

Aus der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. Hans-Jürgen Möller

Untersuchung von Alterseffekten auf neuronale Korrelate exekutiver Funktionen und ihrer Lokalisation

**Dissertation zum Erwerb des Doktorgrades der
Medizin an der medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München**

vorgelegt von
Sylvère Störmann

aus Köln

2012

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Christoph Mulert

Mitberichterstatter: Priv.-Doz. Dr. Jennifer Linn

Mitbetreuung durch die
promovierte Mitarbeiterin: Dr. Dipl.-Psych. Susanne Karch

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. Maximilian Reiser, FACR, FRCR

Tag der mündlichen Prüfung: 10.05.2012

„Ein leeres Vorurteil ist das Alter.
Die schöne Frucht von dem trüben Wahn,
daß der Geist abhängt vom Körper.“

Friedrich Daniel Ernst Schleiermacher, (1768 - 1834)

Inhalt

1. EINLEITUNG	1
1.1. Exekutive Funktionen	1
1.1.1. Arbeitsgedächtnis	2
1.1.2. Neuroanatomische Lokalisierung	3
1.2. Verhaltensinhibition	5
1.2.1. Verhaltensexperimente	5
1.2.1.1. Go/NoGo	6
1.2.1.2. Stroop-Test	7
1.2.2. EEG und Bildgebung in der Inhibitionsforschung	8
1.3. Entscheidungsprozesse und Handlungskontrolle	10
1.3.1. Verhaltensexperimente	11
1.3.1.1. Turm von Hanoi und Turm von London	12
1.3.1.2. Wisconsin Card Sorting Test	13
1.3.2. EEG und Bildgebung in der Volitionsforschung	14
1.4. Untersuchungsmethoden	16
1.4.1. Elektroenzephalografie und ereigniskorrelierte Potenziale	16
1.4.1.1.1. N1/N100	17
1.4.1.1.2. N2/N200	18
1.4.1.1.3. P3/P300	18
1.4.2. Bildgebende Verfahren	19
1.5. Alter und ereignis-korrelierte Potenziale	20
2. FRAGESTELLUNGEN	24
3. METHODEN	25
3.1. Probanden	25
3.1.1. Einschlusskriterien	25
3.1.2. Ausschlusskriterien	26
3.1.3. Beschreibung der Stichprobe	26
3.1.4. Psychometrische Untersuchung	26
3.1.4.1. Soziodemografischer Fragebogen	27
3.1.4.2. Beck-Depressions-Inventar (BDI)	27
3.1.4.3. Überarbeitete Symptom-Checkliste (SCL-90-R)	27
3.1.4.4. State-Trait-Angstinventar (STAI)	27
3.1.4.5. State-Trait-Ärgerausdrucksinventar (STAXI)	27
3.1.4.6. Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung (VAS)	27
3.2. Versuchsanordnung	28
3.3. Untersuchungstechnik	29
3.3.1. Generierung akustischer Stimuli und Antwort-Aufzeichnung	29
3.3.2. EEG	29
3.3.2.1. Aufzeichnung	29
3.3.2.2. Auswertung	30
3.4. Statistik	31
3.4.1. Ausreißeranalyse	31

3.4.2. Gruppenvergleiche	32
3.4.3. MANOVA mit Messwiederholung	32
3.4.4. t-Tests	32
3.4.5. Mann-Whitney-U-Test	32
3.4.6. Korrelationen	33
3.4.7. Signifikanz	33
4. ERGEBNISSE	34
4.1. Jüngere Probanden	34
4.1.1. Verhaltensdaten	34
4.1.2. Elektrophysiologische Daten	35
4.1.2.1. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Bedingungen	35
4.1.2.2. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Entscheidungsreaktion	37
4.1.3. Korrelationen Verhaltens- zu elektrophysiologischen Daten	39
4.2. Ältere Probanden	39
4.2.1. Verhaltensdaten	39
4.2.2. Elektrophysiologische Daten	40
4.2.2.1. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Bedingungen	40
4.2.2.2. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Entscheidungsreaktion	42
4.2.3. Korrelationen Verhaltens- zu elektrophysiologischen Daten	44
4.3. Vergleich: jüngere und ältere Probanden	44
4.3.1. Verhaltensdaten	44
4.3.2. Geschlechtseffekte	45
4.3.3. Multivariate Varianzanalysen der elektrophysiologischen Daten	45
4.3.4. Korrelationen des Alters zu elektrophysiologischen Daten	49
4.3.5. Mittelwertvergleiche der elektrophysiologischen Daten	50
4.3.6. Korrelationen Verhaltens- zu elektrophysiologischen Daten	52
4.3.7. Motivation und Anstrengungsbereitschaft	53
4.3.8. Mittelwertvergleiche Schnell- vs. Langsam-Antworter	56
5. DISKUSSION	57
6. ZUSAMMENFASSUNG	64
7. LITERATUR	66
8. ANHANG	103
8.1. Soziodemografischer Fragebogen	103
8.2. Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung (VAS)	106
9. DANKSAGUNG	107
10. CURRICULUM VITAE	110

1. Einleitung

1.1. Exekutive Funktionen

Der neurowissenschaftliche Begriff „Exekutive Funktionen“ bezeichnet mentale Funktionen, die das Verhalten eines Individuums in Abhängigkeit von dessen inneren und äußeren Umständen bestimmen. Hierzu zählen das Setzen von Zielen, Planung, Entscheidung für Prioritäten, Impulskontrolle, emotionale Regulation, Aufmerksamkeitssteuerung, zielgerichtetes Initiieren und Sequenzieren von Handlungen, motorische Steuerung, Beobachtung der Handlungsergebnisse und Selbstkorrektur. Lezak fasst vereinfachend hierzu eben jene kognitiven Kontrollprozesse, die die selbstständige und situationsgerechte Ausführung von Handlungen ermöglichen, zusammen (Lezak et al., 2004).

Der Begriff „Exekutive Funktionen“ umfasst demnach ein heterogenes und kontrovers diskutiertes Konzept unterschiedlicher Leistungen des Gehirns, das sich einer einheitlichen Definition entzieht (Schneider, 2006). Als Kernmerkmale werden dabei die Koordination, Steuerung und Kontrolle von kognitiven Prozessen angeführt, die das Verhalten hinsichtlich Umwelteinflüssen steuern und einen flexiblen Umgang mit neuen Situationen ermöglicht (Monsell et al., 2000). Smith und Jonides entwickelten eine Einteilung der exekutiven Funktionen in fünf Metaprozesse: Aufmerksamkeit und Inhibition, Ablauforganisation, Planen, Überwachen und Kodieren (*siehe Tabelle 1-1*) (Smith et al., 1999).

Metaprozess	Bedeutung
Aufmerksamkeit und Inhibition	Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf relevante Informationen sowie Hemmung irrelevanter Handlungsintentionen
Ablauforganisation	Erstellung eines Ablaufschemas für komplexe Handlungen mit raschem Wechsel zwischen den beteiligten Komponenten
Planen	Mentale Sequenzierung von Handlungsschritten zur Zielerreichung
Überwachen	Überwachung von Handlungsschritten und Abgleich der handlungsleitenden Zielintentionen mit dem aktuellen Stand der Handlung
Kodieren	Protokollierung der externen Ereignisse und internen Prozesse im Arbeitsgedächtnis

Tabelle 1-1: Einteilung der exekutiven Funktionen (Smith et al., 1999)

Weitere Einteilungen stammen von Norman und Shallice mit einem Schwerpunkt auf handlungssteuernde Aufmerksamkeitsfunktionen (Norman et al., 1986), Schnider mit einem Fokus auf Handlungskategorien (Schnider, 2004) sowie Grafman und Litvan mit einer Zuordnung kognitiver Funktionen zu neuroanatomischen Korrelaten (Grafman et al., 1999).

1.1.1. Arbeitsgedächtnis

Einen wichtigen Teil der exekutiven Funktionen stellt das so genannte Arbeitsgedächtnis dar. Baddeley und Hitch veröffentlichten 1974 ihr Modell des Arbeitsgedächtnisses, das eine Struktur mit eingeschränkter Kapazität zur kurzfristigen Speicherung und zielgerichteten Informationsverarbeitung darstellt (Baddeley et al., 1974; Baddeley et al., 1976; Baddeley et al., 1992). Dabei besteht dieses System aus mehreren Komponenten, die von einer übergeordneten, zentralen Instanz in koordinativer Weise gesteuert werden. Die Aufgabe der Komponenten, im Modell „Sklavensysteme“ genannt, besteht in der Speicherung und Aufrechterhaltung von Informationen über einen kurzen Zeitraum. Hierbei werden gesprochene („verbal-phonologische Schleife“) von bildlich-räumlichen Informationen („visuo-räumlicher Notizblock“) unterschieden (Miyake et al., 1999). Diesen Systemen ist die „zentrale Exekutive“ übergeordnet, die eine steuernde Rolle einnimmt (siehe *Abbildung 1-1*). Ergänzungen dieses Modells erfolgten im Lauf der Jahre durch Norman & Shallice, Logie sowie Baddeley selbst (Norman et al., 1986; Logie, 1995; Baddeley, 1998b; Norman et al., 1999; Baddeley, 2000; Baddeley, 2001; Baddeley, 2003; Repovs et al., 2006), um etwa Bezüge zum Langzeitgedächtnis darin abzubilden. Auch heute gelten die Grundprinzipien dieses Modells (Jonides et al., 2005; Postle, 2006; Jarrold et al., 2006).

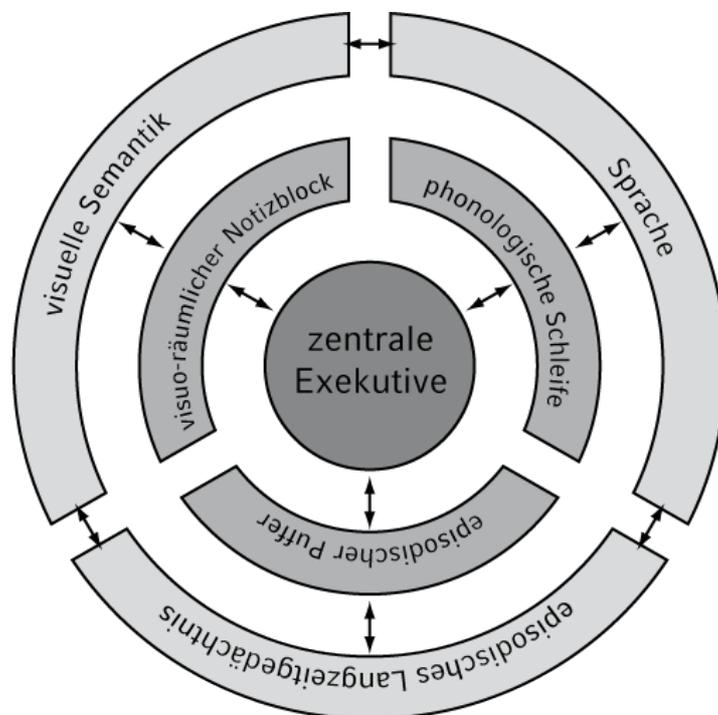


Abbildung 1-1: Multikomponenten-Modell nach Baddeley (Repovs et al., 2006)

1.1.2. Neuroanatomische Lokalisierung

Die Mechanismen, welche Hirnstrukturen in welcher Form welche Leistungen des exekutiven Systems steuern, sind zu großen Teilen unbekannt und Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Einige dieser Arbeiten beschäftigen sich damit, den einzelnen Prozessen der exekutiven Funktionen neuroanatomische Korrelate zuzuordnen. Zu Beginn dieser Forschungsbemühungen vermutete man die exekutiven Funktionen ausschließlich im präfrontalen Cortex, was letztlich auch den Begriff „Frontalhirnsyndrom“ prägte. Neuere Erkenntnisse zeigen aber ein sehr viel breiter gefächertes neuronales Netzwerk als Korrelat von Arbeitsgedächtnisfunktionen (*siehe Abbildung 1-2*), worin die frontal gelegenen Hirnanteile zwar eine wichtige Rolle spielen aber nicht die einzige (Andres, 2003).

