/C2	-72,6 \pm 0,7	3,5 \pm 0,1	-9,4 \pm 0,8	-2,6 \pm 0,1	76,4 \pm 0,7	3,4 \pm 0,1
	C4	-74,0 \pm 0,6	2,0 \pm 0,1	-16,0 \pm 0,6	-3,3 \pm 0,1	75,2 \pm 1,0	2,0 \pm 0,1
	FC4	-72,8 \pm 0,7	2,4 \pm 0,1	-4,2 \pm 0,8	-4,3 \pm 0,1	81,2 \pm 0,9	0,6 \pm 0,1
	FC2/C2	-75,6 \pm 0,7	2,8 \pm 0,1	-10,8 \pm 0,7	-4,1 \pm 0,1	80,6 \pm 1,0	2,3 \pm 0,1

		Beginn	N0		P1 _D		N1 _D		P2 _D	
Elektrode		[ms]	[ms]	[μ V]	[ms]	[μ V]	[ms]	[μ V]	[ms]	[μ V]
kongruent (rot)	C3	-292,0 \pm 17,9	85,4 \pm 7,3	-1,8 \pm 0,6	2,8 \pm 1,4	0,8 \pm 0,1	45,6 \pm 1,6	-0,4 \pm 0,1	125,4 \pm 1,6	1,7 \pm 0,1
	FC3	-297,4 \pm 15,8	-111,2 \pm 7,9	-2,9 \pm 0,5	-49,8 \pm 0,9	-1,4 \pm 0,1	20,8 \pm 0,9	-3,2 \pm 0,1	118,6 \pm 1,2	0,2 \pm 0,1
	FC1/C1	-261,4 \pm 16,2	-142,4 \pm 9,6	-2,3 \pm 0,8	-54,2 \pm 1,5	-0,7 \pm 4,5	28,8 \pm 0,9	-3,1 \pm 0,2	113,6 \pm 1,2	0,1 \pm 0,2
	C4	-248,9 \pm 17,8	-186,6 \pm 7,9	0,1 \pm 0,4	-65,8 \pm 1,3	2,7 \pm 0,1	32,0 \pm 1,5	0,9 \pm 0,1	96,0 \pm 1,4	2,0 \pm 0,1
	FC4	-227,7 \pm 14,0	-167,4 \pm 8,7	-1,4 \pm 0,6	-49,6 \pm 1,2	0,9 \pm 0,1	38,4 \pm 2,2	-1,1 \pm 0,1	103,8 \pm 1,7	0,5 \pm 0,2
	FC2/C2	-224,6 \pm 15,5	-200,4 \pm 11,5	-1,6 \pm 0,7	-52,2 \pm 1,0	1,4 \pm 0,1	31,2 \pm 1,1	-1,0 \pm 0,1	96,8 \pm 1,1	0,9 \pm 0,1
inkongruent (blau)	C3	-260,6 \pm 17,4	-173,6 \pm 10,4	-0,6 \pm 0,5	-48,0 \pm 1,5	1,8 \pm 0,1	25,0 \pm 1,4	0,2 \pm 0,1	97,4 \pm 1,7	1,7 \pm 0,1
	FC3	-314,6 \pm 21,4	-164,4 \pm 11,0	-2,1 \pm 0,5	-41,0 \pm 1,4	0,9 \pm 0,1	26,6 \pm 1,3	-0,7 \pm 0,1	103,8 \pm 1,5	1,0 \pm 0,1
	FC2/C2	-285,6 \pm 22,5	-157,4 \pm 10,4	-2,2 \pm 0,8	-41,6 \pm 1,1	0,6 \pm 0,1	37,4 \pm 1,1	-1,7 \pm 0,1	114,4 \pm 1,4	0,6 \pm 0,1
	C4	-307,4 \pm 16,8	-88,8 \pm 8,1	-1,5 \pm 0,5	18,2 \pm 1,0	1,2 \pm 0,1	62,8 \pm 1,0	-0,3 \pm 0,1	122,2 \pm 1,3	1,5 \pm 0,1
	FC4	-323,5 \pm 19,1	-138,6 \pm 10,0	-2,7 \pm 0,4	-47,0 \pm 1,7	-1,0 \pm 0,1	31,2 \pm 1,6	-3,0 \pm 0,1	127,2 \pm 1,4	0,4 \pm 0,1
	FC2/C2	-301,0 \pm 21,8	-125,8 \pm 0,3	-3,0 \pm 0,7	-38,6 \pm 1,4	-0,7 \pm 0,1	32,4 \pm 1,9	-2,9 \pm 0,2	121,6 \pm 1,3	0,6 \pm 0,1

während einer Bewegung der rechten Hand. Die kontralateral zur bewegten Hand gemessene Aktivität wies zudem regelhaft negativere Werte als die in selbiger Hemisphäre gemessene Aktivität während einer Bewegung der ipsilateralen Hand auf, wobei die Diskrepanz in der rechten Hemisphäre deutlich größer als in der Linken ausfiel.

Bei der **Deliberationsaufgabe** fiel ein etwas von der rein motorischen Aufgabe abweichendes EEG-Muster auf. Es zeigte sich eine Abfolge von vier Extrema (*Abbildung 3-11.B*). Ersteres (N0) präsentierte sich am Ende einer lang anhaltenden und stetig zunehmenden Negativität.

Diese begann bei der „kongruenten Aufgabe“ ca. 410 ms vor Tastendruck (*Tabelle 3-4*) und erfolgte in der dominanten Hemisphäre etwas früher als in der nicht-dominanten. Das Verfahren zur Bestimmung des Beginns, der in N0 terminierenden Negativität ist in *Abbildung 3-12* dargestellt. Der Beginn der Negativität wurde durch ein Regressionsmodell berechnet. Das Zeitfenster zwischen dem Beginn des Stimulus und der N0 wurde in zwei Intervalle mit einer minimalen Länge von 50ms geteilt. Für beide Zeitintervalle wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Der Beginn der stetig zunehmenden Negativierung wurde durch die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und wurde als der Zeitpunkt definiert an dem die Residuen beider Regressionsgeraden einen minimalen Wert aufwiesen (Meindl et al. 2011).

Während der „kongruenten Aufgabe“ konnte die N0 in der **dominanten** Hemisphäre am frühesten an Elektrode FC1/C1 abgeleitet werden. Sie erfolgte ca. 140 ms vor Tastendruck (*Tabelle 3-4*). Nach weiteren 30 ms erfolgte die an Elektrode FC3 gemessene N0 und ca. 80 ms vor Tastendruck die an Elektrode C3 gemessene N0. An die N0 schloss sich ca. 50 ms vor Tastendruck eine Positivität (P1_D) an. Kurz nach dem Tastendruck folgte eine neuerliche Negativität (N1_D). Sie trat etwas später als die, während der rein motorischen Aufgabe ermittelte, N1_M auf. An die N1_D schloss sich, ca. 120 ms nach Tastendruck, eine zweite Positivität (P2_D) an. Diese trat ca. 30 ms später als die P2_M auf. Neben einer spät auftretenden

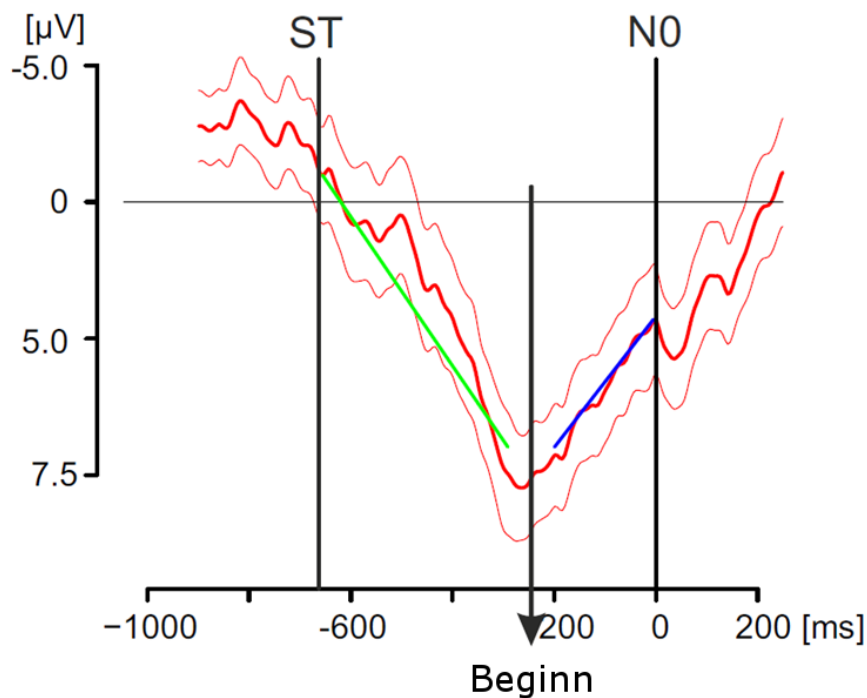


Abbildung 3-12: Bestimmung des Beginns der in N0 terminierenden Negativität am Beispiel von Elektrode C3. Dargestellt ist der an Elektrode C3 ermittelte und auf N0 ausgerichtete Mittelwert (dicke, rote Linie) des Probanden Ys09 während der „kongruenten Aufgabe“ sowie das 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts (dünne, rote Linien). Die Regressionsgeraden zur Ermittlung von N0 sind als grüne bzw. blaue Linie dargestellt. Auf der Y-Achse ist die Amplitude in μV ($-5 \mu\text{V}$ bis $7,5 \mu\text{V}$) und auf der X-Achse die Zeit in ms (-1000 ms bis 200 ms) aufgetragen.

N0 fiel an der an Elektrode C3 gemessenen hirnelektrischen Aktivität ein verzögertes Auftreten der P1_D auf. Sie erfolgte kurz nach dem Tastendruck. In der **nicht-dominanten** Hemisphäre zeigte sich während der „kongruenten Aufgabe“ eine entsprechende Abfolge der Extrema. Sie erfolgten jedoch etwas früher als in der dominanten Hemisphäre, vor allem die N0. Zudem wurde an Elektrode C4 kein verspätetes Auftreten der Extrema gemessen. Entsprechend der rein motorischen Aufgabe zeigten sich im nicht dominanten Kortex deutlich positivere Amplitudenwerte.

Bei der „inkongruenten Aufgabe“ zeigte sich eine entsprechende Abfolge der Extrema (Tabelle 3-4). Lediglich der Beginn, der in N0 terminierenden Negativität, setzte in der

dominanten Hemisphäre ca. 528 ms vor Tastendruck und in der nicht-dominanten Hemisphäre ca. 490 ms vor Tastendruck ein. Sie erfolgte somit ca. 90 ms früher als bei der „kongruenten Aufgabe“. Entsprechend der „kongruenten Aufgabe“ zeigte sich für das an Elektrode C4 abgeleitete EEG-Muster ein verzögertes Auftreten von N0 und P1_D. In der ipsilateral zur Handbewegung gelegenen Hemisphäre erfolgten die Extrema etwas früher. Des Weiteren zeigten sich hier deutlich positivere Kurvenverläufe.

Die an den Elektroden FC3, FC1/C1, FC4 und FC2/C2 gemessenen Extrema P1_D-N1_D-P2_D traten unabhängig von der bewegten Hand in etwa zum gleichen Zeitpunkt auf. Bei Elektrode C3 hingegen fiel auf, dass die gemessenen Extrema bei Bewegung der kontralateralen Hand im Vergleich zur Bewegung der ipsilateralen Hand ca. 30 ms später einsetzten. Entsprechendes gilt für Elektrode C4 der Gegenseite. An allen Elektroden wurde in der kontralateral zu bewegten Hand gelegenen Hemisphäre ein verzögertes Auftreten der N0 gemessen. Zudem wies, wie bei der rein motorischen Aufgabe, die kontralateral zur Handbewegung gemessene Aktivität signifikant negativere Amplitudenwerte als die in selbiger Hemisphäre gemessene Aktivität bei Bewegung der ipsilateralen Hand auf. Die Diskrepanz zwischen den Kurvenverläufen fiel im nicht dominanten Kortex deutlich höher aus (*Abbildung 3.11.B*).

Die Interpeak-Intervalle P1_{M/D}-N1_{M/D} bzw. N1_{M/D}-P2_{M/D} der rein motorischen Aufgabe sowie der Deliberationsaufgabe erwiesen sich als nicht signifikant unterschiedlich. Das P1_{M/D}-N1_{M/D} Intervall betrug bei der rein motorischen Aufgabe $75,9 \pm 13,9$ ms und bei der Deliberationsaufgabe $73,3 \pm 16,2$ ms. Das N1_{M/D}-P2_{M/D} Intervall belief sich auf $86,6 \pm 10,9$ ms bei der rein motorischen Aufgabe und $77,4 \pm 12,7$ ms bei der Deliberationsaufgabe.

Da die N0-Komponente lediglich während der Deliberationsaufgabe zu beobachten war, wurde sie ausführlicher analysiert. Hierzu wurden die Mittelwerte der „kongruenten“ und „inkongruenten Aufgabe“ auf den Zeitpunkt der N0 ausgerichtet (*Abbildung 3-13*).

Unabhängig von Elektrodenposition oder Aufgabenstellung zeigte sich ein steiler Anstieg am Ende einer lang anhaltenden, stetig zunehmenden Negativität. Aufgrund der starken Streuung der N0-Zeitpunkte sind die Komponenten P1_D, N1_D und P2_D in Abbildung 3-13 weniger ausgeprägt als in Abbildung 3-11. Dennoch sind sie, insbesondere an Elektrode FC1/C1, gut zu erkennen. Die zeitliche Streuung der N0 zeigt sich in Abbildung 3-13 indirekt durch die, in Form eines farbigen Rechtecks dargestellten, Standardabweichung des Tastendrucks.