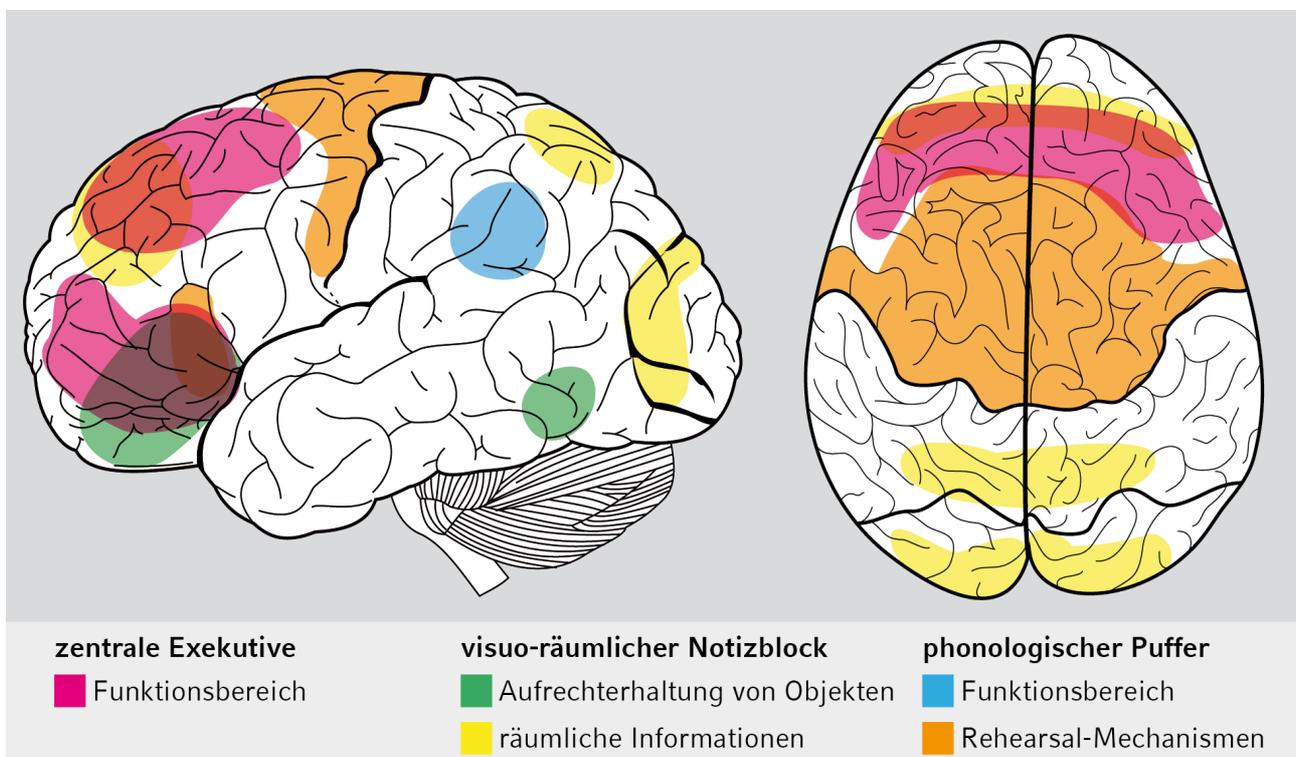


Abbildung 1-2: Räumliche Verteilung des Arbeitsgedächtnisses: Man erkennt eine frontale Betonung und auch temporo-parietale sowie okzipitale Anteile. Für die Funktion des Arbeitsgedächtnisses vermutet man heute ein weitläufigeres Netzwerk.

So wird die Funktion des phonologischen Puffers in der Übergangsregion zwischen Gyrus angularis und Gyrus supramarginalis (Brodman-Areale 39/40) vermutet, während die Rehearsal-Mechanismen eher dem linken prämotorischen und supplementär-motorischen Kortex (Brodman-Areal 6) sowie der Broca-Region (Brodman-Areal 44) zugeordnet sind (Paulesu et al., 1993; Na et al., 2000; Collette et al., 2002).

Der visuo-räumliche Notizblock nach Baddeley ist nach Studienmeinung sowohl funktional als auch anatomisch unterteilt in unterschiedliche kortikale Pfade, die einerseits für die Objekt- und andererseits für die Raumwahrnehmung zuständig sind (Mishkin et al., 1983; Levine et al., 1985; Farah et al., 1988; Funahashi et al., 1989; Funahashi et al., 1990; Tresch et al., 1993; Funahashi et al., 1993; Smith et al., 1995; Mecklinger et al., 1996; Hecker et al., 1997; Owen et al., 1997; Courtney et al., 1998; Della Sala et al., 1999; Smith et al., 1999). Die Aufrechterhaltung von Objekten ist hierbei in bilateralen superioren temporo-parietalen Kortextarealen (Brodmann-Areal 37) und dem ventro-lateralen präfrontalen Kortex (Brodmann-Areale 44, 45 und 47) lokalisiert (Ungerleider et al., 1994; Smith et al., 1999; Tanibuchi et al., 2003). Für räumliche Information hat man Strukturen im parieto-okzipitalen Kortex (Brodmann-Areale 7 und 19) aber auch im dorso-lateralen präfrontalen Kortex (Brodmann-Areale 9 und 46) identifiziert (Levy et al., 2000; Wager et al., 2003; Müller et al., 2006). Andere Untersuchungen haben allerdings eine anatomische Verteilung ergeben, bei der im ventro-lateralen präfrontalen Kortex vorwiegend Funktionen zur Aufrechterhaltung und im dorso-lateralen präfrontalen Kortex zur Verarbeitung der Informationen vorzufinden sind (Frey et al., 2000; Petrides, 2000; Kostopoulos et al., 2003; Roberts et al., 2003).

Mehr Einigkeit über die neuroanatomischen Korrelate besteht bezüglich der zentralen Exekutive, die sich vorrangig im [dorso-lateralen] präfrontalen Kortex befindet (Goldman et al., 1970; Petrides et al., 1982; Baddeley, 1986; Fuster, 1989; D'Esposito, 1995; Funahashi, 2006). Allerdings stellte sich heraus, dass die zentrale Exekutive nicht als regional eng umgrenzte kortikale Struktur verstanden werden kann, sondern vielmehr als weitläufiges Geflecht unterschiedlicher Hirnregionen, die hinsichtlich der verschiedenen Aufgaben exekutiver Funktionen als zentrale Exekutive zusammenwirken (Andrés, 2003; Baddeley, 1998a). Als Hinweis auf die Weitläufigkeit dieser strukturellen Beziehungen wurde auch die Tatsache gedeutet, dass bei der gleichzeitigen Ausführung mehrerer Testbedingungen eine ausgedehntere Aktivierung gezeigt werden kann, wobei die Aktivität vor allem den präfrontalen Kortex aber auch Areale in parietalem Kortex, Cerebellum und Striatum betrifft (Bunge et al., 2000).

1.2. Verhaltensinhibition

Die Steuerung von Aufmerksamkeitsprozessen gilt als Teilbereich der exekutiven Funktionen. Dazu gehört etwa die Fähigkeit, die Aufmerksamkeit auf bestimmte Informationen zu lenken und im Bedarfsfall auch wieder zu wechseln (Owen et al., 2000; Roberts et al., 2003). Funktionen zur Verhaltensinhibition, also die Fähigkeit, in der gegenwärtigen Situation unpassende Reaktionen zu unterbinden, zählen zu den wesentlichen Bestandteilen dieser Steuerprozesse (Logan et al., 1984). Anders als bei automatisierten Handlungen liegt bei Aufmerksamkeitsprozessen eine „Top-Down-Kontrolle“ vor, die eine gezielte Auswahl des Aufmerksamkeitsmittelpunkts gewährleistet (Miller, 2000). Eine bewusste Steuerung der Aufmerksamkeit ist auch Voraussetzung zu zielgerichtetem Verhalten (Rothbart et al., 2001); die Inhibition als Unterdrückung bzw. Verzögerung von Antworten, um höher gestellte Ziele zu erreichen, stellt ein wesentliches Merkmal zur Ermöglichung bewussten und flexiblen Verhaltens dar (Wright et al., 2003).

1.2.1. Verhaltensexperimente

Zur Untersuchung der Inhibition des Verhaltens stehen einige neuropsychologische Testverfahren zur Verfügung. Häufig finden hierbei das Go/NoGo-Test-Paradigma und der Stroop-Interferenz-Test Anwendung. Der Vorteil neuropsychologischer Tests in der Untersuchung exekutiver Funktionen besteht in der gezielten Aktivierung einzelner oder zumindest weniger Teilaspekte des funktionalen Netzwerks, den die exekutiven Funktionen darstellen (Rogers et al., 2004).

Gemeinsamkeiten der Testverfahren bestehen in der wiederholten Darbietung von verschiedenen Stimuli mit der Aufforderung an die Testpersonen, so schnell wie möglich zu reagieren. Die automatisierte Reaktion muss dann bei intermittierend auftretenden Stopp-Reizen, auf die keine bzw. eine andere oder widersprüchliche Reaktion erfolgen soll, unterdrückt werden.

1.2.1.1. Go/NoGo

Zahlreiche Erkenntnisse in der Erforschung der Verhaltensinhibition gründen auf dem Go/No-Go-Test (McCulloch, 1951). Bei diesem Test werden Reize oder Reizkombinationen mit einer bestimmten Reaktion des Probanden verknüpft: Bei dem Go-Stimulus ist eine bestimmte Handlung auszuführen, bei dem NoGo-Stimulus muss das Verhalten unterdrückt, die Reaktion also unterbunden werden. Durch Veränderung der Reizkriterien können auftretende Interferenzen Rückschlüsse auf die zu Grunde liegenden Ablaufprozesse ermöglichen. Das Go/NoGo-Paradigma diente vielen Studien als experimentelles Paradigma zur Aufklärung neuronaler Korrelate von Antwortverhalten und -inhibition (Watanabe, 1986; Jodo et al., 1992; Falkenstein et al., 1995; Shibata et al., 1997; Falkenstein et al., 1999).

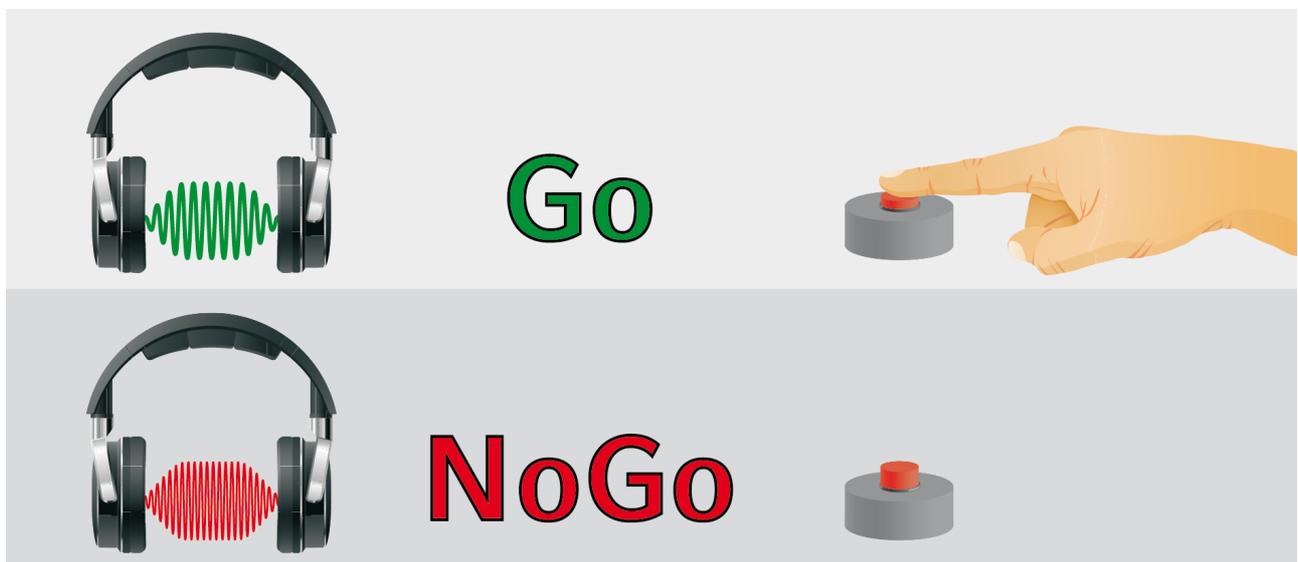


Abbildung 1-3: Prinzip des Go-NoGo-Paradigmas: Auf einen festgelegten Reiz hin (etwa ein bestimmter Ton) soll eine vorbestimmte Reaktion (z.B. ein Tastendruck) erfolgen; bei einem anderen Reiz soll diese Reaktion unterbunden werden

1.2.1.2. Stroop-Test

Der Stroop- bzw. Farbe-Wort-Interferenztest ist ein psychologischer Test, der nach dem Erstbeschreiber John Ridley Stroop benannt ist (Stroop, 1935). Bei den vier experimentellen Bedingungen von Stroops ursprünglichem Test, benannten die Probanden nacheinander Farbwörter, die Farben von gleichfarbig gedruckten Farbwörtern, die Farben von geometrischen Figuren und zuletzt die Farben von andersfarbigen Farbwörtern (*siehe Abbildung 1-4*). Die zweite Bedingung findet heute jedoch kaum mehr Anwendung (Golden, 1978). Bei Unterschieden zwischen Druckfarbe und Bedeutung eines Farbwortes kommt es durch den Widerspruch zu mentalen Verarbeitungskonflikten und so Reaktionsverzögerungen und Benennungsfehlern (Dunbar et al., 1984). Die Benennung des Farbwortes muss unterdrückt werden, um der experimentell geforderten Benennung dessen Farbe nachzukommen. Dieser Prozess lässt sich durch Übung beschleunigen, jedoch nicht vollständig unterbinden (MacLeod et al., 1988). Neben der Inhibition lässt sich mit dem Stroop-Test auch selektive Aufmerksamkeit und Ablenkbarkeit bestimmen (Rapport et al., 2001).



Abbildung 1-4: Stroop-Test nach John Ridley Stroop (1935): Die Benennung von Farben gelingt gesunden Probanden mühelos. Unterscheiden sich Farbe und Bedeutung eines Farbwortes kommt es zur kognitiven Interferenz.

Die Lokalisierung der beim Stroop-Interferenz-Test aktivierten und inhibierten Areale wurde in verschiedenen Arbeiten untersucht. Bench et al. folgerten allgemein, es handele sich um ein weitreichendes

Netzwerk mit hoher Aktivität in frontalen Hirnabschnitten und entsprechender Inhibition in posterioren Hirnanteilen (Bench et al., 1993). Pardo und Kollegen sahen im anterioren Cingulum eine zentrale Hirnregion, die wichtige Aufgaben der bewussten Verhaltenssteuerung übernimmt (Pardo et al., 1990). Das aktive Überwinden kognitiver Interferenzen rechneten Badgaiyan und Kollegen präfrontalen und cingulären Kortexarealen zu (Badgaiyan, 2000).

1.2.2. EEG und Bildgebung in der Inhibitionsforschung

Die Geschichte des amerikanischen Eisenbahnvorarbeiters Phineas Gage, der sich nach einem Unfall mit Verlust des Frontalhirns enthemmt verhielt, ließ bereits früh die Vermutung aufkeimen, dass frontale Hirnanteile mit inhibitorischen Funktionen in Verbindung zu bringen seien. Verschiedene elektro-physiologische Studien stellten einen Zusammenhang zwischen fronto-zentraler Aktivität (N2 und P3) und Inhibitionsvorgängen fest (Falkenstein et al., 1999; Bruin et al., 2001; Bekker et al., 2004; Lavric et al., 2004). Etwa 200 ms nach dem Stimulus zeigt sich in der NoGo-Bedingung im Vergleich zur Go-Bedingung eine frontal betonte negative Aktivität, die als NoGo-N2 bezeichnet wird (Kok et al., 1986; Eimer, 1993; Falkenstein et al., 1999). Eine Verstärkung dieser N2 konnte in anderen Studien durch Veränderung des Verhältnisses zwischen Go- und NoGo-Bedingungen erreicht werden (Nieuwenhuis et al., 2003; Donkers et al., 2004), wobei eine N2-Vergrößerung auch bei Go beobachtet werden konnte. Dementsprechend wird die N2 im Go/NoGo-Paradigma als Ausdruck des Antwortkonflikts verstanden.

Etwa 300 bis 600 ms nach dem Reiz kann ein fronto-zentral betontes, positives Potenzial beobachtet werden, das entsprechend als NoGo-P3 bezeichnet wird (Pfefferbaum et al., 1985; Roberts et al., 1994; Kopp et al., 1996; Bruin et al., 2001; Bekker et al., 2004; Kamarajan et al., 2005a; Kamarajan et al., 2005b). Die NoGo-P3 ist dabei weiter anterior lokalisiert als vergleichbare P3-Potenziale der Go-Bedingung, insbesondere im linksseitigen lateralen orbito-frontalen Kortex sowie dem anterioren cingulären Kortex.

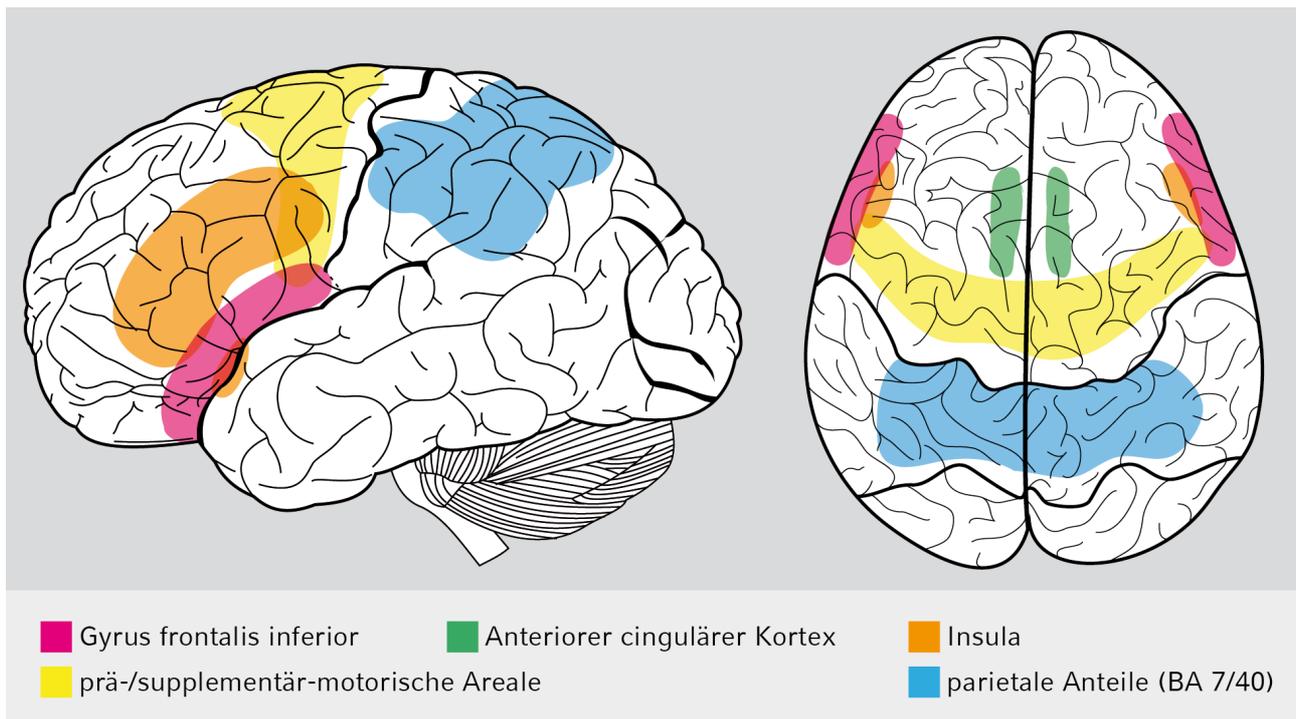


Abbildung 1-5: Räumliche Verteilung inhibitorischer Funktionen

Studien, die eine Lokalisierung inhibitorischer Prozesse mittels funktioneller Magnetresonanztomografie untersuchten, konnten ebenfalls erhöhte Aktivität in frontalen Hirnanteilen zeigen (Garavan et al., 1999; Liddle et al., 2001; Rubia et al., 2001; Watanabe et al., 2002; Mostofsky et al., 2003). Obwohl die einzelnen Studien teilweise recht verschiedene Schwerpunktareale inhibitorischer Prozesse identifizieren, ist ihnen eine frontale Lokalisierung gemeinsam. Dabei scheinen insbesondere mittlerer und inferiorer Gyrus frontalis und vordere Insel (Konishi et al., 1999a; Braver et al., 2001; Watanabe et al., 2002; Rubia et al., 2001; Brass et al., 2005), der anteriore cinguläre Kortex (Braver et al., 2001; Liddle et al., 2001; Menon et al., 2001; Durston et al., 2002; Garavan et al., 2002; Tamm et al., 2004) sowie prämotorische und supplementär-motorische Areale (Cabeza et al., 2000; Ullsperger et al., 2001; Garavan et al., 2002) beteiligt zu sein. Darüberhinaus konnte auch eine Beteiligung parietaler Hirnanteile gezeigt werden (Cabeza et al., 2000; Garavan et al., 2002; Watanabe et al., 2002; Karch et al., 2008a). In der rechten Gehirnhälfte wurde mehr Aktivität als in der linken gemessen (Garavan et al., 1999; Konishi et al., 1999a; Kelly et al., 2004).

1.3. Entscheidungsprozesse und Handlungskontrolle

Motivationale Funktionen wie Willensbildung und Initiative rechnet man den exekutiven Funktionen zu. Allgemein bezeichnet man in der Psychologie den Prozess der Willensbildung mit dem Begriff Volition. Die Volitionsforschung ist ein Teilgebiet der Motivationspsychologie und untersucht Fragestellungen zur Bildung, Aufrechterhaltung, zeitlichen Dynamik sowie Realisierung von Absichten. Entscheidend ist hierbei die Frage, wie die Umsetzung einer Zielintention in die Handlung erfolgt (Goschke, 2002).

Das Verständnis der Volition umfasst die Funktion kognitiver Leistungen wie der Wahrnehmung, dem Gedächtnis und der Aufmerksamkeit, die ein Lebewesen dazu befähigen, sein Verhalten im Hinblick auf stetig wechselnde und kaum vorhersehbare äußere Einflüsse mit den inneren Einflüssen abzustimmen und so die Verhaltensweise zu wählen, die seinen Fortbestand am ehesten sichert. Dementsprechend können verschiedene Ebenen der Verhaltenssteuerung unterschieden werden, die verschiedenen Stufen kognitiver Leistungen entsprechen, beginnend bei Reflexen und Instinkten bis hin zur Selbstreflexion (*siehe Tabelle 1-2*) (Goschke, 2002). Handlungen werden als „willentlich“ bezeichnet, wenn ihre Auswahl bewusst getroffen wird (Frith et al., 1991) und man zwischen mehreren Handlungsalternativen entscheiden kann (Deiber et al., 1991; Frith et al., 1991; Passingham, 1995).

Ebene	Verhalten
Reflexe und Instinkte	<ul style="list-style-type: none"> ▶ fixe, durch bestimmte Auslösereize aktivierte Reaktionsprogramme ▶ Anpassung an unveränderliche äußere Bedingungen
Assoziatives Lernen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Veränderungen von Reiz-Reaktions-Assoziationen durch Erfahrungswerte ▶ Anpassung an veränderliche, äußere Umstände
Motiviertes Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Veränderungen des Reaktionsverhaltens durch angeregte Bedürfnisse ▶ Anpassung an zeitweilige Veränderungen der Bedürfnislage
Intentionale Handlungen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Zielgerichtetheit: Repräsentation von Handlungseffekten und assoziierten Anreizen ▶ Geplantheit: Neukombination grundlegender Handlungen zu neuen Handlungsabläufen ▶ Reizunabhängigkeit: Beliebige Kopplung von Reizbedingungen und Reaktionsdisposition ▶ Bedürfnisunabhängigkeit: Vorwegnahme zukünftiger Bedürfnisse
Volitionale Selbststeuerung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Metakognitive Strategien der Selbstkontrolle ▶ Abschirmung von Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen ▶ Unterdrückung starker, aber inadäquater Reaktionen ▶ Beeinflussung der eigenen Funktionsweise durch Selbstreflexion

Tabelle 1-2: Ebenen der Verhaltenssteuerung (nach Goschke, 2002)

Die Vielfalt der Verhaltensstrukturen und der beeinflussenden Faktoren führt zu neuen Problemen bei der Überwachung und Kontrolle. Steigen die Anzahl der verfolgten Ziele sowie die Menge möglicher Handlungsalternativen bei einer Abnahme der Verhaltenssteuerung durch niedrigere Stufen kognitiver Leistungen wie Reflexen, Instinkten und vordefinierten Reiz-Reaktions-Assoziationen, kommt es zu Interferenzen und Konflikten der kognitiven Strukturen und Abläufe (Goschke, 2002). Hierbei entstehen Konflikte insbesondere bei der gleichzeitigen Verfolgung mehrerer, gegenläufiger Ziele oder auch bei kognitiven Widersprüche zu stärkeren Gewohnheiten. Die phylogenetisch voneinander zu unterscheidenden Bestandteile der Verhaltenssteuerung konkurrieren zueinander, so dass die Koordination unterschiedlicher kognitiver, sensorischer und motorischer Komponenten und darüber hinaus die Unterdrückung starker, aber unangemessener Reaktionen notwendig ist (Kuhl et al., 1994).