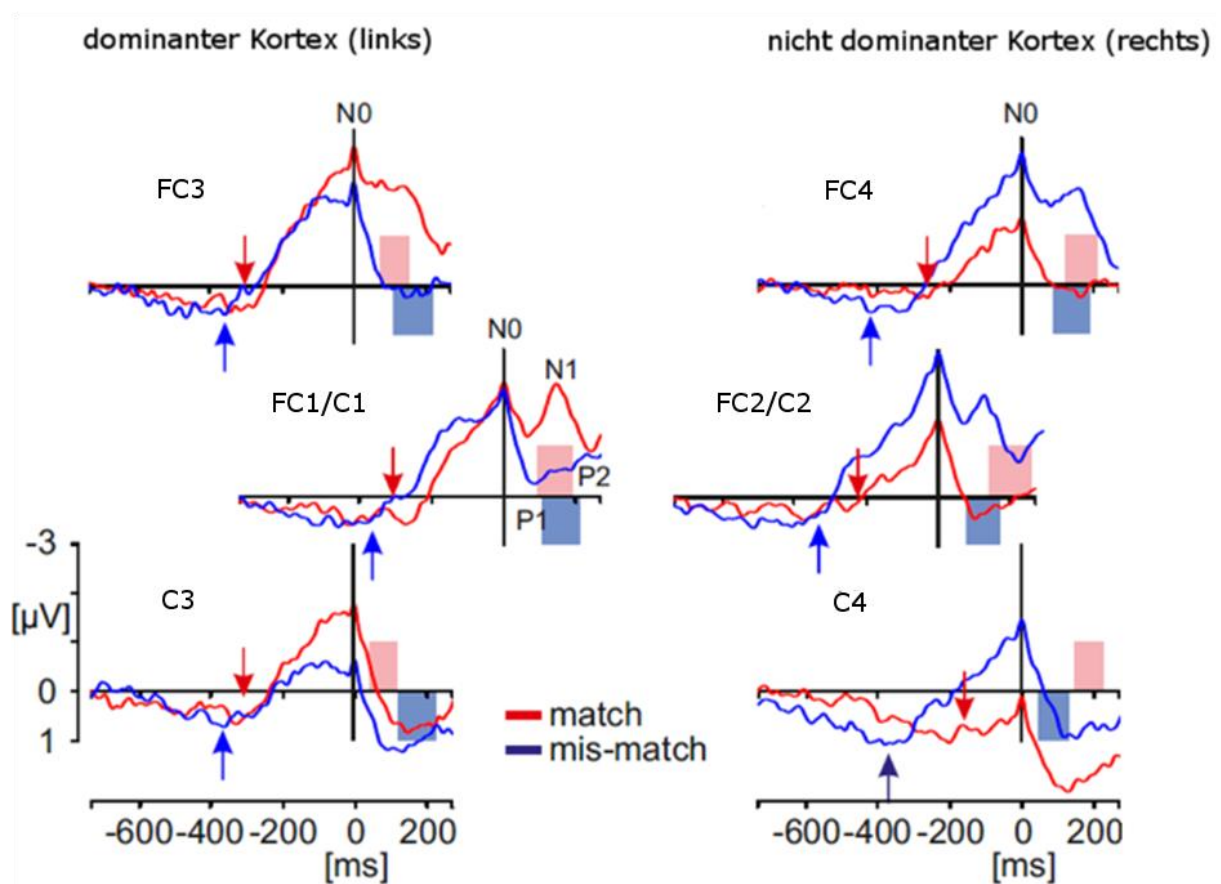


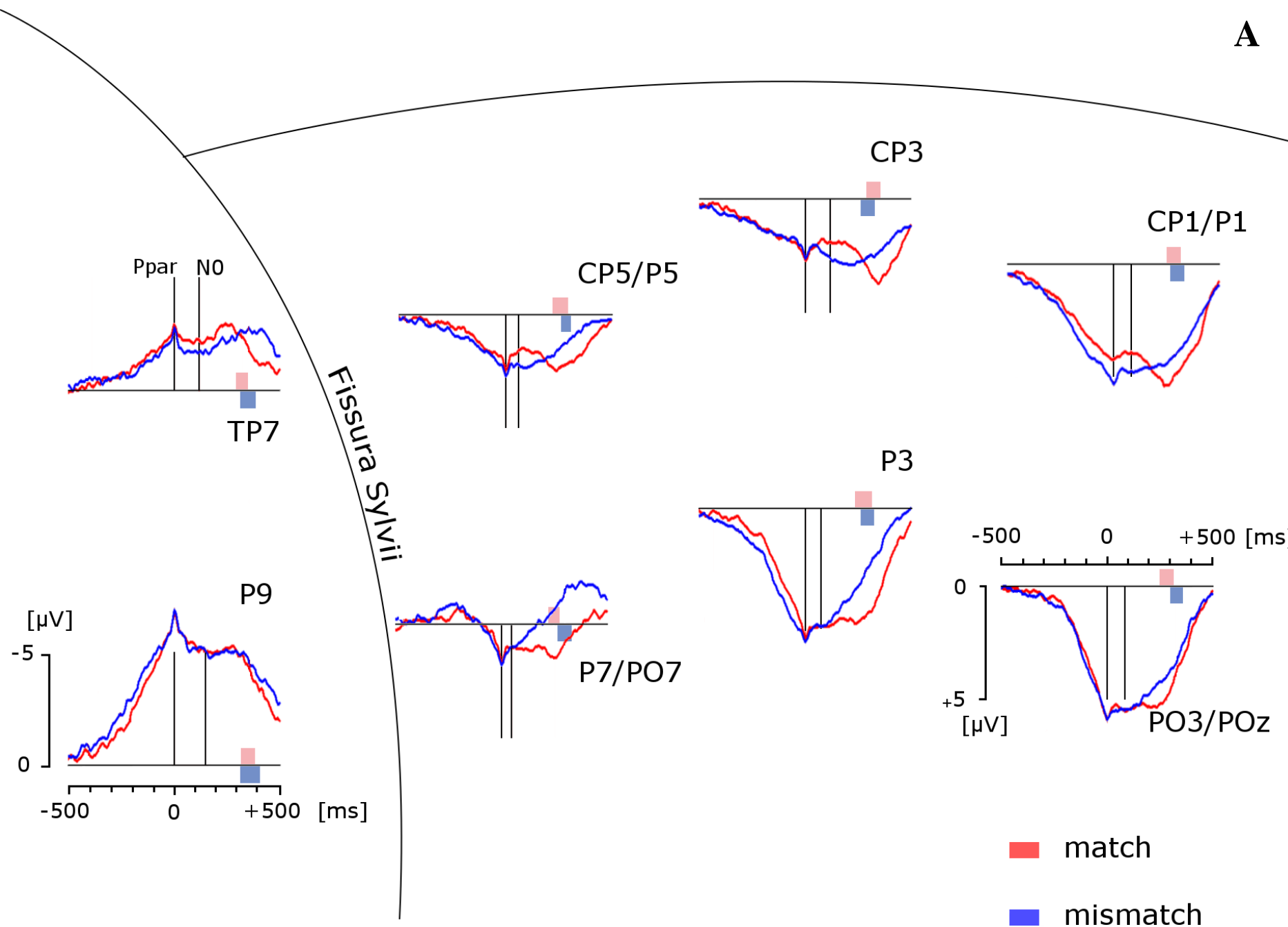
Abbildung 3-13: N0 ausgerichtete Gesamtmittelwerte während der Deliberationsaufgabe. Es sind die auf N0 ausgerichteten Gesamtmittelwerte des Motorkortex dargestellt. Die EEG-Aktivität während der „kongruenten Aufgabe“ ist in rot, die der „inkongruenten Aufgabe“ in blau abgebildet. Die N0 präsentiert sich als steiles Extremum am Ende einer stetig zunehmenden Negativität. Im Vergleich zu Abbildung 3-11 ist die P1_D-N1_D-P2_D Komponente in dieser Abbildung weniger ausgeprägt. Die rosa und blauen Rechtecke repräsentieren die zeitlichen Standardabweichungen des Tastendrucks und sind somit ein indirektes Maß für die Streuung der N0. Mittels blauer und roter Pfeile ist der Startpunkt der in N0 resultierenden Negativität gekennzeichnet. Es zeigt sich eine deutlich kürzere Deliberationsdauer der „kongruenten Aufgabe“ im Vergleich zur „inkongruenten Aufgabe“. Auf der X-Achse ist die Zeit in ms (-750 ms bis 250 ms) und auf der Y-Achse die Amplitude in µV (-3 µV bis 1 µV) dargestellt.

3.2.4 Auf den Tastendruck ausgerichtete ereigniskorrelierte Potentiale des

Parietalkortex

Bei der Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte des Parietalkortex zeigte sich eine Abfolge von drei Extrema. Zunächst erfolgte eine lang anhaltende, stetig zunehmende Positivierung (*Abbildung 3-14*). Der Beginn besagter Positivierung erfolgte während der „kongruenten Aufgabe“ ca. 510 ms und während der „inkongruenten Aufgabe“ ca. 550 ms vor Tastendruck. Sie endete in einem, im Mittel ca. 300 ms vor Tastendruck liegendem, Extremum (P_{Par} , parietale Positivität), wobei das Extremum bei der „inkongruenten Aufgabe“ etwas früher als bei der „kongruenten Aufgabe“ erfolgte. Da sich zwischen der Darstellung der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte und der auf die P_{Par} ausgerichteten Mittelwerte bis auf die Verschiebung der Zeitskalen keine wesentlichen Unterschiede ergeben haben und die Extrema bei Ausrichtung auf die P_{Par} etwas deutlicher zu erkennen sind, ist im Folgenden nur diese Form der Darstellung abgebildet (*Abbildung 3-14*). Die Dauer bis zum Erreichen der P_{Par} belief sich bei der „kongruenten Aufgabe“ auf ca. 210 ms und bei der „inkongruenten Aufgabe“ auf ca. 240 ms. Wie beim auf den Stimulus ausgerichteten Mittelwert, wiesen die Elektrodenpaare TP7-TP8 und P9-P10 eine Potentialumkehr auf. Statt einer Positivität war hier also eine Negativität zu beobachten. Sowohl bei der „kongruenten“ als auch bei der „inkongruenten Aufgabe“ wurde die P_{Par} am frühesten an den Elektrodenpaaren TP7 – TP8 und P9 – P10 gemessen. An Elektrodenpaar P7PO7 – P8/PO8 wurde sie zuletzt gemessen. Lediglich die dominante Hemisphäre stellte bei der „inkongruenten Aufgabe“ eine Ausnahme dar. Hier wurde die P_{Par} zuletzt an Elektrodenpaar CP5/P5 – CP6/P6 gemessen. An die P_{Par} schloss sich eine relative Negativität bzw. im Falle der Elektrodenpaare TP7 – TP8 und P9 – P10 eine relative Positivität an. Sie erfolgte im Schnitt ca. 140 ms vor Tastendruck und somit in etwa zum Zeitpunkt der im Motorkortex bestimmten N_0 und wird hier daher als $N_{0\text{Par}}$ bezeichnet.

A



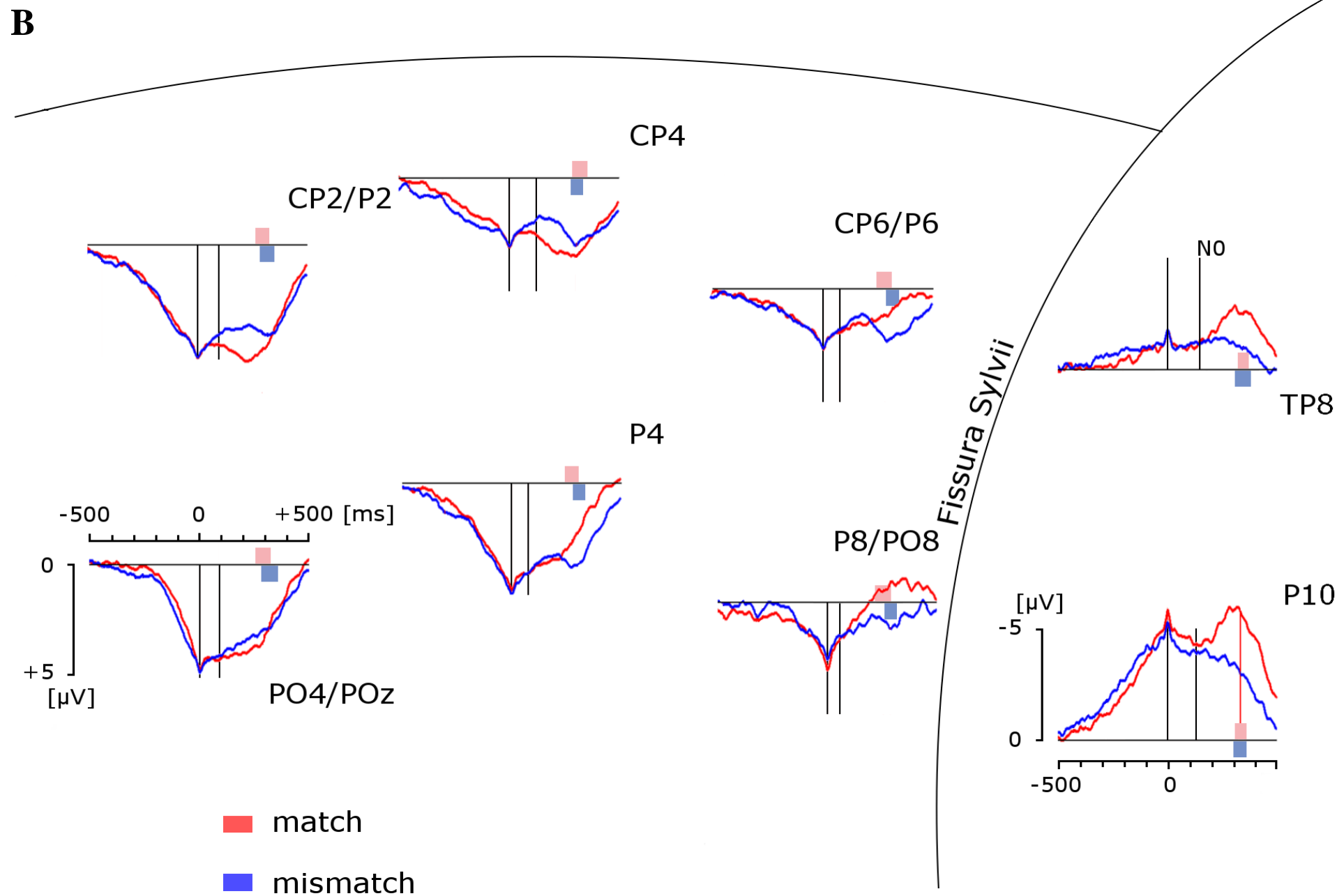


Abbildung 3-14: Auf die P_{Par} ausgerichtete Mittelwerte des Parietalkortex. Dargestellt sind die auf die P_{Par} ausgerichteten Mittelwerte des Parietalkortex während der Deliberationsaufgabe. Abbildung A zeigt die linke Hemisphäre, Abbildung B die rechte Hemisphäre. Die EEG-Aktivität während der „kongruenten Aufgabe“ ist in rot, die der „inkongruenten Aufgabe“ in blau dargestellt. Die erste schwarze Linie stellt den Zeitpunkt 0, also den Zeitpunkt der P_{Par} dar. Die zweite schwarze Linie repräsentiert den Zeitpunkt der frühesten im Motorkortex bestimmten $N0$. Die rosa und blauen Rechtecke repräsentieren die zeitlichen Standardabweichungen des Tastendrucks. Die Elektroden TP7 und P9 bzw. TP8 und P10 sind aufgrund ihrer gegenläufigen Polarität durch eine schwarze Linie graphisch von den restlichen Elektroden getrennt abgebildet. Auf der X-Achse ist die Zeit in ms (-500 ms bis +500 ms) und auf der Y-Achse die Amplitude in μV (-5 μV bis 5 μV) aufgetragen.

Wie die P_{Par} wurde die $N0_{Par}$ am frühesten an den Elektrodenpaaren TP7 – TP8 und P9 – P10 abgeleitet. Eine Ausnahme stellte die dominante Hemisphäre während der „inkongruenten Aufgabe“ dar. Auffällig war ein signifikant früheres Auftreten der $N0_{Par}$ in der ipsilateral zur bewegten Hand gelegenen Hemisphäre. Zudem erfolgte sie während der „kongruenten“ etwas früher als während der „inkongruenten Aufgabe“.

An die $N0_{Par}$ schloss sich eine neuerliche Positivität an, die aufgrund ihrer zeitlichen Übereinstimmung mit der P1 des Motorkortex als $P1_{Par}$ bezeichnet wird. Sie erfolgte in der ipsilateral zur Handbewegung gelegenen Hemisphäre ca. 40 ms vor Tastendruck und in der kontralateralen Hemisphäre in etwa zum Zeitpunkt des Tastendrucks. Die $P1_{Par}$ wurde in der kontralateral zur bewegten Hand gelegenen Hemisphäre am frühesten bei Elektrodenpaar TP7 – TP8 und am spätesten bei Elektrodenpaar P7/PO7 – P8/PO8 gemessen. Dies verhielt sich in der ipsilateralen Hemisphäre genau umgekehrt.