1.3.1. Verhaltensexperimente

Ein wichtiger Aspekt der Volitionsforschung ist die Untersuchung des logisch-analytischen Denkens zur Problemlösung. Hierbei spielen Fähigkeiten wie Problemidentifikation, Problemanalyse, lösungsorientierte Hypothesenbildung, Strategieauswahl, Strategiemodifikation und die Bewertung der gefundenen Lösung eine wichtige Rolle (Danek et al., 2005). Eine zentrale Bedeutung nehmen hierbei der Turm von Hanoi bzw. London und der Wisconsin Card Sorting Test ein.

1.3.1.1. Turm von Hanoi und Turm von London

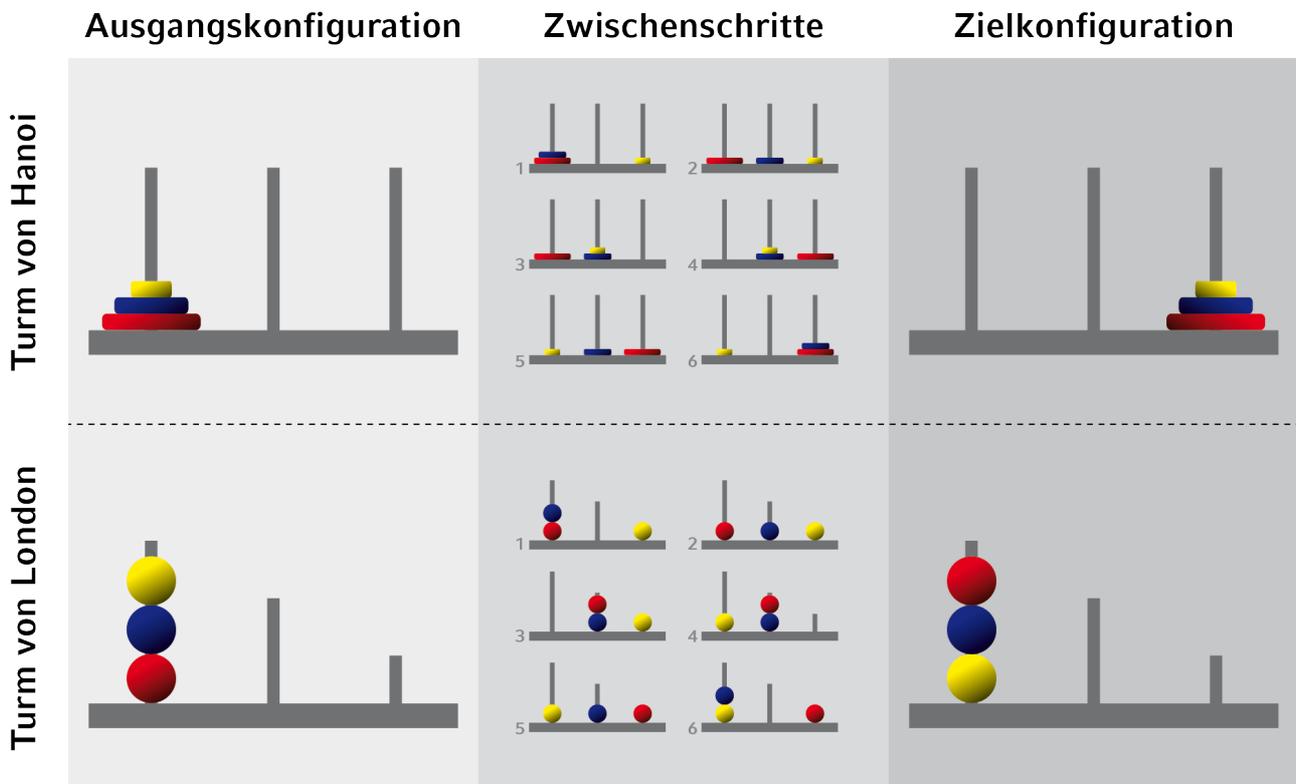


Abbildung 1-6: Turm von Hanoi und Turm von London (nach Simon, 1975 und Shallice, 1982)

Transformationsaufgaben ermöglichen es, das Planungs- und Problemlöseverhalten zu untersuchen. Hierunter werden Aufgaben verstanden, bei denen durch definierte Regeln eine Konstruktion von einer vorgegebenen Ausgangs- in eine ebenfalls vorgegebene Zielkonfiguration übergeführt werden soll. Als klassische Transformationsaufgaben gelten der Turm von Hanoi (Simon, 1975) und dessen weiter entwickelte Variante der Turm von London (Shallice, 1982). Beide Tests wurden in den letzten Jahrzehnten in vielerlei Zusammenhängen zur Untersuchung des Planungs- und Problemlöseverhalten genutzt (Kotovsky et al., 1985; León-Carrión et al., 1991; Goel et al., 1995; Welsh et al., 1995; Cockburn, 1995; Kafer et al., 1997; Murji et al., 1998; Dagher et al., 1999; Ahonniska et al., 2000; Bishop et al., 2001). Beim Turm von Hanoi müssen drei unterschiedlich große Scheiben auf drei gleich langen Stangen bewegt werden. Bei jedem Zug darf jeweils nur eine Scheibe bewegt werden und es darf keine größere Scheibe auf einer kleineren platziert werden. Beim Turm von London sind es drei gleich große Kugeln mit drei unterschiedlich langen Stangen (*siehe Abbildung 1-6*). Weitere Variationen mit unterschiedlicher Stangen- und Bausteinanzahl existieren (Owen et al., 1990; Humes et al., 1997; Kafer et al., 1997; Ward et al., 1997; Schnirman et al., 1998; Phillips et al., 1999; Ouellet et al., 2004). Da das Ergebnis der

Transformationen vorgegeben ist, entscheidet der Lösungsprozess über die Interpretation der Testergebnisse (Melchers et al., 2000). Bei Patienten mit Frontalhirnschädigungen kommt es zu fragmentierten Handlungssequenzen, Auslassen bzw. fehlerhaftem Einbauen von Zwischenschritten, längeren Reaktionszeiten, Regelverstößen und subjektiver Unzufriedenheit der Testteilnehmer (Luria, 1966; Shallice, 1982; Carlin et al., 2000).

1.3.1.2. Wisconsin Card Sorting Test

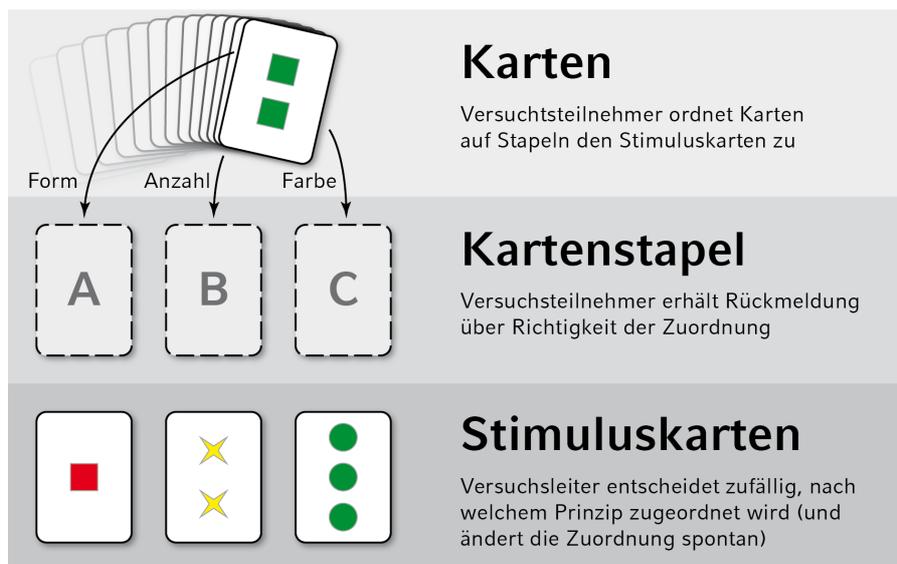


Abbildung 1-7: Prinzip des Wisconsin Card Sorting Test (nach Berg, 1948)

Teilaspekte exekutiver Funktionen wie die Strategieplanung und -auswahl sowie die konstante Analyse und bedarfsorientierte Umstellung der Strategie stellen die kognitive Fähigkeit der Flexibilität dar. Deren Untersuchung erfolgt mit dem Wisconsin Card Sorting Test (Berg, 1948; Mirsky et al., 1991; Miyake et al., 2000): Die Versuchsteilnehmer sind angewiesen, Karten nach einem ihnen unbekanntem und vom Versuchsleiter festgelegtem Prinzip zu ordnen. Dabei kann eine Sortierung nach Anzahl, Form oder Farbe der auf den Karten abgebildeten Symbolen erfolgen. Der Proband erhält nach Einsortierung jeder Karte eine Rückmeldung über die Richtigkeit der Zuordnung und ermittelt so deduktiv das Zuordnungsprinzip. Nach einer Reihe korrekter Sortierungen ändert der Versuchsleiter das Sortierprinzip. Der Versuchsteilnehmer muss also die als richtig erkannte Regelmäßigkeit verwerfen und sich auf die geänderte Situation neu einstellen (*siehe Abbildung 1-7*). Hierbei zeigen Patienten mit frontaler Hirnschädigung die Tendenz zum Verharren in alten Mustern (Perseveration) und vermögen es nicht, sich an das neue Sortierkriterium zu adaptieren (Milner, 1963; Milner, 1964). Der Test führt zu starken Aktivierungen im dorso-lateralen präfrontalen Kortex (Berman et al., 1995; Cabeza et al., 2000; Cannon et al., 2005), im

ventro-lateralen präfrontalen Kortex bei Änderung des Sortierkriteriums (Konishi et al., 1998; Konishi et al., 1999b) sowie im Nucleus caudatus (Monchi et al., 2001). Er gilt als besonders sensitiv bei Frontalhirnschädigungen und hilft bei der Differenzierung zwischen frontalen und nichtfrontalen Hirnschädigungen (Melchers et al., 2000).

1.3.2. EEG und Bildgebung in der Volitionsforschung

Bildgebungs-, Elektrophysiologie- und Läsionsstudien in der Volitionsforschung haben gezeigt, dass frontale Hirnabschnitte eine wichtige Rolle in der Auswahl willentlicher Handlungen einnehmen (Turken et al., 1999; Ridderinkhof et al., 2004; Lau et al., 2004a; Lau et al., 2004b; Cunnington et al., 2005; Forstmann et al., 2006; Rushworth et al., 2007; Forstmann et al., 2008; Karch et al., 2009). Dies konnte etwa für die (prä-)supplementär-motorischen Areale, den anterioren cingulären Kortex und den dorso-lateralen präfrontalen Kortex gezeigt werden (Deiber et al., 1991; Frith et al., 1991; Hyder et al., 1997; Walton et al., 2004; Lau et al., 2004b; Forstmann et al., 2006) sowie im oberen Parietallappen und dem posterioren Teil des intraparietalen Sulcus (Forstmann et al., 2006; Karch et al., 2010a). Insbesondere das prä-supplementär-motorische Areal ist mit der Repräsentation von Absichten (Lau et al., 2004a) und eng mit der freien Auswahl von Antwortalternativen assoziiert (Lau et al., 2004b). Darüber hinaus wurde eine Beteiligung an der endogenen Handlungsgenerierung vermutet, wohingegen Antwortkonflikte eher mit dem anterioren cingulären Kortex in Verbindung gebracht wird (Lau et al., 2006). Frühere Analysen der NoGo-N2-Topografie haben ein negatives Potenzialfeld über dem medialen präfrontalen Kortex gezeigt (Kiefer et al., 1998; Nieuwenhuis et al., 2003; Bekker et al., 2005). Einige Studien lokalisierten die NoGo-N2-Amplitude im anterioren cingulären Kortex (Kiefer et al., 1998; Van Veen et al., 2002; Nieuwenhuis et al., 2003; Bekker et al., 2005; Gajewski et al., 2008) und entsprechend im medialen frontalen Kortex (Jonkman et al., 2007). Andere Studien lokalisierten die N2 im rechten ventralen und dorso-lateralen präfrontalen Kortex (Lavric et al., 2004). Trotz der uneinheitlichen Studienergebnisse im Detail, stimmen die Untersuchungen darin überein, dass frontale Hirnbereiche eine wichtige Rolle in der Entstehung der N2 haben. Darüberhinaus lässt die starke Assoziation zwischen N2 und frontalen Hirnabschnitten vermuten, dass diese Areale früh zum Selektionsprozess beitragen, während temporo-parietale Hirnanteile erst später aktiv werden. Dies wird als möglicher Hinweis auf eine „Top-Down-Kontrolle“ gesehen (Karch et al., 2010b).