Tabelle 3-5: Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte während der Deliberationsaufgabe. Für die Elektroden des Parietalkortex sind die ermittelten Latenzen der P_{Par} , $N0_P$ und $P1_P$ in ms sowie deren Amplituden in μV dargestellt. Des Weiteren ist der Beginn der in P_{Par} terminierenden Positivierung sowie die zeitliche Differenz zwischen besagtem Beginn und der P_{Par} dargestellt.

	Elektrode	Onset	Dauer	Ppar		N0par		P1par	
		ms	μV	ms	μV	ms	μV	ms	μV
kongruente Aufgabe	CP1/P1	-509,1 \pm 157,0	227,7 \pm 130,0	-281,4 \pm 61,0	4,0 \pm 2,7	-126,5 \pm 40,8	3,5 \pm 3,2	10,0 \pm 6,4	6,4 \pm 3,2
	CP3	-519,7 \pm 107,6	204,1 \pm 89,3	-315,6 \pm 64,1	2,7 \pm 2,7	-113,8 \pm 30,8	0,9 \pm 3,3	18,5 \pm 19,1	4,9 \pm 3,6
	CP5/P5	-486,7 \pm 95,4	229,7 \pm 77,0	-257,0 \pm 69,0	2,5 \pm 1,8	-93,3 \pm 28,8	0,9 \pm 1,8	17,1 \pm 18,8	3,7 \pm 2,1
	PO3/POz	-489,7 \pm 70,0	208,9 \pm 60,8	-280,8 \pm 66,3	5,9 \pm 3,3	-137,7 \pm 58,7	4,2 \pm 3,1	-12,3 \pm 41,8	5,9 \pm 3,3
	P3	-513,1 \pm 106,4	240,3 \pm 79,8	-272,8 \pm 78,0	5,8 \pm 2,8	-102,9 \pm 55,5	4,1 \pm 3,0	3,8 \pm 31,0	6,3 \pm 2,7
	P7/PO7	-496,7 \pm 102,5	252,8 \pm 101,3	-243,8 \pm 54,0	1,7 \pm 3,2	-72,7 \pm 31,1	0,9 \pm 2,7	28,5 \pm 26,6	2,0 \pm 2,4
	TP7	-514,5 \pm 126,0	199,9 \pm 115,6	-314,6 \pm 54,4	-3,0 \pm 2,0	-171,9 \pm 43,1	-2,8 \pm 2,3	-79,0 \pm 43,2	-2,5 \pm 2,3
	P9	-539,5 \pm 120,7	294,1 \pm 101,9	-345,4 \pm 66,5	-6,9 \pm 2,6	-150,8 \pm 28,6	-5,3 \pm 3,3	-35,4 \pm 55,3	-4,8 \pm 3,0
	CP2/P2	-496,7 \pm 128,4	201,3 \pm 110,9	-295,4 \pm 58,8	5,1 \pm 2,4	-160,6 \pm 38,4	4,1 \pm 2,5	-33,5 \pm 45,6	5,7 \pm 2,9
	CP4	-524,9 \pm 127,3	205,1 \pm 116,6	-319,8 \pm 68,3	3,2 \pm 2,4	-187,9 \pm 38,4	2,1 \pm 2,6	-50,9 \pm 45,6	4,3 \pm 2,5
CP6/P6	-496,7 \pm 120,8	222,1 \pm 107,1	-274,6 \pm 68,3	2,7 \pm 1,8	-133,3 \pm 40,3	1,1 \pm 2,4	-15,9 \pm 69,4	2,2 \pm 2,3	
PO4/POz	-509,9 \pm 82,5	220,7 \pm 82,5	-289,3 \pm 67,8	4,7 \pm 3,2	-162,3 \pm 57,3	2,9 \pm 3,0	-47,7 \pm 59,7	4,3 \pm 3,4	
P4	-498,1 \pm 114,4	224,1 \pm 109,0	-274,0 \pm 61,8	4,8 \pm 2,6	-165,2 \pm 28,9	3,4 \pm 3,0	-70,0 \pm 52,1	4,3 \pm 3,2	
P8/PO8	-469,9 \pm 89,0	215,7 \pm 81,0	-254,2 \pm 68,2	3,0 \pm 3,9	-163,5 \pm 51,1	0,6 \pm 4,2	-100,4 \pm 51,4	1,7 \pm 4,3	
TP8	-546,3 \pm 80,9	202,7 \pm 99,6	-343,6 \pm 48,1	-1,8 \pm 1,8	-195,8 \pm 58,9	-1,5 \pm 2,1	-13,5 \pm 55,6	-2,4 \pm 2,5	
P10	-509,9 \pm 111,6	178,7 \pm 99,0	-331,2 \pm 48,9	-5,9 \pm 3,2	-161,0 \pm 65,5	-4,9 \pm 4,0	-20,0 \pm 57,5	-5,6 \pm 4,0	
inkongruente Aufgabe	CP1/P1	-538,4 \pm 107,5	239,6 \pm 91,7	-298,8 \pm 63,4	5,3 \pm 3,0	-146,0 \pm 44,5	4,0 \pm 2,5	-39,6 \pm 52,5	5,3 \pm 2,6
	CP3	-568,8 \pm 134,9	276,0 \pm 124,9	-291,8 \pm 64,7	2,6 \pm 2,7	-194,0 \pm 42,7	1,8 \pm 2,8	-31,6 \pm 69,0	3,7 \pm 2,7
	CP5/P5	-523,4 \pm 104,2	240,8 \pm 102,5	-282,6 \pm 46,8	2,7 \pm 1,8	-188,8 \pm 34,3	1,6 \pm 1,8	-89,8 \pm 48,7	2,6 \pm 1,6
	PO3/POz	-538,8 \pm 102,7	213,8 \pm 93,1	-325,0 \pm 55,0	5,9 \pm 2,9	-89,8 \pm 64,9	3,6 \pm 2,9	-16,0 \pm 58,5	4,5 \pm 2,3
	P3	-555,2 \pm 99,5	265,6 \pm 71,8	-288,6 \pm 60,7	5,9 \pm 3,0	-157,4 \pm 59,4	4,2 \pm 3,0	-85,0 \pm 63,3	4,9 \pm 2,8
	P7/PO7	-552,8 \pm 115,1	256,4 \pm 73,5	-296,4 \pm 65,0	1,8 \pm 2,9	-164,8 \pm 36,2	0,3 \pm 2,9	-94,6 \pm 48,5	1,1 \pm 2,8
	TP7	-571,2 \pm 117,5	225,2 \pm 133,7	-346,0 \pm 68,8	-2,8 \pm 2,1	-98,8 \pm 39,8	-2,4 \pm 2,2	-0,4 \pm 77,0	-2,5 \pm 2,2
	P9	-555,2 \pm 79,8	201,6 \pm 71,0	-353,6 \pm 92,3	-6,9 \pm 3,4	-115,6 \pm 46,8	-4,9 \pm 3,1	-10,4 \pm 53,4	-5,4 \pm 3,4
	CP2/P2	-534,4 \pm 112,0	218,2 \pm 99,7	-316,2 \pm 61,7	5,0 \pm 2,8	-108,3 \pm 23,6	2,9 \pm 2,8	11,3 \pm 5,1	5,0 \pm 2,9
	CP4	-560,4 \pm 84,3	256,0 \pm 105,9	-304,4 \pm 53,0	3,1 \pm 2,5	-107,9 \pm 39,8	1,0 \pm 2,7	23,8 \pm 26,6	4,1 \pm 2,9
CP6/P6	-591,6 \pm 106,0	276,6 \pm 85,8	-315,0 \pm 55,6	2,7 \pm 1,6	-117,3 \pm 51,2	0,6 \pm 2,1	21,0 \pm 15,5	3,4 \pm 2,0	
PO4/POz	-534,2 \pm 116,3	220,6 \pm 78,9	-313,6 \pm 75,8	4,8 \pm 3,1	-70,2 \pm 48,2	2,3 \pm 2,5	10,0 \pm 27,6	3,8 \pm 2,3	
P4	-558,4 \pm 123,6	252,0 \pm 110,4	-306,4 \pm 54,5	5,0 \pm 2,7	-85,6 \pm 43,5	2,7 \pm 2,2	19,8 \pm 16,4	4,4 \pm 1,9	
P8/PO8	-547,4 \pm 124,4	263,6 \pm 105,5	-283,8 \pm 54,5	2,6 \pm 4,0	-72,7 \pm 40,2	-0,1 \pm 3,6	20,0 \pm 26,1	1,9 \pm 3,1	
TP8	-557,4 \pm 85,8	215,4 \pm 89,6	-342,0 \pm 72,1	-1,8 \pm 2,7	-148,8 \pm 46,8	-1,5 \pm 2,9	-56,3 \pm 44,0	-1,1 \pm 3,0	
P10	-561,2 \pm 87,7	232,2 \pm 86,1	-329,0 \pm 59,0	-5,6 \pm 3,8	-147,1 \pm 47,4	-2,6 \pm 3,7	-34,2 \pm 58,0	-4,8 \pm 4,0	

Um die P_{Par} genauer zu analysieren wurden die Mittelwerte auf sie ausgerichtet (*Abbildung 3-14*). Sie präsentierte sich unabhängig von Elektrodenposition oder Aufgabentyp als ein steiles Extremum am Ende einer stetig zunehmenden Positivierung bzw. im Falle der Elektrodenpaare TP7 –TP8 und P9 - P10 einer Negativierung. Die maximale Amplitude der P_{Par} wurde sowohl bei der „kongruenten“ als auch bei der „inkongruenten Aufgabe“ an Elektrodenpaar P9 – P10 abgeleitet. Sie belief sich in der dominanten Hemisphäre auf $-6,9 \mu\text{V}$ und in der nicht dominanten Hemisphäre auf ca. $5,8 \mu\text{V}$.

Bei ausschließlicher Betrachtung der Elektrodenpaare mit nicht-invertierten Amplitudenwerten wurde die maximale Amplitude an den Elektrodenpositionen PO3/POz – PO4/POz und P3 –P4 abgeleitet. Sie betrug jeweils $5,9 \mu\text{V}$ in der linken Hemisphäre und ca. $4,8 \mu\text{V}$ in der rechten Hemisphäre. Insgesamt wies die linke Hemisphäre etwas höhere Amplituden als die rechte Hemisphäre auf.

Als Deliberationsdauer wurde die Differenz zwischen dem Beginn der in P_{Par} terminierenden Positivität und der in der kontralateral zur Handbewegung bestimmten N0 definiert. Sie belief sich während der „kongruenten Aufgabe“ auf ca. 390ms und fiel aufgrund des frühen Beginns der Positivierung bei der „inkongruenten Aufgabe“ etwas höher aus und belief sich hier auf ca. 430ms.

3.2.5 Ergebnisse des Kepner-Randals-Test

Der Kepner-Randals-Test wies sowohl bei der „kongruenten“ als auch bei der „inkongruenten Aufgabe“ für die an den untersuchten Elektrodenpaaren CP1/P1 – CP2/P2, PO3/POz – PO4/POz sowie P3 – P4 des Parietalkortex gemessenen Extrema P1, N1, P2, N2 und P3 eine Kopplung an die Stimuluspräsentation nach. Die *P*-Werte beliefen sich bei allen untersuchten Elektroden auf $<0,00113$ und waren somit signifikant. Im Gegensatz dazu wies die im Motorkortex bestimmte N0 bei allen Elektroden eine signifikante Kopplung an den Tastendruck auf. Eine Korrelation mit dem Tastendruck zeigte sich zudem für die an

Elektrode CP2/P2 der „kongruenten Aufgabe“ und an Elektrode CP1/P1 der „inkongruenten Aufgabe“ gemessene P_{Par} , also jeweils für die ipsilateral zur Handbewegung gelegene Elektrodenposition.

Des Weiteren fand sich für die bei der inkongruenten Aufgabe“ an den Elektroden PO3/POz und P4 gemessene P_{Par} eine signifikante Korrelation mit dem Tastendruck. Bei den restlichen im Parietalkortex untersuchten Elektroden zeigte sich für die P_{Par} im Kepner-Randals-Test auf einem Signifikanzniveau von 5% keine signifikante Korrelation zum Tastendruck oder zur Stimuluspräsentation.

4 Diskussion

4.1 Methodendiskussion

Einer der am häufigsten angeführten Kritikpunkte an Libets Experiment ist, dass die vom Probanden ausgeführte motorische Reaktion durch den Experimentator festgelegt war (Näätänen 1985; Zhu 2003). Die Probanden konnten lediglich frei entscheiden wann, innerhalb eines limitierten Zeitraums, sie die Bewegung durchführten. Da die Möglichkeit einer alternativen Handlung und somit die Voraussetzung für eine freie Entscheidung (Nida-Rümelin 2005) nicht gegeben war, ist es fragwürdig, ob mit Hilfe des Libetexperiments tatsächlich Entscheidungsprozesse untersucht werden können. Um diesen Kritikpunkt zu umgehen, wurden in der vorliegenden Studie Entscheidungssituationen nachgestellt bei denen die Probanden in Abhängigkeit vom Stimulus entweder mit einem Tastendruck der linken oder der rechten Hand reagieren sollten. Auch in Nachfolgeexperimenten Libets ging es im Gegensatz zu unserem Versuchsaufbau meist lediglich darum, eine Fingerbewegung auszuführen oder zu unterlassen (Haggard and Eimer 1999; Banks and Isham 2009).

Bei Experimenten vom „Libet-Typ“ obliegt den Probanden gleichzeitig die Verantwortung für die Entscheidungsfindung als auch für die Zeitmessung. Studien konnten jedoch belegen, dass die elektrophysiologische Aktivität der SMA durch Aufmerksamkeit auf die Zeitnahme moduliert wird (Lau et al. 2004). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die subjektive Wahrnehmung des Intentionszeitpunkts durch neuronale Aktivität beeinflusst wird, die nach der motorischen Reaktion stattfindet (Lau et al. 2007). Um ein möglichst genaues Bild der neuronalen Abläufe zu erhalten, muss dem Probanden folglich die Verantwortung für die Zeitnahme entzogen werden. Dies wurde in der vorliegenden Studie erreicht indem die Entscheidung erst nach einem visuellen Stimulus möglich war. Bereits frühere Forschungsgruppen berücksichtigten diesen Kritikpunkt und diktierten den Zeitpunkt der

Entscheidung ebenfalls durch einen externen Trigger (Herrmann et al. 2008; Trevena and Miller 2010). Doch selbst bei den Experimenten von Trevena und Miller kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass die Probanden nicht schon vor Applikation des Stimulus die Entscheidung zum Tastendruck getroffen haben.

Im Gegensatz zum Libetexperiment (Libet et al. 1982; Libet et al. 1983) wurde in diesem Versuch die Reaktionszeit nicht mittels Elektromyographie gemessen, sondern lediglich der Zeitpunkt des Tastendrucks erfasst. Die elektromyographische Messung hätte genaue Daten bezüglich des Beginns der Muskelaktivierung geliefert. Aufgrund der minimalen Diskrepanz dieser beiden Verfahren zur Reaktionszeitmessung wurde in unserer Experimentenserie auf eine elektromyographische Messung verzichtet.

Doch der wichtigste Unterschied dieser Studie im Vergleich zum Libet-Experiment besteht darin, dass die Probanden nicht bezüglich des Bewusstwerdens ihrer Entscheidung befragt, sondern allein, der zu einer Handlungsentscheidung und somit zu einer motorischen Reaktion führende Deliberationsprozess analysiert wurde.

Das EEG bietet eine gute Möglichkeit zur nicht-invasiven Messung hirnelektrischer Aktivität. Durch seine hohe zeitliche Auflösung ist es vielen anderen Verfahren, wie z.B. der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), überlegen. Um jedoch auch die räumliche Auflösung zu verbessern und eine Quellenlokalisierung durchführen zu können ist eine ausreichende Elektrodendichte sowie ein maximal flächendeckendes Elektrodennetz von Nöten (Junghöfer et al. 1999). Aus diesem Grund wurden EEG-Hauben mit äquidistanten Elektrodenpositionen entwickelt (Tucker 1993). Da das gebräuchlichere ten-twenty System (Jasper 1958) der äquidistanten Elektrodenpositionierung in Bezug auf eine gleichmäßige, räumliche Auflösung nachsteht, entschieden wir uns für die Verwendung einer EEG-Haube mit 64 äquidistanten Elektroden.

Für diesen Versuch standen 2 EEG-Hauben unterschiedlicher Größe zur Verfügung. Da sich die Kopfgrößen der Probanden teilweise erheblich voneinander unterscheiden, ist zu erwägen, ob sich die Elektrodenpositionierung durch die Verwendung mehrerer Haubengrößen optimieren ließe. Zu minimalen Abweichungen der Elektrodenposition kann es zudem durch ein leichtes Verrutschen der Haube während des Versuches gekommen sein. Dies ist ein grundsätzliches Problem, das bei allen EEG-Studien auftritt.

Trotz der Verwendung äquidistanter EEG-Hauben lässt sich die elektrische Aktivität tiefer gelegener Strukturen sowie ungeordneter Neuronenverbände, die sogenannte „geschlossene Felder“ bilden, mittels EEG nicht bzw. nur schlecht darstellen (De Nó 1947). Interessant wäre daher in künftigen Experimenten eine simultane EEG und fMRT Messung durchzuführen (Ives et al. 1993; Huster et al. 2012). Somit ließe sich die hohe zeitliche und räumliche Auflösung beider Verfahren kombinieren.

4.2 Probandenauswahl

Da die Reaktionszeit vor allem durch das Alter beeinflusst wird (Kail 1991; Salthouse 1996), wurde für diese Studie bezüglich des Alters eine möglichst homogenes Probandenkollektiv angestrebt (*Tabelle 2-1*).

Auch das Geschlecht scheint einen Einfluss auf die Reaktionszeit zu haben. So wurde bei Frauen eine höhere intraindividuelle Variabilität der Mehrfachwahlreaktionszeit als bei Männern beobachtet (Der and Deary 2006). Da sich in bisherigen Studien jedoch keine signifikanten Unterschiede bezüglich der mittleren Reaktionszeit zeigten (Dykiert et al. 2012), entschieden wir uns für die Rekrutierung eines Probandenkollektivs mit annähernd gleichmäßiger Geschlechtsverteilung.

In früheren Studien wurde ein Zusammenhang zwischen EEG Aktivität und Händigkeit beobachtet, der zumeist auf einer komplexen Interaktion von Aufgabenstellung,

Elektrodenpositionierung und Händigkeit beruhte (Provins and Cunliffe 1972; Galin et al. 1982). Um dieses Problem zu umgehen wurden für diese Studie ausschließlich rechtshändige Probanden rekrutiert. Eine weitere Studie zur Untersuchung der elektrophysiologischen Aktivität bei linkshändigen Probanden ist jedoch bereits in Arbeit.

4.3 Reaktionszeiten

Bei Betrachtung der Reaktionszeiten der rein motorischen Aufgabe zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der rechten und linken Hand. Im Schnitt war die Reaktionszeit der rechten Hand lediglich 5 ms schneller als die der linken Hand. Auch bei vergleichbaren Experimenten wie z.B. von Trevena und Miller (Trevena and Miller 2010) konnten bezüglich der Reaktionszeiten beider Hände keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden. Obwohl es sich in unserem Versuch ausschließlich um rechtshändige Probanden handelte, wiesen 11 der 28 Probanden sogar kürzere Latenzzeiten der linken Hand auf. Dies ist in Übereinstimmung mit den Daten von Goodin (Goodin et al. 1996), der bei rechtshändigen Probanden ebenfalls eine kürzere Reaktionszeit der linken Hand beobachtete. Ein möglicher Grund für die kürzere Reaktionszeit der linken Hand könnte sein, dass es sich bei der Händigkeit um eine kontinuierliche Variable mit verschiedenen Abstufungen handelt (Annett 1970). Die von uns untersuchten Probanden könnten also eine verschieden starke Ausprägung der Händigkeit aufgewiesen haben. Matsuhashi und Hallett beobachteten bei EMG basierten Reaktionszeitmessungen eine Reaktionszeit von 170 ± 40 ms (Matsuhashi and Hallett 2008). Die Reaktionszeiten im vorliegenden Experiment fielen um ca. 90 ms länger aus. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Probanden nicht dazu angehalten waren, möglichst schnell zu reagieren.

Bei der Deliberationsaufgabe hingegen zeigten sich deutlich längere Reaktionszeiten. Sowohl für die kongruente als auch für die inkongruente Aufgabe ergaben sich bezüglich der Reaktionszeiten signifikante Unterschiede im Vergleich zur rein motorischen Aufgabe. Im

Mittel benötigten die Probanden für die Deliberationsaufgabe knapp 465 ms länger. Da sich die beiden Aufgabentypen lediglich hinsichtlich des Deliberationsprozesses unterschieden ist davon auszugehen, dass diese Differenz der Reaktionszeiten die Zeit, die für den kognitiven Prozess der Deliberation nötig ist, widerspiegelt.

Innerhalb der Deliberationsaufgabe zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten der kongruenten und der inkongruenten Aufgabe. Der Tastendruck erfolgte während der Testphase mit der rechten Hand durchschnittlich 58 ms schneller als mit der Linken. Da sich bei der rein motorischen Aufgabe bezüglich der Hand, mit der gedrückt wurde, keine signifikanten Unterschiede ergeben hatten, lässt sich die Diskrepanz der Reaktionszeiten von kongruenter und inkongruenter Aufgabe nicht ausreichend durch die Händigkeit der Probanden erklären. Es ist anzunehmen, dass es beim vorliegenden Experiment durch die Inkongruenz der Ebenen Schriftzug und Farbe zu einer asymmetrischen Interferenz, wie sie beim Stroop-Test (Stroop 1935) der Fall ist, gekommen ist. Diese führte zu einer verlängerten Reaktionszeit während der „inkongruenten Aufgabe“.

Während der Lernphase waren die Reaktionszeiten der Probanden sowohl bei der kongruenten, als auch bei der inkongruenten Aufgabe im Mittel um ca. 60 ms länger als während der Testphase. Dies spricht für einen Lernerfolg der Probanden während der Lernphase.

4.4 Analyse der EEG-Aktivität vor Stimuluspräsentation

Im Gegensatz zu früheren Experimenten zeigte sich in der vorliegenden Studie bei keiner der drei Aufgabenstellungen eine EEG-Aktivitätsänderung **vor** Stimuluspräsentation. Trevena und Miller (Trevena and Miller 2010) beispielsweise beobachteten, unabhängig davon ob die Probanden sich dazu entschieden, eine Bewegung durchzuführen oder nicht, eine Negativität vor Stimuluspräsentation (SPN, stimulus preceding negativity). Sie interpretierten die SPN als bewusst oder unbewusst stattfindende Auseinandersetzung mit der Aufgabenstellung, wie z.B.

einer Antizipation des Stimulus. Auch Brunia (Brunia 1988; Brunia and Damen 1988) beobachtete vor einem vorhersehbaren Stimulus, insbesondere über der rechten Hemisphäre, eine SPN. Bei Trevena und Miller erfolgte der imperative, akustische Stimulus 2 s plus X s nach einem vorhergehenden Stimulus, wobei X im Durchschnitt ebenfalls 2 s betrug. In Brunias Experiment erfolgte der Stimulus 2 s nach einer motorischen Reaktion. In dem hier vorliegenden Experiment variierten die ITIs in einem Bereich von 12 und 15 s und wurden zufällig generiert. Aufgrund der langen ITIs wurde in unserem Versuch eine Antizipation des Stimulus verhindert, so dass es nicht zur Ausbildung einer SPN gekommen ist. Eine unspezifische Erwartungshaltung bezüglich des Stimulus kann jedoch nicht komplett ausgeschlossen werden.

Das Fehlen einer dem Stimulus vorhergehenden Potentialänderung spricht dafür, dass die Abfolge von Deliberation sowie anschließender Handlungsentscheidung und motorischer Aktivität zum Zeitpunkt der Stimuluspräsentation noch nicht initiiert worden ist. Die beobachteten, unterschiedlichen DC-Werte können nicht mit dem bevorstehenden Deliberationsprozess in Zusammenhang gebracht werden.

4.5 Analyse der auf den Stimulus-ausgerichteten ereigniskorrelierten Potentiale

Bei der Analyse der auf den Stimulus ausgerichteten ereigniskorrelierten Potentiale des Motor- sowie des Parietalkortex zeigte sich, mit Ausnahme der Elektrodenpaare CP5/P5 – CP6/P6, PO3/POz – PO4/POz und P3 – P4, eine Abfolge von fünf Extrema (*Abbildung 3-3, Abbildung 3-4*). Ersteres stellte eine Positivität P1, die 182 ms nach Stimuluspräsentation erfolgte, dar. Aufgrund der zeitlichen Übereinstimmung könnte es sich hierbei um die, bereits in früheren Arbeiten beschriebene, P200 handeln. Diese präsentiert sich typischerweise in zentro-frontalen und parieto-okzipitalen (Simson et al. 1977; Freunberger et al. 2007) Kortexregionen und weist, wie die von uns beobachtete P1 (*Abbildung 3-3, Tabelle 3-3*), um die Vertexregion die maximale Amplitude auf. Die genaue Funktion der P200 ist noch nicht

bekannt. Bisherige Forschungsergebnisse legen jedoch die Vermutung nahe, dass es sich um neuronale Prozesse handelt, zu denen es bei der Analyse visueller Stimuli und deren Vergleich mit abgespeicherten Gedächtnisinhalten kommt (Luck and Hillyard 1994; Evans and Federmeier 2007).

Vaughan et. al. (Vaughan and Ritter 1970) beschrieben eine Polaritätsumkehr der P200 entlang der Fissura Sylvii mit positiven Werten oberhalb und negativen Werten unterhalb der Fissur. Eine ebensolche Potentialumkehr beobachteten wir in den Elektrodenpaaren P7/PO7 – P8/PO8, P9 – P10 und TP7 – TP8 (*Abbildung 3-3.C*). Dies spricht jedoch für eine Lage besagter Elektrodenpositionen in temporalen Kortexarealen. Auch beim direkten Vergleich der Elektrodenpositionen mit darunterliegenden Kortexarealen (Homan et al. 1987) zeigt sich für die Elektrodenpaare P9 – P10 und TP7 – TP8 eine intratemporale Lage. Im Folgenden werden die Elektrodenpositionen P9 – P10 sowie TP7 – TP8 daher als dem Temporalkortex zugehörig betrachtet. Bei beobachteter Polaritätsumkehr der P1 in den Elektroden P7/PO7 - P8/PO8 aber ansonsten den intraparietalen Elektroden entsprechendem Kurvenverlauf bei Betrachtung der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte (siehe *Abbildung 3-14*) besteht der Verdacht auf eine Lokalisation besagten Elektrodenpaares oberhalb der Fissura Sylvii mit elektrophysiologischen Eigenschaften sowohl des Parietal- als auch des Temporalkortex.

Das zweite von uns beobachtete Extremum N1 erfolgte 262 ms nach Stimuluspräsentation und könnte daher mit der vorbeschriebenen N200 übereinstimmen. Die N200 wird 180 bis 325 ms nach Präsentation eines visuellen oder akustischen Stimulus evoziert und kann in drei Subkomponenten unterteilt werden (Patel and Azzam 2005). Sie wird vor allem bei Präsentation inkompatibler Stimuli beobachtet und wird daher mit der Suppression inkorrektur Antworten in Zusammenhang gebracht (Kopp et al. 1996; Heil et al. 2000). Dies erklärt vor allem das Auftreten der N200 während der nicht kongruenten Aufgabe. Auch bei

der Aufgabenstellung ohne nachfolgende motorische Aktivität, die hier nicht im Detail analysiert wurde, ist eine ausgeprägte N200 zu erwarten.

An die N1 schloss sich in unserem Versuch 349 ms nach dem Stimulus eine neuerliche Positivität P2 an. Sie könnte der, erstmals von Sutton et. al. (Sutton et al. 1965) beschriebenen P300 entsprechen. Die P300 findet sich 250 bis 500 ms nach Stimuluspräsentation und kann wie die N200 in verschiedene Komponenten, namentlich in P3a und P3b, unterteilt werden (Polich 2007). Wie in unserem Versuch nimmt die Amplitude der P300 von frontal nach parietal zu (Johnson 1993). Aktuell bestehen verschiedene Erklärungsmodelle zur Bedeutung der P300. Eine der einflussreichsten Theorien ist die von Donchin et. al (Donchin 1981; Donchin and Coles 1988) postulierte „Context updating hypothesis“. Ihr zu folge stellt die P300 eine Aktualisierung des Arbeitsgedächtnisses dar, zu der es kommt wenn ein externer Reiz nicht mit der eigenen Erwartung der Umwelt übereinstimmt. Demgegenüber steht die „Context closure hypothesis“ von Verleger et. al. (Verleger 1988), die besagt, dass die P3b durch erwartete Stimuli ausgelöst wird. Eine weitere ebenfalls von Verleger postulierte Theorie geht davon aus, dass die P3b zwischen der visuellen Verarbeitung des Stimulus und der Bewegungsinitiation vermittelt (Verleger et al. 2005).

430 ms nach Stimuluspräsentation erfolgte eine neuerliche relative Negativität N2. Aufgrund der zeitlichen Übereinstimmung könnte es sich hierbei um die 250 bis 500 ms nach dem Stimulus centroparietal auftretende N400 handeln (Kutas and Hillyard 1980; Kutas and Federmeier 2011). Heutzutage gehen viele Arbeitsgruppen von einer parallelen Prozessierung orthographischer und semantischer Information aus, die durch die N400 repräsentiert wird (Laszlo and Federmeier 2011).

Die von uns beobachtete Abfolge ereigniskorrelierter Potentiale endete mit einer Positivität P3, die 514 ms nach Stimuluspräsentation erfolgte. Das zeitliche Auftreten der P3 sowie die Lokalisation vor allem in parietalen Kortexarealen legt nahe, dass es sich hierbei um eine

Variante der späten positiven Komponente (late positive component, LPC) handelt (Friedman and Johnson 2000; Rugg and Curran 2007). Wie die LPC weist auch die von uns erfasste P3 ein linkshemisphärisches Maximum auf. Die LPC findet sich vor allem bei aktiver Identifizierung zuvor präsentierter Stimuli und wird daher als Korrelat des expliziten Gedächtnisses angesehen (Wilding and Rugg 1996). Eine Subkomponente der LPC wird jedoch auch, unabhängig von der Aufgabenstellung, beim passiven Wiedererkennen vorbekannter Stimuli beobachtet und wird daher mit dem impliziten Gedächtnis in Zusammenhang gebracht (Rugg et al. 1998). Aufgrund der wiederholten Präsentation der Stimuli in der Lernphase unseres Versuchs könnte es während der Deliberationsphase zur Ausbildung besagter Subkomponente gekommen sein.