Weitere Hinweise auf die Beteiligung frontaler Hirnstrukturen beim freien Willen stammen aus Läsionsstudien: Schädigungen des medialen frontalen Kortex führen zu starken Schwierigkeiten, spontan Handlungen zu initiieren (Laplaine et al., 1977).

Die funktionelle Bedeutung der beteiligten Regionen ist bislang noch nicht zufriedenstellend geklärt: Manche Studien verstehen das prä-supplementär-motorischen Areal als Zentrum für die Konfliktverarbeitung und vermuten die Entstehung gewillter Handlungspläne eher in kaudalen Bereichen (Nachev et al., 2005), wohingegen andere Studien dort vielmehr die Entstehung von gewillten Handlung annehmen und Antwortkonflikte als Aufgabe des anterioren cingulären Kortex vermuten (Lau et al., 2006). Die Aktivierung des dorso-lateralen präfrontalen Kortex ist abhängig von den jeweiligen Anforderungen der Versuchsanordnung an das Arbeitsgedächtnis. Eine Verlängerung von Antwortzeiten bei Untersuchungen mit Selektionsaufgaben deutet auf zusätzliche kognitive Prozesse bedingt durch die Abwesenheit von Einschränkungen beim „freien Willen“ (Lau et al., 2006). Das N2-Potenzial ist mit dem Vorgang der Handlungsauswahl assoziiert und beeinflusst nachfolgende Verarbeitungsschritte, die sich in der P3 widerspiegeln (Gajewski et al., 2008).

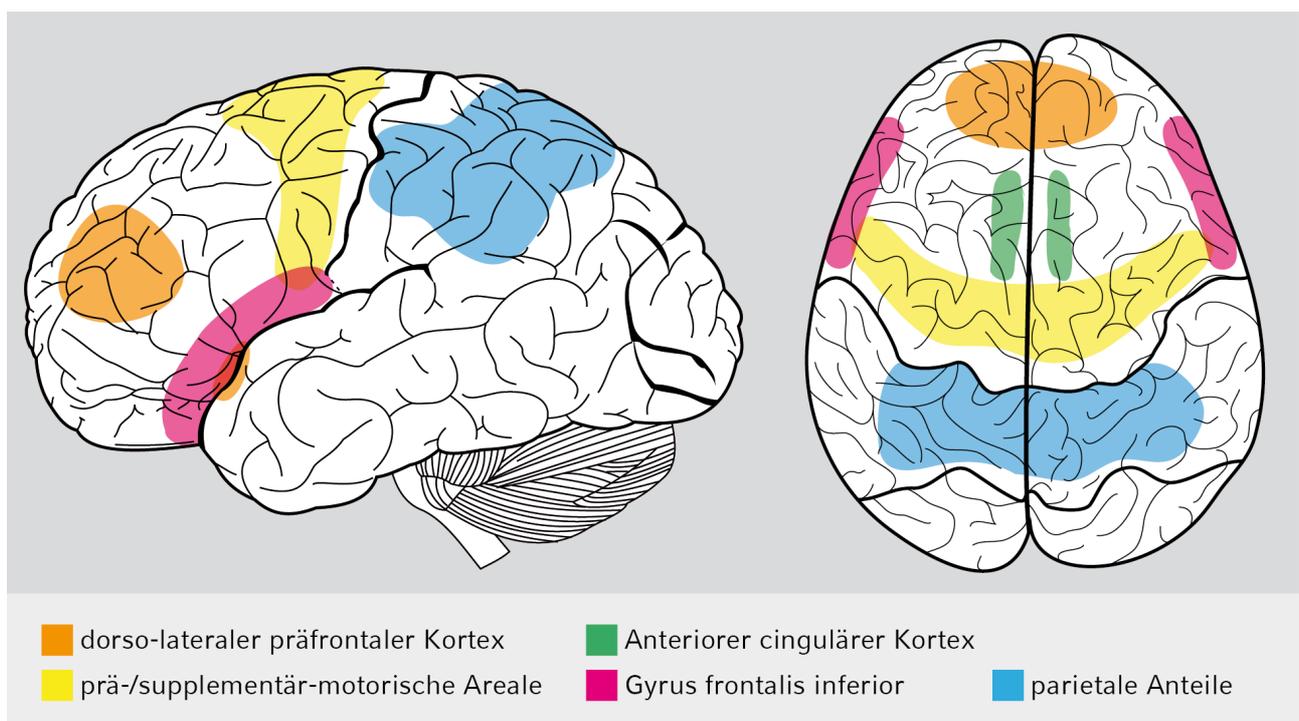


Abbildung 1-8: Beteiligte Strukturen, die in Lokalisierungsstudien zu Entscheidungsprozessen identifiziert wurden

1.4. Untersuchungsmethoden

Die Erforschung des Gehirns übt seit Jahrtausenden eine besondere Faszination auf den Menschen aus (Oeser, 2002). Substanzielle Fortschritte sind allerdings erst durch die Erfindung nicht-invasiver Verfahren zur Erforschung von neuronalen Prozessen in vivo möglich geworden. Hierbei sind vor allem die Elektroenzephalografie (EEG) und die Magnetresonanztomografie (MRT) zu nennen, die zu immer präziseren Erkenntnissen über die neuroanatomischen Zusammenhänge und neurophysiologischen Vorgänge verholfen haben. Sie stellen auch die zentralen Untersuchungsmethoden in Studien zu exekutiven Funktionen dar.

1.4.1. Elektroenzephalografie und ereigniskorrelierte Potenziale

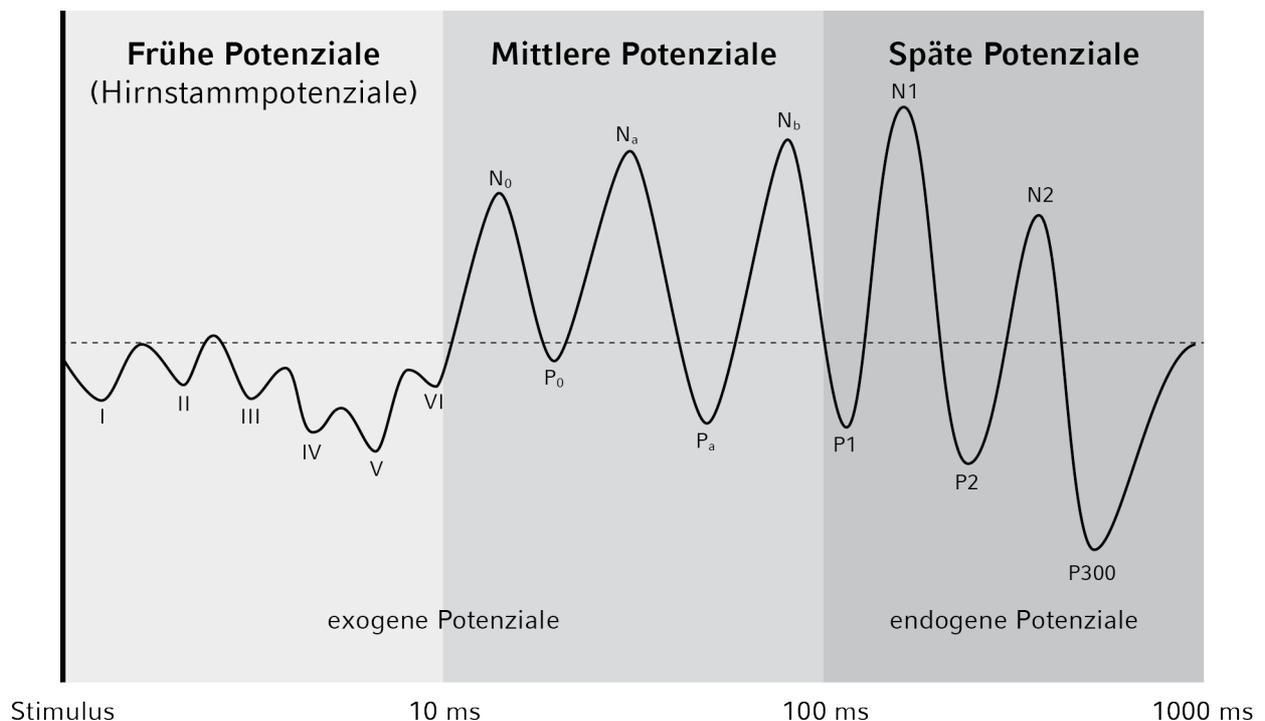


Abbildung 1-9: Schematische Zeichnung ereigniskorrelierter Potenziale mit logarithmischer Zeitachse (nach Hegerl, 1998)

Die synchrone elektrische Aktivität neuronaler Verbände des menschlichen Gehirns führt durch Summationseffekte zu Spannungsschwankungen und Feldpotenziale, die durch auf der Kopfhaut angebrachte Elektroden messbar sind (Lutzenberger et al., 1985; Birbaumer et al., 1990; Zschocke, 1995). Diese Messungen können mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung durchgeführt werden können, womit die hirnelektrische Aktivität unmittelbar und ohne Verzögerungseffekte darstellbar ist. Von der

beständigen Spontanaktivität des Gehirns, die eher zufällig verteilt wirkt, unterscheidet man die ereigniskorrelierten Potenziale, die hirnelektrische Prozesse im zeitlichen Zusammenhang mit bestimmten Ereignissen - wie etwa akustischen Reizen oder muskulärer Aktivität - widerspiegeln (Hegerl, 1998; Altenmüller, 2005). Diese Potenziale werden entsprechend ihrer Polarität in positive (P) und negative (N) sowie ihrer Latenz in frühe (Hirnstammpotenziale), mittlere und späte Potenziale eingeteilt (*siehe Abbildung 1-9*). Bei den frühen Potenzialen erklären physikalische Parameter wie Modalität, Intensität und Interstimulusintervall der Ereignis-Stimuli die intraindividuellen Varianzen, während die zwischenmenschlichen Varianzen späterer Potenziale besser durch psychologische Konstrukte wie Aufmerksamkeit, Motivation, Wachheit, Stimulus-Kontext und Ausgangssituation erklärbar sind (Möller et al., 2005). Frühe Potenziale werden als exogene, modalitätsspezifische, späte Potenziale als endogene, modalitätsunabhängige Potenziale bezeichnet, obgleich eine strikte Trennung in endogene und exogene Potenziale per se nicht möglich ist (Donchin et al., 1978). Darüber hinaus unterscheidet man obligatorische von nicht-obligatorischen Potenzialen, wobei erstere immer und letztere nur unter bestimmten Bedingungen auftreten.

1.4.1.1.1. N1/N100

Das N1-Potenzial tritt zwischen 90 und 200 ms nach Reizbeginn aus und gilt als Zeichen von Aufmerksamkeitsprozessen und Korrelat der Orientierungsreaktion (Hillyard et al., 1973; Sokolov et al., 1975; Luck et al., 1990). Eintreffende Reize werden mit früher gespeicherten Reizmerkmalen verglichen und bei Identifizierung neuer Reize eine entsprechenden Orientierungsreaktion eingeleitet, die sich im EEG als N1 darstellt. Die wiederholte Darbietung des Reizes führt so zur Abnahme der N1-Amplitude. Eine Vergrößerung der Amplitude erreicht man sowohl durch eine Veränderung der Stimulus-Qualität als auch durch selektive Aufmerksamkeitszuwendung. Die aufmerksamkeitsbedingte Vergrößerung der N1-Amplitude steht dabei im Zusammenhang mit einer gesteigerten Aktivität im anterioren cingulären Cortex (ACC), womit eine Beteiligung frontaler Hirnregionen und somit frühe Interaktion von sensorischen Arealen und übergeordneten Hirnregionen in der Informationsverarbeitung wahrscheinlich ist (Giard et al., 1994; Mulert et al., 2001; Gallinat et al., 2002; Mulert et al., 2003; Rosburg et al., 2005; Mulert et al., 2005a).