Bei den Elektrodenpaaren CP5/P5 – CP6/P6, P3 – P4 und PO3/POz – PO4/POz ließen sich nur drei Extrema identifizieren (*Abbildung 3-3.B*). Eine Erklärung für das Fehlen der P1 sowie der N1 könnte eine mögliche Lage der Elektroden oberhalb des Sulcus intraparietalis bzw. des Sulcus parieto-okzipitalis liefern. Dadurch könnte es zur partiellen Ausbildung geschlossener Felder kommen (De Nó 1947), deren elektrische Aktivität mit EEG Methoden nicht messbar ist.

Beim Hemisphärenvergleich parietaler Kortextareale zeigte sich sowohl bei der kongruenten als auch bei der inkongruenten Aufgabe eine signifikante Hemisphärendifferenz mit nachweislich höheren Amplituden der linken Hemisphäre. Bei beiden Aufgabenstellungen ließ sich insbesondere im Bereich der Elektrodenpaare PO3/POz – PO4/POz, P3 – P4 und CP1/P1 – CP2/P2 ein Amplitudenunterschied korrespondierender Elektroden feststellen. Diese Elektrodenpositionen sind vermutlich oberhalb des Lobus parietalis superior sowie Bereichen des Gyrus supramarginalis lokalisiert (Homan et al. 1987). Bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts postulierte Hugo Liepmann die Theorie, dass die Vorstellung über den räumlichen und zeitlichen Ablauf einer Bewegung im linken Parietalkortex lokalisiert sei

(Liepmann 1908, 1920). Weitere Studien bestätigten die Dominanz der linken Hemisphäre (De Renzi et al. 1982; Frey et al. 2005) und insbesondere des Gyrus supramarginalis und angularis bei der Kontrolle zielgerichteter Bewegungen und der korrekten Verwendung von Objekten (Johnson-Frey et al. 2005). Die von uns beobachtete Hemisphärendifferenz könnte also auf eine vermehrte linkshemisphärische Aktivität besagter Areale aufgrund des für den Tastendruck benötigten Planungsprozesses zurückzuführen sein.

Im Gegensatz zum Motorkortex zeigten sich im Parietalkortex im Vergleich von „kongruenter“ und „inkongruenter Aufgabe“ signifikanten Amplitudendifferenzen mit positiveren Amplituden bzw. bei Elektroden mit inverser Polarität negativeren Amplituden, der „kongruenten Aufgabe“. Eine positivere Amplitude der parietal lokalisierten P300 bei kongruenten im Vergleich zu inkongruenten Aufgaben ist seit langem bekannt (Posner et al. 1973; Courchesne et al. 1975) und wird darauf zurückgeführt, dass bei weniger anspruchsvollen Aufgaben zusätzliche Verarbeitungskapazität zur Verfügung steht (Kok 2001). Die N400 hingegen weist bei semantisch unerwarteten oder inkorrekten Stimuli, wie sie bei der „inkongruenten Aufgabe“ der Fall waren, eine maximale Amplitude auf (Szűcs et al. 2007; Rabovsky and McRae 2014). Eine mögliche Ursache für den von uns beobachteten Amplitudenunterschied zwischen „kongruenter“ und „inkongruenter Aufgabe“ im Parietalkortex könnte also die aufgabenspezifische Ausprägung der insbesondere parietal lokalisierten ereigniskorrelierten Potentiale P300 und N400 sein.

Im Hemisphärenvergleich motorischer Kortexareale fiel bei der „kongruenten Aufgabe“ eine signifikant negativere Amplitude der linken im Vergleich zur rechten Hemisphäre auf. Dies ist auf eine erhöhte Aktivierung der kontralateral zur bewegten Hand lokalisierten, linken Hemisphäre zurückzuführen. Demzufolge müsste sich bei der „inkongruenten Aufgabe“ jedoch ein signifikanter Amplitudenunterschied mit negativeren Amplituden der rechten Hemisphäre zeigen. Dass dem nicht der Fall ist, lässt sich durch die Entstehung

konkurrierender Reaktionstendenzen aufgrund der widersprüchlichen visuellen Stimuli erklären. Szűcs et al. (Szűcs et al. 2012) beispielsweise verglichen mittels funktioneller Nahinfrarotspektroskopie die Aktivität der ipsilateral zur bewegten Hand gelegenen Hemisphäre von „kongruenter“ und „inkongruenter Aufgabe“. Während der „inkongruenten Aufgabe“ zeigte sich eine erhöhte Aktivität der ipsilateralen Hemisphäre. Die Autoren folgerten, dass die erhöhte Aktivität der ipsilateralen Hemisphäre während der inkongruenten Aufgabe aufgrund konkurrierender Reaktionstendenzen entsteht. Eine erhöhte Aktivität der ipsilateralen Hemisphäre wiederum würde zu einem Angleichen der hirnelektrischen Aktivität von linker und rechter Hemisphäre führen und würde, wie in unserem Versuch, zu einer nicht signifikanten Hemisphärendifferenz führen.

4.6 Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten ereigniskorrelierten

Potentiale des Motorkortex

Da sowohl bei der rein motorischen Aufgabe als auch der Deliberationsaufgabe die gleiche Abfolge einer initialen Positivität, gefolgt von einer in etwa zum Zeitpunkt des Tastendrucks auftretenden Negativität und einer anschließend folgenden erneuten Positivität ($P1_M-N1_M-P2_M$ bzw. $P1_D-N1_D-P2_D$) (*Abbildung 3-11*) zu beobachten war, ist davon auszugehen, dass diese mit der Ausführung der Bewegung in Zusammenhang steht. Die Tatsache, dass die Komponenten $P1_{M/D}$ und $N1_{M/D}$ kurz vor dem Tastendruck zu finden waren, legt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um ein Korrelat der Bewegungsinitiation handelt. Aufgrund der relativ konstanten $P1_{M/D}-N1_{M/D}$ -Zeit von knapp 75 ms könnte es sich bei der $P1_{M/D}$, um die erstmals von Deecke et al. 1976 (Deecke et al. 1976) beschriebene prämotorische Positivierung handeln. Diese findet sich vor allem in präzentralen und parietalen Kortexarealen und wird als Korrelat der Bewegungsinitiation angesehen. Die $N1$ wiederum könnte dem Motorpotential, das einer Willkürbewegung unmittelbar vorausgeht, entsprechen. Die $P2$ hingegen erfolgte erst nach dem Tastendruck und scheint daher ein

propriozeptiv evoziertes Potential darzustellen. Die von uns gefundene Sequenz von $P1_{M/D}$ - $N1_{M/D}$ - $P2_{M/D}$ stimmte mit den letzten drei Komponenten einer von Vaughan et al. (Vaughan et al. 1968) beschriebenen Abfolge von $N1$ - $P1$ - $N2$ - $P2$ überein. Wie bei Vaughan zeigten sich in unserem Versuch in der kontralateral zur Handbewegung gelegenen Hemisphäre deutlich negativere Amplituden als in der ipsilateralen Hemisphäre.

Die Deliberationsaufgabe unterschied sich von der rein motorischen Aufgabe durch eine zusätzliche langsam und stetig zunehmende Negativität, die in einem Extremum $N0$ endete. Langsam zunehmende Negativierungen wurden in der Vergangenheit bei unterschiedlichen experimentellen Ansätzen beobachtet. Bereits 1964 beschrieben Kornhuber und Deecke (Kornhuber and Deecke 1964) das Bereitschaftspotential, eine charakteristische negative Potentialschwankung im Vorfeld willkürlicher Bewegungen. Es werden zwei Komponenten des Bereitschaftspotentials unterschieden. Bei der ersten handelt es sich um eine ca. 1 s vor der motorischen Reaktion beginnende langsame Negativierung (BP). Diese geht, ca. 500 ms vor der motorischen Reaktion in eine steilere Negativität (negative slope, NS) über, die in etwa 100 ms vor der Reaktion in ein Extremum terminiert (Shibasaki et al. 1980; Shibasaki and Hallett 2006). Besagte Komponenten weisen eine unterschiedliche Verteilung auf. Das BP weist eine große, symmetrische vom Frontal- bis zum Parietalkortex reichende Verteilung auf. Die maximale Ausprägung zeigt sich jedoch mittig in präzentralen und parietalen Regionen. Die NS hingegen findet sich vor allem in der kontralateral zur Bewegung gelegenen präzentralen Region und dehnt sich nach parietal sowie in die ipsilaterale Hemisphäre jedoch nicht nach frontal aus (Toma et al. 2002).

Eine weitere stetig zunehmende Negativierung wurde durch Walter et al. beschrieben (Walter 1964; Walter et al. 1964). Es handelt sich hierbei um die contingent negative variation (CNV), ein ereigniskorreliertes Potential, das zwischen zwei aufeinander folgenden Reizen, die entweder akustisch oder visuell präsentiert werden, auftritt. Der erste Stimulus ($S1$) hat

die Funktion eines Warnreizes und kündigt einen nachfolgenden Stimulus an. Nach einem festen Zeitintervall folgt der zweite, imperative Stimulus S2, der durch eine motorische Reaktion terminiert werden soll. Innerhalb des Intervalls kommt es hierbei zu einer charakteristischen, stetig zunehmenden Negativierung, der CNV, die nach S2 steil abfällt.

Wie das BP wurde auch die CNV in eine frühe und eine späte Komponente geteilt (Weerts and Lang 1973; Loveless and Sanford 1974). Erstere wies ca. 650 ms nach S1 ein Extremum auf und war frontozentral lokalisiert. Das Maximum der späten Komponente hingegen erfolgte innerhalb der letzten 200 ms vor S2 im präzentralen Kortex (Gaillard 1976; Cui et al. 2000).

Entgegen der früheren Lehrmeinung, geht man heute davon aus, dass sich die Generatoren der CNV von denen des BP unterscheiden. (Ruchkin et al. 1986; Ikeda et al. 1994). Die CNV wird mit selektiver Aufmerksamkeit und Erwartung in Zusammenhang gebracht (Tecce 1972).

Auch Vaughan et al (Vaughan et al. 1968) beschrieben eine langsam und stetig zunehmende Negativierung N1 im Vorfeld der bereits geschilderten Abfolge von P1-N2-P2. Die maximale Amplitude der N0 fand sich im kontralateral zur Bewegung gelegenen Gyrus precentralis ca. 2-5 cm lateral der Mittellinie. Im Gegensatz zu unserem Versuch mussten die Probanden jedoch zu einem selbst gewählten Zeitpunkt eine Bewegung durchführen statt auf einen externen Stimulus zu reagieren.

Da sich die experimentellen Ansätze zur Bestimmung des BP, der CNV sowie der von Vaughan et al. beschriebenen N1 von der aktuellen Studie unterscheiden ist nicht zwingend von einer Übereinstimmung besagter Komponenten mit der von uns beobachteten N0 auszugehen (*Abbildung 3-11*). Im Gegensatz zur von Kornhuber und Deecke durchgeführten Studie, bei der die Probanden den Zeitpunkt einer willkürlichen Fingerbewegung frei wählen sollten (Kornhuber and Deecke 1964), wurden die Testpersonen in der vorliegenden Studie

dazu aufgefordert in Abhängigkeit eines visuellen Stimulus eine Bewegung des rechten bzw. des linken Zeigefingers durchzuführen. Hierzu war ein Deliberationprozess von Nöten.

Die CNV wird durch einen erwarteten, externen Stimulus hervorgerufen und stellt ein Korrelat der Aufmerksamkeit dar, die die Vorbereitung zu einer motorischen Handlung begleitet. Dieser Interpretation entsprechend ist davon auszugehen, dass die N0 Komponente dieser Studie durch einen internen Stimulus hervorgerufen wird und die anschließende motorische Reaktion triggert. Die N0 kann folglich als das Ende eines benötigten Deliberationsprozesses interpretiert werden.

Die N0-Komponente wurde während der kongruenten und inkongruenten Aufgabe sowohl in der dominanten als auch in der nicht-dominanten Hemisphäre beobachtet. Die N0 erfolgte in der jeweils kontralateral zur bewegten Hand gelegenen Hemisphäre signifikant später als in der ipsilateralen Hemisphäre (*Abbildung 3-13, Tabelle 3-4*). Eine simultane Aktivierung beider Motorkortices bei der Präsentation inkongruenter Stimuli wurde durch Desoto et al. 2001 (DeSoto et al. 2001; Szűcs et al. 2009) nachgewiesen. Der Hemisphärenunterschied bezüglich des zeitlichen Auftretens der N0 lässt sich daher durch eine initial bilaterale Aktivierung beider Motorkortices erklären. Erst nach Beendigung des Deliberationsprozesses erfolgt die aktive Inhibition des ipsilateralen Motorkortex

4.7 Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten ereigniskorrelierten

Potentiale des Parietalkortex

Bei der Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte des Parietalkortex zeigte sich eine Abfolge von drei Extrema P_{Par} - $N0_{\text{Par}}$ - $P1_{\text{Par}}$ (*Abbildung 3-14, Tabelle 3-5*). Die $N0_{\text{Par}}$ sowie die $P1_{\text{Par}}$ stimmten zeitlich mit der im Motorkortex beobachteten $N0_{\text{D}}$ bzw. $P1_{\text{M/D}}$ überein und werden daher als Korrelat der gleichen elektrischen Grundaktivität betrachtet. Die P_{Par} hingegen war ausschließlich in parietalen Kortexarealen zu detektieren und erfolgte

im Mittel ca. 300 ms vor Tastendruck bzw. 160 ms vor N_{Par} . Im Gegensatz zu den Extrema P1, N1, P2, N2 und P3 des Parietalkortex konnte mittels Kepner-Randals-Test für die, im Bereich des Gyrus supramarginalis und Gyrus angularis (Homan et al. 1987) lokalisierten Elektrodenpositionen CP1/P1-CP2/P2, PO3/POz – PO4/POz sowie P3 – P4 eine positive Korrelation der P_{Par} mit dem Tastendruck nachgewiesen werden. Folglich stellt die P_{Par} eines der frühesten neurophysiologischen Zeichen dar, das entscheidungsrelevant ist.

Sirigu et al. (Sirigu et al. 2004) konnten bei Patienten mit Schädigungen im Bereich des Gyrus supramarginalis sowie angularis eine aufgehobene Fähigkeit, den Zeitpunkt einer bewusst getroffenen Entscheidung anzugeben, nachweisen. Da die Patienten in der Lage waren, den Zeitpunkt der Bewegung korrekt anzugeben, konnte dieses Defizit nicht auf eine unspezifische Beeinträchtigung des zeitlichen Schätzens zurückgeführt werden. Aus diesen Daten zogen sie die Schlussfolgerung, dass im Parietalkortex ein internes Modell der bevorstehenden Bewegung generiert wird, das ein neuronales Korrelat der bewussten Bewegungsintention darstellt. Diese Theorie wird durch die Ergebnisse der Arbeitsgruppe um Michel Desmurget unterstützt, die bei gesunden Patienten durch epikortikale Reizung des Parietalkortex eine unspezifische Bewegungsintention hervorrufen konnten (Desmurget et al. 2009; Desmurget and Sirigu 2012). Die Patienten gaben beispielsweise an einen Fuß bewegen zu wollen, konnten auf Nachfrage hin jedoch nicht spezifizieren, wie die Bewegung genau aussehen sollte

Während der letzten zwei Jahrzehnte wurden Libets Ergebnisse in zahlreichen Studien repliziert. Der Zeitpunkt der bewussten Bewegungsintention variiert je nach Studie in einem Zeitraum zwischen 200 und 350 ms vor Bewegungsbeginn (Libet et al. 1983; Haggard and Eimer 1999; Lau et al. 2004).