1.4.1.1.2. N2/N200

Das N2-Potenzial tritt etwa 200 Millisekunden nach dem Reiz auf und wird mit der Bewertung des Stimulus bzw. dem Vergleich der aktuellen Information mit bisher gespeicherten Reizmustern in Zusammenhang gebracht (Altenmüller, 2005). Hierbei wird auch die Konfliktüberwachung und -verarbeitung als Ausdruck der N2 verstanden (Bekker et al., 2004, Donkers et al., 2004). Man unterscheidet drei Teilkomponenten des N2-Potenzials. Als N2a tritt es in Erscheinung, wenn eine rasche Folge gleichartiger Stimuli durch einen von diesem Muster abweichenden Reiz unterbrochen wird (Näätänen, 1990). Mit etwas längerer Latenz als N2a tritt das N2b-Potenzial in Erscheinung, wenn die Aufmerksamkeit auf den abweichenden Reiz gerichtet wird und wird als Zeichen bewusster Reizwahrnehmung interpretiert (Näätänen, 1986; Pritchard et al., 1991). Eine zusätzliche Einordnung der unterschiedlichen Reize in Kategorien erzeugt die N2c-Komponente (Näätänen, 1990).

1.4.1.1.3. P3/P300

Die P300 ist eine Gruppe evozierter Potenziale, die etwa 300 ms nach Reizdarbietung auftreten. Sie wurde erstmalig von Sutton und Kollegen 1965 als physiologisches Korrelat einer Erkennungsreaktion eines seltenen Reizes beschrieben (Sutton et al., 1965). Die P300 ist das am häufigsten in Studien verwendete evozierte Potenzial. Man unterscheidet heute vier Komponenten der P300: P3a, Novel P3, P3b und slow wave.

Die P3a tritt mit einer Latenz zwischen 250 und 350 ms auf. Ähnlich der N1 gilt sie als Korrelat der Orientierungsreaktion, da sie bei Veränderungen der Stimulus-Qualität auftritt und wiederholte Darbietung des Reizes ebenfalls zur Amplitudenabnahme führt (Squires et al., 1975). In der Entstehung der P3a haben frontale Hirnanteile eine große Bedeutung (Knight, 1984; Polich, 2007).

Die P3b weist eine höhere Latenz auf und tritt 340 bis 700 ms nach Reizbeginn auf. Sie tritt besonders dann auf, wenn bei einer Reihe gleichartiger und häufiger Stimuli ein seltener und andersartiger Reiz auftritt (sog. Oddball-Paradigma; Sutton et al., 1965; Squires et al., 1977) oder gar fehlt (Klinke et al., 1968; Picton et al., 1974). Eine wichtige Generatorstruktur der P3b ist die temporo-parietale Übergangsregion (Knight et al., 1989; Holt et al., 1995; Mulert et al., 2004b; Polich, 2007). Werden im Oddball-Paradigma-Design zusätzlich neuartige Reize dargeboten, entsteht dabei die Novel P3, die eng mit der P3a verwandt ist und ähnliche charakterisiert ist (Courchesne et al., 1975).

Die slow-wave-Komponente der P300 tritt 600 bis 1.400 ms nach dem Stimulus auf, besonders wenn die Reize für die Lösung einer anspruchsvollen Aufgabe bedeutsam sind (Rösler et al., 1986).

Besondere Bedeutung hat die P300 im Zusammenhang mit der Schizophrenie im Besondern, aber auch anderen psychiatrischen Erkrankungen wie unter anderem den Demenzen und den Zwangsstörungen, bei denen abweichende P300-Befunde erhoben werden können (Pritchard et al., 1986; Blackwood et al., 1987; Ford et al., 1994; Hegerl, 1995; Cohen et al., 1995; Juckel et al., 1996; Ford et al., 1999; Polich, 2004).

Über die Jahrzehnte sind zahlreiche Modelle zur Interpretation über die der P300 zugrunde liegenden kognitiven Prozesse postuliert worden. Das „context updating“-Modell nach Donchin etwa sieht in der durch einen seltenen Reiz ausgelösten P300 eine Aktualisierung eines durch konstante, gleichartige Reize konstruierten mentalen Bildes der Umwelt (Donchin et al., 1988). Das „context closure“-Modell nach Verleger sieht in der P300 wiederum das Beenden einer perzeptiven Epoche mit neuronaler Deaktivierung nach einem Zielreiz (Verleger, 1988). Sehr viel weiter geht die Annahme, die P300 spiegele jede Form einer kontrollierten, nicht automatisierten Informationsverarbeitung wieder (Rösler, 1982). Die Vielzahl der Modelle verdeutlicht einen bislang fehlenden eindeutigen Zusammenhang zwischen P300-Amplitude und psychologischen Aspekten.

Potenzial	Latenz	Bedeutung / Eigenschaften
N1	90-200 ms	Korrelat der Orientierungsreaktion; Habituationseffekt
N2a	etwa 200 ms	rasche Folge gleichartiger Stimuli wird durch neuartiges Reizmuster unterbrochen
N2b		Aufmerksamkeit wird auf den abweichenden Reiz gerichtet; assoziiert mit Antwortunterdrückung, -konflikt und Fehlerüberwachung
N2c		Verarbeitung des Stimuluskontextes und Kategorisierung
P3a	250-700 ms	Korrelat der Orientierungsreaktion; Habituationseffekt
P3b	340-700 ms	bei bestimmten Reizmuster tritt ein andersartiger Reiz auf; verschiedene Modelle zur Bedeutung (z.B. „Umweltaktualisierung“ nach Donchin)
slow wave	600-1.400 ms	komplexere informationsverarbeitende und verhaltenssteuernde Prozesse

Tabelle 1-3: Überblick zu den evozierten Potenzialen N1, N2 und P3

1.4.2. Bildgebende Verfahren

Das Forschungsfeld der Neurowissenschaften hat durch die Entwicklung bildgebender Verfahren, die nicht-invasive Einblicke in lebende, menschliche Gehirne erlauben, deutliche Fortschritte erreichen können. Hierbei sind verschiedene Verfahren wie die Computertomografie (CT), die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und die Einzelphotonen-Emissions-Tomografie (Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT) zu nennen. In der Erforschung kognitiver und anderer mentaler

Prozesse spielt die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) die größte Rolle. Hierbei handelt es sich um eine Ergänzung der klassischen Magnetresonanztomografie (MRT), die mit hoher räumlicher Auflösung anatomische Strukturen darstellt, um eine zusätzliche Erfassung von oxygeniertem Hämoglobin, das im Vergleich zu desoxygeniertem Hämoglobin unterschiedliche magnetische Eigenschaften aufweist (BOLD-Effekt; Ogawa et al., 1990). Auf diese Weise kann neuronale Aktivität indirekt durch den lokal gesteigerten Zellstoffwechsel nachgewiesen werden. In den letzten Jahren hat sich die Kombination aus EEG und fMRT als gängiges Verfahren zur Untersuchung mentaler Prozesse etabliert, da hierdurch sowohl eine hohe zeitliche (EEG) als auch räumliche Auflösung (fMRT) erreicht wird (Logothetis et al., 2001; Debener et al., 2005; Debener et al., 2006; Eichele et al., 2005; Mulert et al., 2004a; Mulert et al., 2005b).

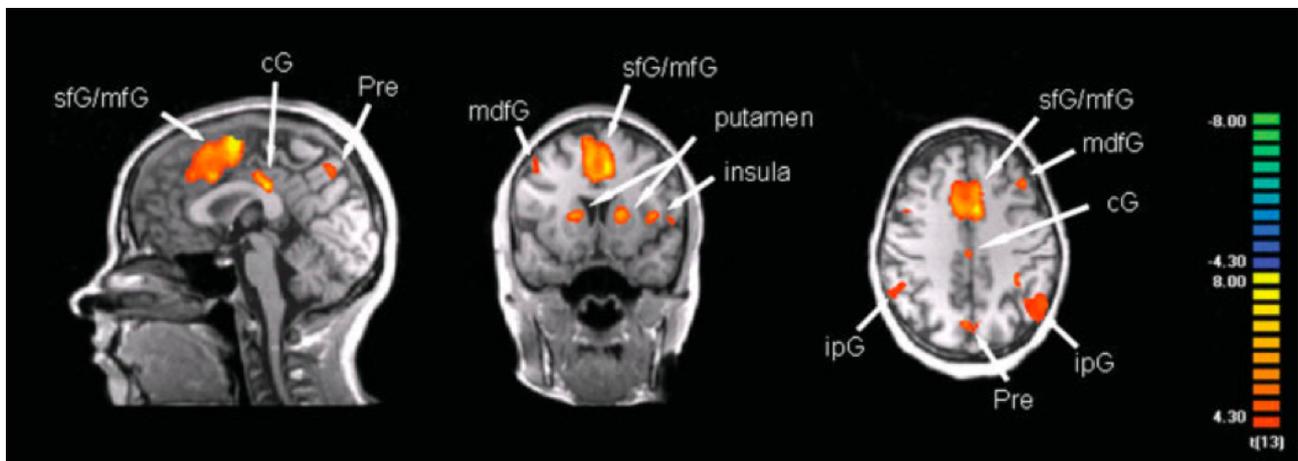


Abbildung 1-10: Funktionelle Magnetresonanztomografie bietet eine hohe räumliche Auflösung (aus Karch et al., 2009)

1.5. Alter und ereignis-korrelierte Potenziale

Das Phänomen nachlassender kognitiver Fähigkeiten mit zunehmendem Alter beschäftigt nicht nur Philosophen, Dichter und Denker seit Jahrhunderten, sondern fordert beständig auch die Neurowissenschaften heraus. Das Bestreben, das menschliche Gehirn in seiner Funktionsweise zu erfassen, wird durch die zusätzliche Dimension zeitlicher Veränderungsprozesse weiter erschwert. Evozierte Potenziale sind seit einigen Jahrzehnten als Korrelat für die Funktionen neuronaler Prozesse Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (Hegerl, 1998; Onofrij et al., 2001; Altenmüller, 2005). Früh begann man auch, evozierte Potenziale in verschiedenen Altersgruppen zu untersuchen. Hierbei werden drei Schwerpunkte hinsichtlich der Altersverteilung der Probanden unterschieden: Die Untersuchung am „reifenden Gehirn“

(Callaway et al., 1973; Beteleva et al., 2009), am „alternden Gehirn“ (Pfefferbaum et al., 1980; Vesco et al., 1993; Iragui et al., 1993; Kutas et al., 1994; Anderer et al., 1996; Díaz et al., 1998; Vallesi et al., 2009) und Untersuchungen, die beide „Lebensabschnitte“ des sich verändernden Gehirns umfassen (Goodin et al., 1978a; Mullis et al., 1985; Polich et al., 1985; Contestabile et al., 1995; Johnstone et al., 1996; Mueller et al., 2008). Weiterhin umfassen Untersuchungen zu Alterseffekten evozierter Potenziale die Unterscheidung zwischen der Genese der Potenziale: visuell evozierte Potenziale und Elektroretinogramme (Spear, 1993), akustisch evozierte Potenziale (Møller et al., 1988), somatosensorisch evozierte Potenziale (Allison et al., 1984) und ereignis-korrelierte Potenziale (Goodin et al., 1978a; Picton et al., 1984; Polich et al., 1985; Polich, 1991). Hierbei unterteilen sich die Forschungsschwerpunkte in das grundsätzliche physiologische Verständnis zu Alterseffekten bei ereignis-korrelierten Potenzialen (Pritchard, 1981; Pfefferbaum et al., 1984a; Polich, 1986; Yamaguchi et al., 1991; Pontifex et al., 2009) und die klinische Anwendung dieses Wissens bei Krankheiten des neurologisch-psychiatrischen Formenkreises, wie etwa Alzheimer-Demenz, Alkoholabhängigkeit, Schizophrenie, Depression und anderen (Goodin et al., 1978b; Syndulko et al., 1982; Pfefferbaum et al., 1984b; Polich, 1998).

Nach der Erstbeschreibung des P300-Potenzials (Sutton et al., 1965) gelang es 1978 Goodin und Kollegen, einen Zusammenhang zwischen Alter und Latenz der P300 herzustellen (Goodin et al., 1978b). Weitere Studien folgten und bestätigten den Zusammenhang zwischen höheren Latenzen und zunehmendem Alter (Starr et al., 1987; Bashore, 1989; Onofrij et al., 1990; Picton, 1992). Widersprüche fand man bezüglich der Natur des Zusammenhangs: Einerseits wurde ein linearer (Yamashita et al., 1991) andererseits ein exponentieller Zusammenhang postuliert (Brown et al., 1983).

Die teilweise sehr unterschiedlichen Ergebnisse der zahlreichen Untersuchungen zu Alterseffekten ereignis-korrelierter Potenziale werden meist durch die unterschiedlichen Experimentalbedingungen der Studien erklärt: Reiz, Reizdarbietung, Stimulusintensität und -frequenz wie auch damit verbundene Aufgabe können sehr unterschiedlich sein. So zeigte Pfefferbaum eine stärkere Abhängigkeit der P3 vom Alter bei visuellen Aufgaben als bei akustischen Paradigmen (Pfefferbaum et al., 1984a). Kutas wiederum deutete eine Änderung der topografischen Verteilung der P3 und gar eine Zunahme der frontalen P3-Amplitude im höheren Alter (Kutas et al., 1994) und Vesco legte den Zusammenhang zwischen Stimulusintensität und P3-Latenz dar (Vesco et al., 1993).

	Latenz	Amplitude
N1	länger (Goodin et al., 1978a; Iragui et al., 1993; Anderer et al., 1996)	niedriger (Ford et al., 1995; Golob et al., 2001; Bennett et al., 2004; Bertoli et al., 2005; Cooper et al., 2006), gleich (Picton et al., 1984; Woods, 1992; Czigler et al., 1992; Iragui et al., 1993; Friedman et al., 1993; Ford et al., 1995; Pekkonen et al., 1996; Gaeta et al., 1998; Gaeta et al., 2001; Bertoli et al., 2002; Gaeta et al., 2003) oder höher (Karayanidis et al., 1995; Anderer et al., 1996; Chao et al., 1997; Alain et al., 1999; Amenedo et al., 1999; Gaeta et al., 2002; Kisley et al., 2005; Snyder et al., 2005)
N2	länger (Goodin et al., 1978a; Enoki et al., 1993; Iragui et al., 1993; Anderer et al., 1996)	höher (Woods, 1992; Friedman et al., 1993; Anderer et al., 1996; Gaeta et al., 2003; Czigler et al., 2006) niedriger (Karayanidis et al., 1995; Bertoli et al., 2005; Czigler et al., 2005)
P3a	länger (Brown et al., 1983; Picton et al., 1984; Polich et al., 1985; Celesia, 1986; Friedman et al., 1993; Iragui et al., 1993; Polich, 1996; Anderer et al., 1996; Fjell et al., 2001)	fehlende Habituation (Friedman et al., 1994; Fabiani et al., 1995; Kazmierski et al., 1995; Czigler et al., 2006; Weisz et al., 2006) mehr frontale Aktivierung (Pfefferbaum et al., 1984a; Yamaguchi et al., 1991; Friedman et al., 1993; Kutas et al., 1994; Friedman et al., 1994; Fabiani et al., 1995; Fjell et al., 2003)
P3b		mehr frontale Aktivierung (siehe oben) niedriger (Iragui et al., 1993; Gilmore, 1995; Friedman et al., 1997; Ford et al., 1997; McEvoy et al., 2001; Gaeta et al., 2003; Friedman et al., 2007)

Tabelle 1-4: Übersicht der Ergebnisse aus Forschungsarbeiten, die Alterseffekte der ereignis-korrelierten Potenziale N1, N2 und P3 bei gesunden Probanden untersucht haben (nach Friedman, 2008b)

Um die hohe Variabilität der verschiedenen Forschungsergebnisse zu untersuchen, veröffentlichte Polich 1996 eine Meta-Analyse, die 38 Arbeiten näher betrachtete (Polich, 1996). Hierbei zeigte Polich, wie die verschiedene Einflussfaktoren wie die Studienpopulation, der dargebotene Reiz und die experimentellen Aufgabenbedingungen unterschiedlich stark die P300 beeinflussten und damit wiederum die Studienergebnisse hinsichtlich einer Untersuchung auf Alterseffekte. Obwohl sich Polich im Wesentlichen auf den Einfluss des Alters auf die Latenz konzentrierte, diskutierte er ebenfalls die Bedeutung der Lokalisation unterschiedlicher P300-Amplitudenmaxima in Abhängigkeit des Alters. So gibt es etwa die Theorie, die P3-Verteilung würde mit dem Alter gleichmäßiger (Mullis et al., 1985). Andere behaupten, die P3 würde im Alter frontal stärker ausgeprägt (Friedman et al., 1993; Pfefferbaum et al., 1984a; Iragui et al., 1993; Kutas et al., 1994).

Für die vielfach beobachtete Alters-Anteriorisierung der P300 gibt es mehrere Erklärungsmodelle: Während einerseits eine reflektorische Mehraktivität frontaler Hirnanteile zur Kompensation altersbedingter Einbußen postuliert wird („frontal-lobe deficit“), gehen andere von einer gleichbleibenden frontalen P300 aus, die durch kleinere Amplituden am Scheitel relativ vergrößert erscheint (Pfefferbaum et al., 1984a; Yamaguchi et al., 1991; Friedman et al., 1993; Kutas et al., 1994; Friedman et al., 1994).

Die meisten Studien beziehen sich auf die sehr intensiv erforschte P300. Der Zusammenhang zwischen Alter und Latenz der P300 wurde dabei in vielen Studien gezeigt, die verschiedene Stimulusmodalitäten und Aufgaben beinhalteten. Weniger eindeutig ist jedoch der Zusammenhang zwischen Alter und Amplituden der P300: Während viele Studien auf die bereits erwähnte verstärkt frontale Aktivierung hinweisen, deuten andere Arbeiten auf niedrigere Amplituden (Iragui et al., 1993; Gilmore, 1995; Friedman et al., 1997). Untersuchungen zu Alterseffekten auf die NoGo-P300 sind in der Literatur bislang nicht belegt.

Die ereignis-korrelierten Potenziale N1 und N2 sind insgesamt seltener Gegenstand von Studien als die P300, entsprechend weniger Forschungsergebnisse gibt es zu Alterseffekten dieser Potenziale. Auch bei der N1 und N2 konnte ein Zusammenhang zwischen der Latenz und dem Alter nachgewiesen werden (Goodin et al., 1978a; Iragui et al., 1993; Anderer et al., 1998). Bezüglich der Amplituden gibt es jedoch eine Vielzahl gegensätzlicher Studienergebnisse: Während manche Autoren höhere N1- bzw. N2-Amplituden im Alter finden (Karayanidis et al., 1995), ergeben andere Forschungsarbeiten das Gegenteil (Ford et al., 1995; Friedman et al., 1993; Anderer et al., 1996). Hier besteht noch Bedarf zu weiteren Forschungsarbeiten.

2. Fragestellungen

Die neurowissenschaftliche Forschung hat in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte verzeichnen können, die sowohl kulturellen Änderungen als auch technischen Neuerungen zu verdanken sind. Die zentrale Frage nach den inneren Zusammenhängen menschlichen Denkens treibt dazu an, in ausgeklügelten Studien Teilaspekte aufzuschlüsseln. Mit den exekutiven Funktionen wurden bereits viele Aspekte kognitiver Fähigkeiten untersucht, die nach wie vor im Mittelpunkt neurowissenschaftlicher Forschung stehen. Besonders das Konzept der Willensfreiheit wurde in den letzten Jahren verstärkt aufgegriffen und durch mediale Aufmerksamkeit auch einem breiteren Publikum zugänglich.

Obwohl es zahlreiche Untersuchungen zu einzelnen Aspekten der exekutiven Funktionen und dabei auch volitionaler Gesichtspunkte gibt, finden sich nur wenige Studien, die etwaige Effekte des Alters auf die neuronalen Korrelate von Entscheidungen sowie deren räumliche Verteilung prüfen. Darüber hinaus finden sich in der Literatur teils widersprüchliche Ergebnisse bezüglich Alterseffekten und ereignis-korrelierten Potenzialen.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Alterseffekte auf Verhaltenskontrollprozesse gesunder, erwachsener Probanden. Dabei sollen folgende Fragestellungen betrachtet werden:

- ▶ Welchen Effekt übt das Alter auf neuronale Korrelate exekutiver Funktionen in Abhängigkeit von experimentell geschaffenen Testbedingungen aus?
 - ▶ Entscheidungsbedingung mit Antwortreaktion („freiwilliges Antworten“)
 - ▶ Entscheidungsbedingung ohne Antwortreaktion („freiwilliges Unterlassen“)
 - ▶ Go-Bedingung („instruiertes Antworten“)
 - ▶ NoGo-Bedingung („instruiertes Unterlassen“)
- ▶ Welchen Effekt übt das Alter auf die räumliche Verteilung evozierter Potenziale aus?
 - ▶ N1
 - ▶ N2
 - ▶ P3a / P3b
- ▶ Wie unterscheiden sich die Reaktionszeiten junger und alter Probanden?
- ▶ Wie beeinflussen die erhobene Mühe und Anstrengungsbereitschaft sowie gemessene Leistungsparameter während des Experiments die neuronale Aktivierung?

3. Methoden

Die Studie umfasste die Erhebung demografischer und psychometrischer Daten sowie die Messung hirnelektrischer Ströme während eines Reaktions- und Entscheidungsversuchs bei gesunden Probanden. Die Ethikkommission der Ludwig-Maximilians-Universität München hat ein positives Votum zur Durchführung der Studie erteilt, welche wiederum den ethischen Grundsätzen der Deklaration von Helsinki des Weltärztebundes entsprach (World Medical Association, 2000). Jedem Proband stand die Teilnahme an der Studie frei. Eine ausführliche Aufklärung über die Freiwilligkeit der Untersuchung, die Möglichkeit zum jederzeitigen Widerruf der Teilnahme ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile sowie den Ablauf des Versuchs erfolgte im Vorfeld sowohl im persönlichen Gespräch als auch durch schriftlich festgehaltene Informationen. Für die Teilnahme an der Studie erhielt jeder Proband eine Aufwandsentschädigung von € 25,00.

3.1. Probanden

An der Studie nahmen insgesamt 42 gesunde Probanden teil, die über Aushänge an der LMU München, den Münchener Stadtbibliotheken sowie aus dem Kollegen- und Bekanntenkreis gewonnen wurden. Um Störfaktoren durch neuro-degenerative Prozesse des hohen Alters zu vermeiden, wurde als obere Altersgrenze 65 Jahre festgelegt (Levinson et al., 1978; Folstein et al., 1985; Levinson, 1986; Lindesay et al., 1989; Graham et al., 1997). Zu den Ausschlüssen gehörte eine Probandin, die aufgrund Auffälligkeiten in der psychometrischen Testung ausgeschlossen werden musste, sowie eine weitere Probandin, bei der erst in der Auswertungsphase der Studie starke Artefakte in der EEG-Messung auffielen. Fünf weitere Probanden mussten wegen häufiger Fehler bei der Aufgabenbearbeitung bzw. zu einseitiger Entscheidungen (fast ausschließliches Tastendrücken bzw. fast ausschließliches Entspannen; *siehe Versuchsanordnung, S. 28*) bei der Entscheidungsbedingung ebenfalls ausgeschlossen werden. Hierdurch sollten mögliche Verzerrungen durch kognitive Defizite vermieden werden (Leimkuhler et al., 1985; Kaiser et al., 2003; Mathalon et al., 2003; Lee et al., 2009).

3.1.1. Einschlusskriterien

Folgende Kriterien mussten erfüllt sein, um einen Probanden in die Studie einzuschließen:

- ▶ Männer und Frauen im Alter zwischen 18 und 65 Jahren
- ▶ Schriftliche Einverständniserklärung

3.1.2. Ausschlusskriterien

Traf eines der folgenden Kriterien bei einem Probanden zu, wurde dieser aus der Studie ausgeschlossen:

- ▶ Vorliegen einer psychiatrischen Erkrankung
- ▶ Vorliegen einer neurologischen Erkrankung
- ▶ Vorliegen einer Hörstörung
- ▶ Einnahme von psychotropen Substanzen innerhalb der 14 Tage vor dem Versuch

3.1.3. Beschreibung der Stichprobe

Insgesamt wurden 35 gesunde Probanden als Versuchsteilnehmer berücksichtigt (13 Männer, 22 Frauen, Verhältnis 1:1,69). Der Median der Altersverteilung lag bei 31,0 Jahren (Mittelwert $36,5 \pm 11,7$ im Wertebereich von 22 bis 61 Jahren) und wurde als Grenzwert für die Unterteilung der Stichprobe in eine jüngere und eine ältere Probandengruppe mit 18 respektive 17 Personen genutzt. Die jüngere Probandengruppe hatte ein durchschnittliches Alter von 26,2 Jahren ($\pm 2,4$ Jahre, Spannweite 22 bis 31 Jahre). Dieser Gruppe gehörten 8 Männer und 10 Frauen an (Verhältnis 1:1,25). Das Durchschnittsalter der älteren Gruppe betrug 47,4 Jahre ($\pm 6,4$ Jahre, Spannweite 36 bis 61 Jahre) und bestand aus 5 Männern und 12 Frauen (Verhältnis 1:2,4) (siehe Tabelle 3-1).