Aufgrund der zeitlichen Übereinstimmung der P_{Par} mit dem von Libet beschriebenen Zeitpunkt des bewussten Willensakts, der nachweislichen Entscheidungsrelevanz der P_{Par}

sowie der Lokalisation in Kortexarealen, die mit der bewussten Intention sich zu bewegen in Zusammenhang gebracht werden, ist davon auszugehen, dass es sich bei der P_{Par} um ein unspezifisches Korrelat der Bewegungsintention handelt. Da der Deliberationsprozess zum Zeitpunkt der P_{Par} noch nicht beendet ist, i.e. Ende der $N0$ (siehe Abschnitt 4.6), wird mit der P_{Par} lediglich die Intention sich zu bewegen, jedoch nicht die genaue Ausführung der Bewegung, bewusst. Dies wird durch die Ergebnisse von Desmurget et al. unterstützt. Der Beginn der in P_{Par} terminierenden und anschließend zur $N0_{\text{Par}}$ führenden Positivierung hingegen kann als Beginn der Deliberation interpretiert werden. Diese begann während der kongruenten Aufgabe ca. 505 ms vor Tastendruck und während der inkongruenten Aufgabe ca. 545 ms vor Tastendruck. Die zeitliche Differenz zwischen dem Start der in P_{Par} terminierenden Positivität und der als Ende des Deliberationsprozesses festgelegten $N0$ darf folglich als Dauer der Deliberation angesehen werden. Da wir von einer initialen Aktivierung beider Motorkortices mit anschließender Inhibition des ipsilateralen Motorkortex ausgehen, muss die Deliberationsdauer also vom Beginn der in P_{Par} terminierenden Positivierung bis zur $N0$ des kontralateral zur Handbewegung lokalisierten Motorkortex angesetzt werden. Sie beträgt während der kongruenten Aufgabe also ca. 390 ms und während der inkongruenten Aufgabe in etwa 430 ms (*Tabelle 3-4, Tabelle 3-4*) und stimmt somit weitgehend mit der zeitlichen Differenz von rein motorischer Aufgabe und Deliberationsaufgabe von etwa 460ms überein (*Tabelle 3-1*).

Aufgrund der zeitlichen Übereinstimmung der im Parietalkortex detektierten Extrema $N0_{\text{Par}}$ und $P1_{\text{Par}}$ mit der $N0$ und der $P1_{\text{M/D}}$ der motorischen Kortexareale ist davon auszugehen, dass ihnen die gleiche elektrophysiologische Aktivität zu Grunde liegt. Dem zu Folge entspräche die $N0_{\text{Par}}$ dem Ende des Deliberationsprozesses und die $P1_{\text{Par}}$ einem Fernpotential der vermutlich im supplementär motorischen Kortex generierten prämotorischen Positivierung.

4.8 Ausblick

Im Vergleich zu früheren elektrophysiologischen Untersuchungen zu Hirnpotentialänderungen im Vorfeld von Willkürbewegungen (Kornhuber and Deecke 1964; Libet et al. 1982) wurde in dieser Studie ein verhältnismäßig großes Probandenkollektiv untersucht. Dennoch sind weitere Studien zur Bestätigung der hier berichteten zeitlichen Abfolge der hirnelektrischen Aktivität eines Deliberationsprozesses nötig. Bei den von uns untersuchten Probanden handelte es sich ausschließlich um Rechtshänder. Da ein Zusammenhang zwischen EEG-Aktivität und Händigkeit beobachtet wurde, ist bereits eine Folgestudie zur Untersuchung linkshändiger Probanden in Arbeit. Auch eine Untersuchung unterschiedlicher Altersgruppen ist zu erwägen. Des Weiteren ist eine eingehendere Auswertung weiterer Kortexareale, insbesondere frontaler Kortexareale, geplant. Zudem ist im weiteren Verlauf eine Auswertung der bereits erhobenen Daten der „Aufgabe ohne motorische Reaktion“ sowie der Lee-Phase beabsichtigt. Interessant wäre sicherlich auch eine Analyse der falsch beantworteten Durchgänge sowie eine Korrelation mit einer fMRT-Untersuchung.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde der, einer motorischen Handlung vorausgehende, Deliberationsprozess mit elektrophysiologischen Mitteln analysiert. Hierfür wurde die in parietalen und motorischen Kortexarealen ermittelte EEG-Aktivität während einer rein motorischen Aufgabe mit der einer Deliberationsaufgabe verglichen. In den Versuchen wurden insgesamt 25 rechtshändige Probanden gemessen. Während der rein motorischen Aufgabe waren die Probanden darüber instruiert mit welchem Finger sie einen visuellen Reiz beantworten sollten. Bei der Deliberationsaufgabe hingegen wurden ihnen weder zeitlich noch inhaltlich antizipierbare visuelle Stimuli präsentiert, auf die sie entweder mit einem Tastendruck der rechten oder der linken Hand reagieren sollten.

Obwohl sich die beiden Aufgabentypen bezüglich der motorischen Reaktion nicht voneinander unterschieden zeigten sich bei der Deliberationsaufgabe im Vergleich zur rein motorischen Aufgabe signifikant längere Reaktionszeiten. Daher ist davon auszugehen, dass die Differenz der Reaktionszeiten die für den Deliberationsprozess benötigte Zeit widerspiegelt.

Eine im Motorkortex beobachtete Sequenz der Komponenten $P1_{M/D}$ - $N1_{M/D}$ - $P2_{M/D}$ zeigte sich sowohl bei der rein motorischen Aufgabe als auch bei der Deliberationsaufgabe und wird daher mit der Verarbeitung der motorischen Reaktion in Verbindung gebracht.

Während der Deliberationsaufgabe zeigte sich in motorischen Kortexarealen zusätzlich die Komponente $N0$ als Ende einer lang anhaltenden Negativierung. Da sie sich deutlich vor der $P1_{M/D}$ - $N1_{M/D}$ - $P2_{M/D}$ Sequenz befand, darf davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um das Ende des Deliberationsprozesses handelt. Die $N0$ erfolgte in der ipsilateralen Hemisphäre früher als in der kontralateralen Hemisphäre. Dies lässt sich durch eine initial bilaterale

Aktivierung beider Motorkortices und einer anschließenden aktiven Inhibition des ipsilateralen Motorkortex erklären.

In parietalen Kortexarealen fiel eine Positivität P_{Par} , die der N0 um weitere 200 ms vorausging auf. Die Ergebnisse des Kepner-Randals-Test belegen eine positive Korrelation der P_{Par} mit dem Tastendruck. Somit stellt die P_{Par} das früheste entscheidungsrelevante neurophysiologische Zeichen dar und wird daher als Korrelat der Bewegungsintention interpretiert. Der Beginn der in der P_{Par} terminierenden und im weiteren Verlauf zur N0 führenden Positivität kann als Beginn der Deliberation interpretiert werden. Somit stellt die Dauer zwischen dem Beginn der Positivität sowie der in der kontralateral zur Bewegung gelegenen Hemisphäre detektierten N0 die Dauer des Deliberationsprozesses dar. Diese berechnete Deliberationsdauer beträgt in etwa 410 ms und stimmt gut mit der zeitlichen Differenz zwischen rein motorischer Aufgabe und Deliberationsaufgabe überein. Somit konnten die elektrophysiologischen Korrelate des vermuteten Deliberationsprozess zeitlich und räumlich charakterisiert werden.

6 Summary

The aim of the present study was to analyze the deliberation process preceding a motor act by electrophysiological means. For this purpose, the EEG activity obtained during a simple motor task was compared to the EEG activity of a deliberation task. The present study focuses on EEG activities above the primary and pre-motor as well as the parietal cortex. 28 right-handed subjects took part in the study. Due to technical problems the data of three subjects had to be excluded from the analysis of the EEG activity. During a simple motor task subjects were told with which finger to respond to the visual stimulus. During a deliberation task based on a color-word Stroop task they had to deliberate over which button to press. Although the tasks didn't differ with respect to the motor response significantly longer reaction times were observed during the deliberation task. Therefore, it can be assumed that the difference in response times reflects the time required for the deliberation process. The sequence of $P1_{M/D}$ - $N1_{M/D}$ - $P2_{M/D}$ potentials was found during both tasks, implying that this sequence is related to the execution of the final motor program. During deliberation task this sequence was preceded by a slowly increasing negativity terminating in a peak named $N0$. Since the $N0$ was observed clearly prior to the $P1_{M/D}$ - $N1_{M/D}$ - $P2_{M/D}$ component we assume that the $N0$ represents the end of the deliberation process. The $N0$ was observed earlier in the ipsilateral hemisphere than in the contralateral hemisphere. This can be explained by an initial bilateral activation of both hemispheres and a subsequent inhibition of the ipsilateral hemisphere. In parietal cortical areas a positivity, termed P_{Par} , preceding the $N0$ component by 200 ms was observed. The results of the Kepner-Randals test provide evidence for a positive correlation of the P_{Par} with time of key press. Thus, the P_{Par} seems to be the earliest decision-relevant electrophysiological sign and is therefore interpreted as a correlate of movement intention. The beginning of the positive slope terminating in P_{Par} and in the course leading to the $N0$ can be interpreted as the start of the deliberation process. Thus the time period between the start of the positivity and

the N0 localized in the hemisphere contralateral to the performed movement may reflect the duration of the deliberation process. The duration of the thus calculated deliberation process is about 410ms and thus corresponds well with the difference in reaction times between the simple motor task and the deliberation task.

7 Literaturverzeichnis

Adrian ED, and Matthews BHC. The interpretation of potential waves in the cortex. *Journal of Physiology-London* 81: 440-471, 1934.

Adrian ED. Double representation of the feet in the sensory cortex of the cat. *Journal of Physiology-London* 98: 16-18, 1940.

Adrian ED. Afferent discharges to the cerebral cortex from peripheral sense organs. *Journal of Physiology-London* 100: 159-191, 1941.

Alt KW, Jeunesse C, Buitrago-Tellez CH, Wächter R, Boes E, and Pichler SL. Evidence for stone age cranial surgery. *Nature* 387: 360, 1997.

Annett M. A classification of hand preference by association analysis. *British journal of psychology* 61: 303-321, 1970.

Banks WP, and Isham EA. We Infer Rather Than Perceive the Moment We Decided to Act. *Psychological science* 20: 17-21, 2009.

Berger H. Electroencephalogram in humans. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 87: 527-570, 1929.

Betz W. Anatomischer Nachweis zweier Gehirncentra. *Centralblatt für die medicinischen Wissenschaften* 12: 578-580, 595-599, 1874.

Brain WR. Visual disorientation with special reference to lesions of the right cerebral hemisphere. *Brain: a Journal of Neurology* 64: 244-272, 1941.

Breitmeyer BG. Problems with the psychophysics of intention. *Behavioral and Brain Sciences* 8: 539-540, 1985.

Bridgeman B. Free will and the functions of consciousness. *Behavioral and Brain Sciences* 8: 540, 1985.

Brinkman C. Lesions ins supplementary motor area interfere with a monkey's performance of a bimanual coordination task. *Neuroscience letters* 27: 267-270, 1981.

Broca P. Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris* 377-393, 1865.

Brodmann K. *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues.* Leipzig: Johann Ambrosius Barth Verlag, 1909.

Brunia CHM. Movement and stimulus preceding negativity. *Biological psychology* 26: 165-178, 1988.

Brunia CHM, and Damen EJP. Distribution of slow brain potentials related to motor preparation and stimulus anticipation in a time estimation task. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 69: 234-243, 1988.

Brust JCM. Lesions of the supplementary motor area. *Advances in neurology* 70: 237-248, 1996.

Caselli RJ. Ventrolateral and dorsomedial somatosensory association cortex damage produces distinct somatesthetic syndromes in humans. *Neurology* 43: 762-771, 1993.

Cattell JM. The Time it Takes to See and Name Objects. *Mind* 11: 63-65, 1886.

Cohen JD, Dunbar K, and McClelland JL. On the Control of Automatic Processes: a Parallel Distributed Processing Account of the Stroop Effect. *Psychological review* 97: 332-361, 1990.

Coles MGH. Modern Mind-Brain Reading: Psychophysiology, Physiology, and Cognition. *Psychophysiology* 26: 251-269, 1989.

Courchesne E, Hillyard SA, and Galambos R. Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 39: 131-143, 1975.

Cui RQ, Egkher A, Huter D, Lang W, Lindinger G, and Deecke L. High resolution spatiotemporal analysis of the contingent negative variation in simple or complex motor tasks and a non-motor task. *Clinical Neurophysiology* 111: 1847-1859, 2000.

De Jong R, Coles MG, Logan GD, and Gratton G. In Search of the Point of No Return: the Control of Response Processes. *Journal of experimental psychology Human perception and performance* 16: 164-182, 1990.

De N6 RL. Action potential of the motoneurons of the hypoglossus nucleus. *Journal of Cellular and Comparative Physiology* 29: 207-287, 1947.

De Renzi E, Faglioni P, and Sorgato P. Modality-specific and supramodal mechanisms of apraxia. *Brain: a Journal of Neurology* 105: 301-312, 1982.

Deecke L, Grözinger B, and Kornhuber HH. Voluntary finger movement in man: cerebral potentials and theory. *Biological Cybernetics* 23: 99-119, 1976.

Der G, and Deary IJ. Age and Sex Differences in Reaction Time in Adulthood: Results from the United Kingdom Health and Lifestyle Survey. *Psychology and Aging* 21: 62-73, 2006.

Des-Cartes R. *Meditationes de prima philosophia, in qua Dei existentia et animae immortalitas demonstratur.* Parisiis: Apud Michaellem Soly, 1641.

Desmurget M, Reilly KT, Richard N, Szathmari A, Mottolese C, and Sirigu A. Movement Intention After Parietal Cortex Stimulation in Humans. *Science* 324: 811-813, 2009.

Desmurget M, and Sirigu A. Conscious motor intention emerges in the inferior parietal lobule. *Current Opinion in Neurobiology* 22: 1004-1011, 2012.

DeSoto MC, Fabiani M, Geary DC, and Gratton G. When in Doubt, Do it Both Ways: Brain Evidence of the Simultaneous Activation of Conflicting Motor Responses in a Spatial Stroop Task. *Journal of cognitive neuroscience* 13: 523-536, 2001.

Donchin E. Surprise!...Surprise? *Psychophysiology* 18: 493-513, 1981.

Donchin E, and Coles MGH. Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences* 11: 357-374, 1988.

Dunbar K, and MacLeod CM. A Horse Race of a Different Color: Stroop Interference Patterns With Transformed Words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 10: 622-639, 1984.

Dykiert D, Der G, Starr JM, and Deary IJ. Sex Differences in Reaction Time Mean and Intraindividual Variability Across the Life Span. *Developmental Psychology* 48: 1262-1276, 2012.

Evans KM, and Federmeier KD. The memory that's right and the memory that's left: Event-related potentials reveal hemispheric asymmetries in the encoding and retention of verbal information. *Neuropsychologia* 45: 1777-1790, 2007.

Ferrier D. Experimental Researches in Cerebral Physiology and Pathology. *The British Medical Journal* 1: 457, 1873.

Freunberger R, Klimesch W, Doppelmayr M, and Höller Y. Visual P2 component is related to theta phase-locking. *Neuroscience letters* 426: 181-186, 2007.

- Frey SH, Funnell MG, Gerry VE, and Gazzaniga MS.** A Dissociation between the Representation of Tool-use Skills and Hand Dominance: Insights from Left- and Right-handed Callosotomy Patients. *Journal of cognitive neuroscience* 17: 262-272, 2005.
- Friedman D, and Johnson R.** Event-Related Potential (ERP) Studies of Memory Encoding and Retrieval: A Selective Review. *Microscopy Research and Technique* 51: 6-28, 2000.
- Fritsch GT, and Hitzig E.** Über die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin* 300–332, 1870.
- Fulton JF.** A note on the definition of the "motor" and "premotor " areas. *Brain: a Journal of Neurology* 58: 311-316, 1935.
- Gaillard AWK.** Effects of warning-signal modality on the contingent negative variation. *Biological psychology* 4: 139-154, 1976.
- Galin D, Ornstein R, Herron J, and Johnstone J.** Sex and Handedness Differences in EEG Measures of Hemispheric Specialization. *Brain and Language* 16: 19-55, 1982.
- Gerstmann J.** Fingeragnosie: Eine umschriebene Störung der Orientierung am eigenen Körper. *Wiener Klinische Wochenschrift* 37: 1010-1012, 1924.
- Gnadt JW, and Andersen RA.** Memory related motor planning activity in posterior parietal cortex of macaque. *Experimental Brain Research* 70: 216-220, 1988.
- Gomes G.** The Timing of Conscious Experience: A Critical Review and Reinterpretation of Libet's Research. *Consciousness and cognition* 7: 559-595, 1998.
- Goodin DS, Aminoff MJ, Ortiz TA, and Chequer RS.** Response times and handedness in simple reaction-time tasks. *Experimental Brain Research* 109: 117-126, 1996.
- Haggard P, and Eimer M.** On the relation between brain potentials and the awareness of voluntary movements. *Experimental Brain Research* 126: 128-133, 1999.
- Haggard P.** The Sources of Human Volition. *Science* 324: 731-733, 2009.
- Heil M, Osman A, Wiegelmann J, Rolke B, and Hennighausen E.** N200 in the Eriksen-Task: Inhibitory Executive Processes? *Journal of Psychophysiology* 14: 218-225, 2000.

- Herrmann CS, Pauen M, Min BK, Busch NA, and Rieger JW.** Analysis of a choice-reaction task yields a new interpretation of Libet's experiments. *International Journal of Psychophysiology* 67: 151-157, 2008.
- Holmes G.** Disturbances of visual orientation. *The British Journal of Ophthalmology* 2: 449-468, 1918.
- Homan RW, Herman J, and Purdy P.** Cerebral location of international 10-20 system electrode placement. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 66: 376-382, 1987.
- Hubel DH, and Wiesel TN.** Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of physiology* 160: 106-154, 1962.
- Huster RJ, Debener S, Eichele T, and Herrmann CS.** Methods for Simultaneous EEG-fMRI: An Introductory Review. *The Journal of Neuroscience* 32: 6053-6060, 2012.
- Ikeda A, Shibasaki H, Nagamine T, Terada K, Kaji R, Fukuyama H, and Kimura J.** Dissociation between contingent negative variation and Bereitschaftspotential in a patient with cerebellar efferent lesion. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 90: 359-364, 1994.
- Ives JR, Warach S, Schmitt F, Edelman RR, and Schomer DL.** Monitoring the patient's EEG during echo planar MRI *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 87: 417-420, 1993.
- Jackson JH.** On the Anatomical Investigation of Epilepsy and Epileptiform Convulsions. *The British Medical Journal* 1: 531-533, 1873.
- Jackson JH.** The Croonian Lectures on Evolution and Dissolution of the Nervous System. *The British Medical Journal* 1: 703-707, 1884.
- Jasper HH.** The ten twenty electrode system of the international Federation. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 10: 371-375, 1958.
- Johnson-Frey SH, Newman-Norlund R, and Grafton ST.** A Distributed Left Hemisphere Network Active During Planning of Everyday Tool Use Skills. *Cerebral Cortex* 15: 681-695, 2005.
- Johnson R.** On the neural generators of the P300 component of the event-related potential. *Psychophysiology* 30: 90-97, 1993.

Junghöfer M, Elbert T, Tucker DM, and Braun C. The polar average reference effect: a bias in estimating the head surface integral in EEG recording. *Clinical Neurophysiology* 110: 1149-1155, 1999.

Kahneman D, and Chajczyk D. Tests of the automaticity of reading: dilution of Stroop effects by color-irrelevant stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 9: 497-509, 1983.

Kail R. Developmental change in speed of processing during childhood and adolescence. *Psychological Bulletin* 109: 490-501, 1991.

Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM, Siegelbaum SA, and Hudspeth AJ. *Principles of neural science*. McGraw Hill Professional, 2013.

Kepner JL, and Randles RH. Detecting Unequal Marginal Scales in a Bivariate Population. *Journal of the American Statistical Association* 77: 475-480, 1982.

Kok A. On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology* 38: 557-577, 2001.

Kopp B, Rist F, and Mattler U. N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology* 33: 282-294, 1996.

Kornhuber HH, and Deecke L. Hirnpotentialänderungen beim Menschen vor und nach Willkürbewegungen, dargestellt mit Magnetbandspeicherung und Rückwärtsanalyse. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology* 281: 52, 1964.

Kutas M, and Hillyard SA. Reading Senseless Sentences: Brain Potentials Reflect Semantic Incongruity. *Science* 207: 203-205, 1980.

Kutas M, and Federmeier KD. Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-related Brain Potential (ERP). *Annual review of psychology* 62: 621-647, 2011.

Kutz DF, Fattori P, Gamberini M, Breviglieri R, and Galletti C. Early- and late-responding cells to saccadic eye movements in the cortical area V6A of macaque monkey. *Experimental Brain Research* 149: 83-95, 2003.

Laszlo S, and Federmeier KD. The N400 as a snapshot of interactive processing: evidence from regression analyses of orthographic neighbor and lexical associate effects. *Psychophysiology* 48: 176-186, 2011.

Lau HC, Rogers RD, Haggard P, and Passingham RE. Attention to Intention. *Science* 303: 1208-1210, 2004.

Lau HC, Rogers RD, and Passingham RE. Manipulating the Experienced Onset of Intention after Action Execution. *Journal of cognitive neuroscience* 19: 81-90, 2007.

Li CL, and Jasper H. Microelectrode Studies Of The Electrical Activity Of The Cerebral Cortex In The Cat. *The Journal of physiology* 121: 117-140, 1953.

Libet B, Wright EW, Jr., and Gleason CA. Readiness-potentials preceding unrestricted 'spontaneous' vs. pre-planned voluntary acts. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 54: 322-335, 1982.

Libet B, Gleason CA, Wright EW, and Pearl DK. Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain: a Journal of Neurology* 106: 623-642, 1983.

Libet B. Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *The Behavioral and Brain Sciences* 8: 529-539, 1985.

Liepmann H. *Drei Aufsätze aus dem Apraxiegebiet.* Berlin: Karger, 1908.

Liepmann H. Apraxie. In: *Ergebnisse der gesamten Medizin*, edited by Brugsch H. Wien, Berlin: Urban & Schwarzenberg, 1920.

Loveless NE, and Sanford AJ. Effects of Age on Contingent Negative Variation and Preparatory Set in a Reaction Time Task. *Journal of Gerontology* 29: 52-63, 1974.

Luck SJ, and Hillyard SA. Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology* 31: 291-308, 1994.

MacLeod CM. Half a Century of Research on the Stroop Effect: an Integrative Review. *Psychological Bulletin* 109: 163-203, 1991.

Matelli M, Luppino G, Fogassi L, and Rizzolatti G. Thalamic Input to Inferior Area 6 and Area 4 in the Macaque Monkey. *The Journal of comparative neurology* 280: 468-488, 1989.

Matsushashi M, and Hallett M. The timing of the conscious intention to move. *European Journal of Neuroscience* 28: 2344-2351, 2008.

Meindl T, Schmid BC, Timmann D, Kolb FP, and Kutz DF. Contribution of the Cerebellum to the Coupling of Grip Force and Pull Force During an Isometric Precision Grip Task. *Cerebellum* 11: 167-180, 2011.

Mishkin M. Analogous neural models for tactual and visual learning. *Neuropsychologia* 17: 139-151, 1979.

Morton J, and Chambers SM. Selective attention to words and colours. *Quarterly journal of experimental psychology* 25: 387-397, 1973.

Mountcastle VB. Modality and topographic properties of single neurons of cat's somatic sensory cortex *Journal of neurophysiology* 20: 408-434, 1957.

Mountcastle VB, Lynch JC, Georgopoulos A, Sakata H, and Acuna C. Posterior Parietal Association Cortex of the Monkey: Command Functions for Operations Within Extrapersonal Space. *Journal of neurophysiology* 38: 871-908, 1975.

Näätänen R. Brain physiology and the unconscious initiation of movements. *Behavioral and Brain Sciences* 8: 549, 1985.

Nida-Rümelin J. *Über menschliche Freiheit.* Stuttgart: Reclam, 2005.

Patel SH, and Azzam PN. Characterization of N200 and P300: Selected Studies of the Event-Related Potential. *International Journal of Medical Sciences* 2: 147-154, 2005.

Penfield W, and Boldrey E. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain: a Journal of Neurology* 60: 389-443, 1937.

Peterson J, Lanier LH, and Walker HM. Comparisons of white and negro children in certain ingenuity and speed tests. In: *Journal of Comparative Psychology*, edited by Solso RL1925, p. 271-291.

Polich J. Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology* 118: 2128-2148, 2007.

Posner MI, Klein R, Summers J, and Buggie S. On the selection of signals. *Memory and Cognition* 1: 2-12, 1973.

Posner MI, and Snyder CRR. Attention and cognitive control. In: *Information Processing and Cognition: The Loyola Symposium*, edited by Solso RL. New York: Halsted Press, 1975.

Prinz W. Freiheit oder Wissenschaft. In: *Freiheit des Entscheidens und Handelns Ein Problem der nomologischen Psychologie*, edited by M. v. Cranach KF. Heidelberg: Asanger, 1996, p. 86-103.

Provins KA, and Cunliffe P. The relationship between E.E.G. activity and handedness. *Cortex* 8: 136-146, 1972.

Rabovsky M, and McRae K. Simulating the N400 ERP component as semantic network error: Insights from a feature-based connectionist attractor model of word meaning. *Cognition* 132: 68-89, 2014.

Rizzolatti G, Camarda R, Fogassi L, Gentilucci M, Luppino G, and Matelli M. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. II. Area F5 and the control of distal movements. *Experimental Brain Research* 71: 491-507, 1988.

Rizzolatti G, Luppino G, and Matelli M. The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 106: 283-296, 1998.

Roland PE, Larsen B, Lassen NA, and Skinhoj E. Supplementary Motor Area and Other Cortical Areas in Organization of Voluntary Movements in Man. *Journal of neurophysiology* 43: 118-136, 1980.

Roth G. *Aus Sicht des Gehirns*. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 2003.

Ruchkin DS, Sutton S, Mahaffey D, and Glaser J. Terminal CNV in the absence of motor response. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 63: 445-463, 1986.

Rugg MD, Mark RE, Walla P, Schloerscheidt AM, Birch CS, and Allan K. Dissociation of the neural correlates of implicit and explicit memory. *Nature* 392: 595-598, 1998.

Rugg MD, and Curran T. Event-related potentials and recognition memory. *Trends in cognitive sciences* 11: 251-257, 2007.

Salthouse TA. The Processing-Speed Theory of Adult Age Differences in Cognition. *Psychological review* 103: 403-428, 1996.

Shibasaki H, Barrett G, Halliday E, and Halliday AM. Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 49: 213-226, 1980.

Shibasaki H, and Hallett M. What is the Bereitschaftspotential? *Clinical Neurophysiology* 117: 2341-2356, 2006.

Simson R, Vaughan HG, and Ritter W. The scalp topography of potentials in auditory and visual go-nogo tasks. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 43: 864-875, 1977.

Singer W. *Ein neues Menschenbild? Gespräche über Hirnforschung.* Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 2003.

Sirigu A, Daprati E, Ciancia S, Giraux P, Nighoghossian N, Posada A, and Haggard P. Altered awareness of voluntary action after damage to the parietal cortex. *Nature neuroscience* 7: 80-84, 2004.

Soon CS, Brass M, Heinze HJ, and Haynes JD. Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature neuroscience* 11: 543-545, 2008.

Steinhausen M, and Gulbins E. *Medizinische Physiologie.* Ecomed Verlagsgesellschaft, 2003.

Stroop JR. Studies of Interference in Serial Verbal Reactions. *J Exp Psychol* 18: 643-662, 1935.

Sutton S, Braren M, Zubin J, and John ER. Evoked-Potential Correlates of Stimulus Uncertainty. *Science* 150: 1187-1188, 1965.

Szűcs D, Soltész F, Czigler I, and Csépe V. Electroencephalography effects to semantic and non-semantic mismatch in properties of visually presented single-characters: The N2b and the N400. *Neuroscience letters* 412: 18-23, 2007.

Szűcs D, Soltesz F, and White S. Motor conflict in Stroop tasks: Direct evidence from single-trial electro-myography and electro-encephalography. *NeuroImage* 47: 1960-1973, 2009.

Szűcs D, Killikelly C, and Cutini S. Event-related near-infrared spectroscopy detects conflict in the motor cortex in a Stroop task. *Brain research* 1477: 27-36, 2012.

Tecce JJ. Contingent negative variation (CNV) and psychological processes in man. *Psychological Bulletin* 77: 73-108, 1972.

Toma K, Matsuoka T, Immisch I, Mima T, Waldvogel D, Koshy B, Hanakawa T, Shill H, and Hallett M. Generators of Movement-Related Cortical Potentials: fMRI-Constrained EEG Dipole Source Analysis. *NeuroImage* 17: 161-173, 2002.

- Trevena J, and Miller J.** Cortical Movement Preparation before and after a Conscious Decision to Move. *Consciousness and cognition* 11: 162-190, 2002.
- Trevena J, and Miller J.** Brain preparation before a voluntary action: Evidence against unconscious movement initiation. *Consciousness and cognition* 19: 447-456, 2010.
- Tucker DM.** Spatial sampling of head electrical fields: the geodesic sensor net. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 87: 154-163, 1993.
- Ungerleider L, and Mishkin M.** Two cortical visual systems. In: *Analysis of Visual Behavior*, edited by Ingle D, Goodale M, and Mansfield R. Cambridge: MIT Press, 1982, p. 549-586.
- Vaughan HG, Costa LD, and Ritter W.** Topography of the human motor potential. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 25: 1-10, 1968.
- Vaughan HG, and Ritter W.** The sources of auditory evoked responses recorded from the human scalp. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 28: 360-367, 1970.
- Verleger R.** Event-related potentials and cognition - A critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of P3. *Behavioral and Brain Sciences* 11: 343-356, 1988.
- Verleger R, Jaskowski P, and Wascher E.** Evidence for an Integrative Role of P3b in linking Reaction to Perception. *Journal of Psychophysiology* 19: 165-181, 2005.
- Walter WG.** Slow Potential Waves in the Human Brain Associated with Expectancy, Attention and Decision. *Archiv fur Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 206: 309-322, 1964.
- Walter WG, Cooper R, Aldridge VJ, McCallum WC, and Winter AL.** Contingent negative variation: an electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature* 203: 380-384, 1964.
- Weerts TC, and Lang PJ.** The effects of eye fixation and stimulus and response location on the contingent negative variation (CNV). *Biological psychology* 1: 1-19, 1973.
- Wernicke C.** *Der aphasische Symptomencomplex: Eine psychologische Studie auf anatomischer Basis.* Breslau: M. Cohn & Weigert, 1874.
- Wilcoxon F.** Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin* 1: 80-83, 1945.

Wilding EL, and Rugg MD. An event-related potential study of recognition memory with and without retrieval of source. *Brain: a Journal of Neurology* 119: 889-905, 1996.

Wise SP. The primate premotor cortex: past, present, and preparatory. *Annual Review of Neuroscience* 8: 1-19, 1985.

Woolsey CN. "Second" somatic receiving areas in the cerebral cortex of cat, dog and monkey. *Federation proceedings* 2: 55, 1943.

Zhang HQ, Murray GM, Turman AB, Mackie PD, Coleman GT, and Rowe MJ. Parallel Processing in Cerebral Cortex of the Marmoset Monkey: Effect of Reversible SI Inactivation on Tactile Responses in SII. *Journal of neurophysiology* 76: 3633-3655, 1996.

Zhu J. Reclaiming Volition - An Alternative Interpretation of Libet's Experiment. *Journal of Consciousness Studies* 10: 61-77, 2003.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Hirnkarte Brodmanns.....	15
Abbildung 2-1: 61-Kanal EEG der Firma Easy Cap (Herrsching, Germany).....	22
Abbildung 3-1: Reaktionszeiten der verschiedenen Aufgabentypen im Box-Plot.....	32
Abbildung 3-2: EEG-Aktivität vor Stimuluspräsentation.....	35
Abbildung 3-3: Stimulus ausgerichtete Mittelwerte der Deliberationsaufgabe.....	38
Abbildung 3-4: Mittelwerte der hirnelektrischen Aktivität der für diese Arbeit untersuchten Elektrodenpositionen während der "kongruenten Aufgabe"	39
Abbildung 3-5: Streudiagramme der Latenz und ihrer Standardabweichung für alle Extrema und Aufgabentypen	41
Abbildung 3-6: Balkendiagramm der Aktivität an Elektrode P9 und P10.....	44
Abbildung 3-7: Balkendiagramm der Aktivität an Elektrode C3 und C4.....	46
Abbildung 3-8: Balkendiagramm der Amplituden motorischer Kortexareale.....	47
Abbildung 3-9: Quartilmittelwerte der Elektroden CP1/P1 und CP2/P2 des Probanden Ys07.....	49
Abbildung 3-10: Quartilmittelwert der Elektroden C3 und C4 des Probanden Ys07	51
Abbildung 3-11: Auf den Tastendruck ausgerichtete Amplitudenmittelwerte des Motorkortex	53
Abbildung 3-12: Bestimmung des Beginns der in N0 terminierenden Negativität am Beispiel von Elektrode C3	56
Abbildung 3-13: N0 ausgerichtete Gesamtmittelwerte während der Deliberationsaufgabe	58
Abbildung 3-14: Auf die P _{Par} ausgerichtete Mittelwerte des Parietalkortex	62

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Basisdaten der 28 gesunden Probanden deren Reaktionszeiten in die Analyse eingegangen sind	20
Tabelle 2-2: Aufgaben/Messungen in zeitlicher Abfolge mit Wiederholungen	26
Tabelle 3-1: Reaktionszeiten der rein motorischen Aufgabe, der Lern- und der Testaufgabe	31
Tabelle 3-2: T-Test bei verbundenen Stichproben zum Vergleich der Reaktionszeiten der verschiedenen Aufgabentypen	33
Tabelle 3-3: Latenzen und Amplituden der Extrema während der Deliberationsaufgabe	43
Tabelle 3-4: Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte der rein motorischen sowie der Deliberationsaufgabe	53
Tabelle 3-5: Analyse der auf den Tastendruck ausgerichteten Mittelwerte während der Deliberationsaufgabe	62

10 Abkürzungsverzeichnis

In diesem Verzeichnis sind SI-Einheiten, sowie im Duden zu findende Abkürzungen nicht aufgeführt.

BP	Bereitschaftspotential
CNV	contingent negative variation
Cz	Vertelexektrode
EEG	Elektroenzephalographie
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
Gnd	Erdungselektrode
ITI	Intertrialintervall
LPC	late positive component
MI	primär motorischer Kortex
NS	negative slope
PMA	prämotorischer Kortex
PPC	posterior parietaler Kortex
Ref	Referenzelektrode
S1	Warnstimulus
S2	imperativer Stimulus
SI	primär somatosensorischer Kortex
SII	sekundär somatosensorischer Kortex
SMA	supplementär motorischer Kortex
SPN	stimulus preceding negativity
VEP	visuell evoziertes Potential

11 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Bedanken die direkt oder indirekt am positiven Gelingen dieser Doktorarbeit beigetragen haben.

Zu besonderem Dank bin ich meinem Betreuer Herrn PD. Dr. Kutz für seine fachliche Unterstützung, die Programmierung von R sowie seine unermüdliche Hilfe bei der Auswertung der Daten verpflichtet. Seiner Unterstützung ist es zu verdanken, dass die Arbeit in der vorliegenden Form entstehen konnte.

Des Weiteren möchte mich bei Herr Prof. Dr. Kolb für seine Hilfsbereitschaft und guten Ratschläge sowie für seine Unterstützung meiner beruflichen Pläne bedanken. Durch seine freundliche und hilfsbereite Art hat mir die Arbeit stets Spaß gemacht.

Ich danke Ingrid Rosso und Matthias Moosburger für die harmonische Teamarbeit bei der Durchführung der Versuche.

Bei allen Probanden möchte ich mich für ihre Teilnahme an unseren Versuchen bedanken.

Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und meinem Mann, die mich stets unterstützt und mir Mut zugesprochen haben.

12 Anhang

12.1 Probandenanweisung

Setzen Sie sich bitte entspannt auf den Stuhl, überschlagen Sie bitte nicht Ihre Beine und Arme und bewegen Sie sich möglichst wenig. Fixieren Sie beim Versuch den Punkt in der Mitte des Bildschirms.

Falls Sie müde werden, informieren Sie bitte den Experimentator. Es kann jederzeit eine Pause eingelegt werden.

- 1: Im ersten Versuch sehen Sie ein Schachbrettmuster, das in schneller Abfolge umspringt. Fixieren Sie den Punkt in der Mitte des Bildschirms.
- 2: Jetzt im zweiten Experiment sehen Sie Schriftzüge in verschiedenen Farben. Die Intervalle zwischen den einzelnen Bildern sind länger als im vorherigen Experiment. Fixieren Sie den Fixationspunkt.
3. Sie sehen jetzt einen Pfeil, der nach rechts weist. Drücken Sie mit der rechten Hand die rote Taste (*mit der Hand Taste zeigen*) sobald der Pfeil erscheint. Lassen Sie die andere Hand ruhig auf der Tischplatte liegen.
4. Nun erscheinen Pfeile nach links. Drücken Sie mit der linken Hand die blaue Taste sobald der Pfeil erscheint. Lassen Sie die andere Hand ruhig auf der Tischplatte liegen.
5. Es erscheinen wiederum die gleichen Schriftzüge, wie beim 2. Versuchsteil. Wenn ein Wort erscheint, dessen Textinhalt mit der präsentierten Textfarbe übereinstimmt, z.B. das Wort „rot“ in roter Farbe, drücken Sie mit der rechten Hand die rote Taste. Erscheint ein Wort, dessen Textinhalt nicht mit der Textfarbe übereinstimmt z.B. das Wort „rot“ in blauer Farbe, drücken Sie mit der linken Hand die blaue Taste. Also „rot“ in rotem Schriftzug bedeutet rote Taste drücken, rot in blauem, grünem,

rosa, ... Schriftzug blaue Taste drücken. Ausnahme: wenn der Schriftzug „Schwarz“ in der Farbe schwarz erscheint keine Taste drücken.

Drücken Sie die Tasten zügig aber nicht hektisch. Es kommt sowohl auf Zeit als auch auf Genauigkeit an.

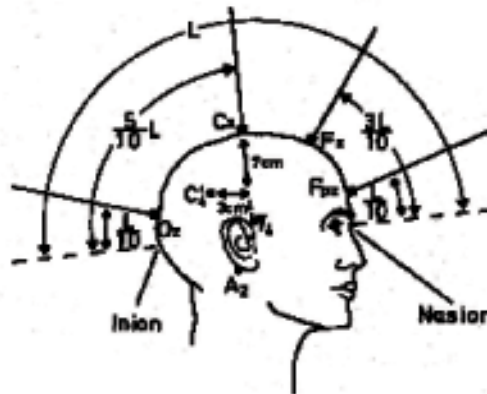
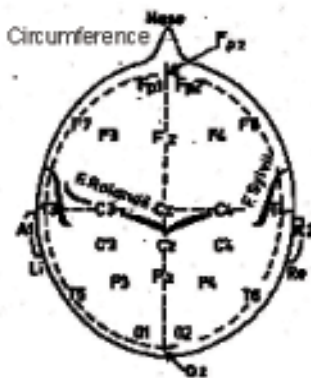
6. Im folgenden Experiment erscheinen die gleichen Schriftzüge, wie in dem Versuchsteil davor. Drücken Sie diesmal keine der Tasten, sondern stellen Sie sich nur vor wie Sie handeln würden.
7. Nun erscheinen wieder die gleichen Schriftzüge. Drücken Sie, wie in der vorletzten Phase, die rote Taste für übereinstimmende, die linke Taste für nicht übereinstimmende Farben und keine Taste falls der Schriftzug „Schwarz“ in schwarz erscheint. Es werden 3 Durchläufe dieses Versuchsteils durchgeführt, zwischen denen eine kurze Pause gemacht wird.

Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme!!!

12.2 Versuchsprotokoll

Delib Test (Versuchsprotokoll)		Beschr.:	
Datum:	Geschlecht:		
Name:	geb.	Händ.kt:	
Ort:	Str	Tel.:	

EEG, Trigger		references, other	
montage		internal ref	
filter: ZK		external ref (red)	
filter: HF		subj GND (brown)	
filter: notch		hand GND	
REF		distance	
polarity		Screen size	
		Text(x/y%screen)	
		focus button(% screen)	
		camera	
trig: main (1), match (3), mism (5), TT0 (7), TT1 (9), TT2 (11), wrong (13), correct (15)		cap color	



L [cm]:

Circumference [cm]:

Type	parameter file	protocol file	recorded file
VEP1			
VEP 2			
arrow right			
arrow left			
Text learn			
Text leer			
Text			

12.3 Aufklärung

Lehrstuhl für Physiologische Genomik
 PHYSIOLOGISCHES INSTITUT
 Vorstand: Professor Dr. Magdalena Götz
 Medizinische Fakultät
 Ludwig-Maximilians-Universität München

_____ **LMU**
 Ludwig _____
 Maximilians-
 Universität _____
 München _____

Physiologisches Institut, Pettenkoferstrasse 18, 80336 München

Projekttitle: Untersuchung der zeitlichen
 Abfolge hirnelektrischer
 Aktivität vom reizabhängigen
 Deliberationsprozess bis zur
 motorischen Handlung

Prof. Dr. Florian Kolb
 Pettenkoferstr. 12
 80336 München
 Telefon: 49-89/2180 -75 -224
 Telefax: 49-89/2180 -75 -216

e-mail: f.kolb@lmu.de

<http://www.gencom.physiol.med.uni-muenchen.de/index.html>

Projektleiter: Professor Dr. Julian Nida-Rümelin, Lehrstuhl für Philosophie, Fakultät für Philosophie,
 Wissenschaftstheorie und Religionswissenschaft

techn. Projektleiter: Professor Dr. Florian P. Kolb

1. März 2012

Probandeninformation und Einverständniserklärung

Wie heißt die Untersuchung? Wir möchten Sie einladen, an einer Untersuchung zur zeitlichen Abfolge hirnelektrischer Aktivität von einem reizabhängigen Deliberationsprozess bis hin zur motorischen Handlung teilzunehmen. Wir untersuchen im Augenblick junge, gesunde, rechtshändige Probanden.

Wer führt die Untersuchung durch? Die Untersuchung wird von Herrn Prof. Dr. F.P. Kolb durchgeführt, der am Physiologischen Institut der Universität München (Institutsvorstand Frau Professor Dr. M. Götz, Tel.: 089-2180 75255) tätig ist.

Was wird gemacht? Die Untersuchung soll helfen zu klären, wie die zeitliche Abfolge eines Entscheidungsfindungsprozesses (Deliberation) im Gehirn organisiert ist.

Dazu sitzen Sie vor einem Bildschirm, auf dem ein Schachbrettmuster mit einem zentralen Fixationspunkt angezeigt wird. In zufälligen Abständen springt das Schachbrettmuster um. Mit dem Umspringen des Musters erscheint mittig ein Feld mit einem farbigen Text, wonach Sie sich entscheiden, mit der rechten oder mit der linken Hand eine Taste zu betätigen. Es gibt auch Textformen, bei denen Sie als Entscheidung keine Taste drücken. Die verschiedenen Texte sowie deren zeitliches Auftreten ist zufällig.

Vorab werden Kontrollmessungen durchgeführt zur individuellen Repräsentation visueller Reize im Gehirn und zur individuellen Reaktionszeit bei Tastendruck mit der rechten bzw. linken Hand. Dazu erscheint mit dem Umspringen des Schachbrettmusters anstelle des Textes ein Pfeil, dessen Richtung die zu betätigende Hand vorgibt.

Während dieser Experimente wird die hirnelektrische Aktivität mit der in der Klinik üblichen Mehrkanal-Elektroencephalographie (EEG)-Technik erfasst. Die dafür verwendeten kreisförmigen Elektroden sind in eine handelsüblich EEG-Haube eingearbeitet, durch die eine Kontaktgel auf Ihre Kopfhaut aufgetragen wird, das z.B. auch bei Ultraschalluntersuchungen oder bei EKG Ableitungen verwendet wird.

Die Gesamtdauer des Experiments beträgt etwa 4 Stunden. Der wiederholte Entscheidungsfindungsprozess kann ermüdenden sei, weshalb während der Messungen Pausen eingelegt werden. Es sind keinerlei Nebenwirkungen oder Risiken zu erwarten. Wir bitten Sie, am Tag der Messung zuhause eine Kopfwäsche vorzunehmen.

Vertraulichkeit der Untersuchungsergebnisse: Alle Untersuchungsergebnisse werden streng vertraulich behandelt. Bei einer wissenschaftlichen Veröffentlichung der Ergebnisse bleibt Ihre Anonymität gewahrt.

Versicherungsschutz: Es wird darauf hingewiesen, dass keine verschuldensunabhängige Versicherung noch eine Wegeversicherung abgeschlossen wurde.

Einverständniserklärung

Ich habe den vorliegenden Aufklärungsbogen gelesen. Alle meine Fragen sind von den Untersuchern beantwortet worden. Ich habe verstanden, dass die Teilnahme an der Untersuchung freiwillig ist und von mir jederzeit abgebrochen werden kann. Meine Unterschrift bestätigt, dass ich den Aufklärungsbogen gelesen habe und dass ich bereit bin an dieser Untersuchung teilzunehmen.

Datum: _____ Unterschrift des Probanden

_____ Unterschrift des techn. Projektleiters