Stichprobe		jüngere Probanden	ältere Probanden	alle Probanden
Anzahl	Gesamt	18	17	35
	männlich ¹	8 (44,4%)	5 (29,4%)	13 (37,1%)
	weiblich ¹	10 (55,6%)	12 (70,6%)	22 (62,9%)
Alter ²		26,2 \pm 2,4	47,4 \pm 6,4	36,5 \pm 11,7
Ausbildungsjahre ²		17,3 \pm 3,0	16,3 \pm 2,8	16,8 \pm 2,9
Anmerkungen 1: mit prozentualem Anteil an Gesamtzahl 2: Mittelwert und Standardabweichung				

Tabelle 3-1: Alter, Geschlecht und Ausbildung der Stichprobe

3.1.4. Psychometrische Untersuchung

Um Daten hinsichtlich Demografie, Befindlichkeit, Persönlichkeitsstrukturen und medizinischer Vorgeschichte zu erheben, beantwortete jeder Proband vor dem experimentellen Paradigma mehrere Fragebögen.

3.1.4.1. Soziodemografischer Fragebogen

Mit diesem Fragebogen wurden soziodemografische Daten (Schul-/Ausbildungs-/Berufsjahre, erlernter Beruf, ausgeübte Berufe, Schul- und Ausbildungsstand sowie Berufe der Eltern) sowie orientierende Informationen zur bisherigen Krankheitsgeschichte (Hörbehinderung, frühere oder aktuelle neurologische Erkrankungen, sonstige schwere/chronische Erkrankungen, Geburtskomplikationen, Störungen der Entwicklung, diagnostizierte Erkrankungen erst- und zweitgradig Verwandter) und zum Substanzgebrauch (Medikamente, Tabak, Alkohol, Drogen) erhoben (*siehe Anhang, S. 103*).

3.1.4.2. Beck-Depressions-Inventar (BDI)

Die 21 Items des Beck-Depressions-Inventars wurden genutzt, um depressive Symptome bei den Untersuchungsteilnehmern auszuschließen (Beck et al., 1961).

3.1.4.3. Überarbeitete Symptom-Checkliste (SCL-90-R)

Die aus 90 Items bestehende, überarbeitete Symptom-Checkliste von Derogatis erlaubte die Erfassung subjektiver Beeinträchtigungen körperlicher oder auch psychischer Art der letzten sieben Tage (Derogatis, 1977).

3.1.4.4. State-Trait-Angstinventar (STAI)

Die 80 Items des deutschen State-Trait-Angstinventars nach Laux erfassten die Zustandsangst und allgemeine Ängstlichkeit (Laux et al., 1981).

3.1.4.5. State-Trait-Ärgerausdrucksinventar (STAXI)

Die deutsche Fassung des State-Trait-Ärgerausdrucksinventar von Schwenkmezger erfasste den momentanen Ärger sowie die allgemeine Disposition zu Ärger (Schwenkmezger et al., 1992).

3.1.4.6. Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung (VAS)

Im Anschluss an das Experiment beurteilten die Probanden ihre eigene Leistung, Mühe und Anstrengung anhand einer 5-stufigen Likert-Skala. Wie Mulert et al. 2005 zeigen konnte, korrelieren diese Werte korrelieren mit den Reaktionszeiten und Amplitudenhöhen der N1 (Mulert et al., 2005a) (*siehe Anhang, S. 106*).

3.2. Versuchsanordnung

Das Experiment beruhte auf einem modifizierten Go/NoGo-Paradigma mit fünf verschiedenen Bedingungen. Als auditorische Stimuli wurden drei Sinustöne (Dauer 50ms, Schalldruckpegel 80 dB) unterschiedlicher Frequenz (800 Hz, 1.000 Hz, 1.300 Hz) verwendet. Jeweils zwei im Abstand von 1.000 ms aufeinander folgende Töne bildeten eine definierte, experimentelle Bedingung (*siehe Tabelle 3-2*). Der Ton mit der mittleren Frequenz (1.000 Hz) diente als Signalton, der in Kombination mit dem zweiten Ton zu einer bestimmten Reaktion aufforderte. Folgte dem Signalton ein Ton hoher Frequenz (1.300 Hz), sollte der Proband so schnell wie möglich eine Antworttaste drücken (Go-Bedingung). Folgte dem Signalton jedoch der niedrig-frequente Ton (800 Hz), so war der Proband angehalten, die Antwortreaktion zu unterdrücken (NoGo-Bedingung). Erklang nach dem Signalton ein weiterer mittelfrequenter Ton (1.000 Hz), waren die Teilnehmer angewiesen, frei über eine Antwort per Tastendruck zu entscheiden (Entscheidungsbedingung; hierbei: mit Reaktion = Selektion+, ohne Reaktion = Selektion-). Die Probanden sollten sich bei jeder Entscheidungs-Tonfolge erneut zufällig für oder gegen die Reaktion entscheiden und über den gesamten Versuch etwa gleich häufig reagieren und nicht reagieren. Bei einem Ton tiefer Frequenz (800 Hz) als erstem Ton folgte ein Ton mit mittlerer oder hoher Frequenz (1.000 Hz bzw. 1.300 Hz), woraufhin keine Reaktion erfolgen sollte (Kontrollbedingungen).

Bedingung	Tonkombination	Erwartete Reaktion	Darbietungen
Go	mittel - hoch	immer drücken	160
NoGo	mittel - tief	nicht drücken	80
Entscheidung	mittel - mittel	wahlweise drücken	80
Kontrolle 1	tief - tief	nicht beachten	80
Kontrolle 2	tief - hoch	nicht beachten	80

Tabelle 3-2: Übersicht zur Versuchsanordnung

Die Bedingungen wurden pseudo-randomisiert dargeboten. Die Go-Bedingung wurde insgesamt 160 Mal präsentiert, die anderen Stimuluspaare wurden jeweils 80 Mal dargeboten. Das Interstimulusintervall zwischen jedem Stimuluspaar betrug 3 Sekunden. Die Probanden sollten so schnell wie möglich nach dem jeweiligen zweiten Stimulus reagieren, dabei aber möglichst keine Fehler begehen. Um die Probanden mit dem Versuch vertraut zu machen, durchlief jeder Proband vor dem eigentlichen Versuch einen 10-minütigen Probedurchlauf. Dabei konnten sich die Probanden mit den verschiedenen Bedingungen vertraut machen und das korrekte Verständnis der Versuchsanordnung geprüft werden.

3.3. Untersuchungstechnik

3.3.1. Generierung akustischer Stimuli und Antwort-Aufzeichnung

Die Generierung der akustischen Stimuli erfolgte mit Hilfe des Programms BrainStim (Firma Brain Products GmbH, München). Die Versuchsteilnehmer vernahmen diese über Kopfhörer der Marke Telephonics, Modell TDH-39P (Firma Telephonics, Farmingdale, New York, U.S.A.). Die Reaktionen der Probanden wurden mit einfachen Tastern erfasst, die über eine Schnittstelle am Computer direkt von der Aufzeichnungssoftware registriert und gespeichert wurden.

3.3.2. EEG

3.3.2.1. Aufzeichnung

Die EEG-Aufzeichnung erfolgte unter standardisierten Bedingungen zwischen 8 und 16 Uhr. Die Durchführung der EEG-Aufzeichnung erfolgte in der Abteilung für Klinische Neurophysiologie der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der LMU München ausschließlich von Mitarbeiterinnen mit langjähriger Erfahrung in der EEG-Aufzeichnung. Während des gesamten Versuchs lagen die Probanden in einem bequemen Sessel in einem elektromagnetisch abgeschirmten, schalldichten Raum, in dem sie durch eine Glasscheibe vom Nebenraum aus beobachtet werden konnten. Die Probanden sollten während der EEG-Aufzeichnung ruhig liegen bleiben, die Gesichtsmuskulatur entspannen und die Augen offen und ruhig halten. Als zusätzliche Hilfe, die Augen ruhig zu halten, war in der Ableitkabine ein Bild als Fixpunkt an der Wand angebracht.

Zur Ableitung des EEGs wurde den Probanden eine Elektrodenkappe (Electro-Cap Electrode System, Firma Electro-Cap International, Inc. (ECI), Eaton, Ohio, U.S.A.) aufgesetzt. Die 32 Zinn-Zinnchlorid-Elektroden dieser Kappe waren entsprechend dem internationalen 10/20-System der American Electroencephalographic Society erweitert um die Zusatzelektroden Fc1, Fc2, Fc5, Fc6, T1, T2, Cp5, Cp6, P9 und P10 standardisiert angeordnet (*siehe Abbildung 3-1*). Hierbei waren 29 Elektroden und die Erdungselektrode (Fc1) in die Kappe integriert, drei Zusatzelektroden an den Mastoiden links und rechts sowie als Elektrookulogramm (EOG) 1 cm lateral des rechten Auges angebracht. Der Kontakt zwischen der Kopfhaut und den Elektroden wurde durch ein spezielles Elektrodengel (Electro-Gel™, Firma Electro-Cap International, Inc. (ECI), Eaton, Ohio, U.S.A.) hergestellt. Die Aufzeichnung der EEG-Ströme erfolgte mittels eines konventionellen 32-Kanal-EEG-Geräts der Marke Neuroscan (SynAmps und Acquire 4.0, Firma Compumedics, Charlotte, North Carolina, U.S.A.) und wurde mit Hilfe der Software

BrainVision Recorder (Firma Brain Products GmbH, München) gespeichert. Die Antwortreaktionen der Probanden wurden ebenfalls mit BrainVision Recorder aufgezeichnet.

Vor der EEG-Aufzeichnung wurden durch Impedanzmessung die Hautwiderstände gemessen, welche unter 10 k Ω lagen. Das EEG wurde mit einer Abtastrate von 1.000 Hz ohne Filter aufgezeichnet.

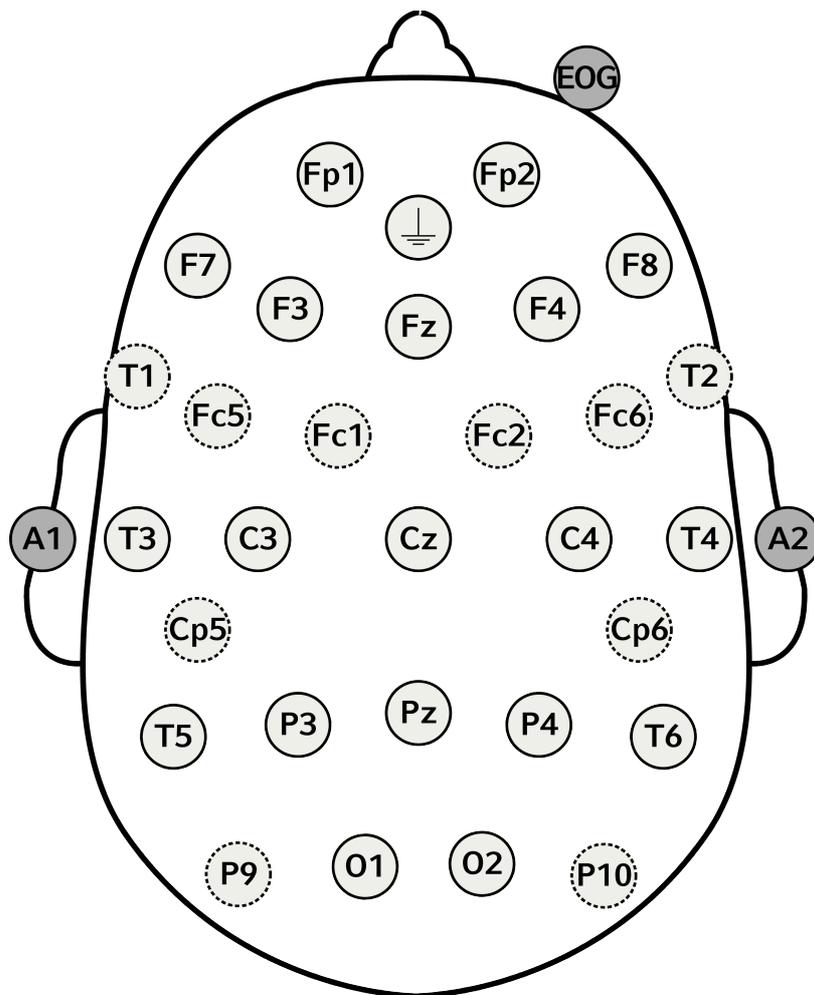


Abbildung 3-1: Schematische Zeichnung der verwendeten Elektroden zur EEG-Aufzeichnung (hellgrau: Elektroden nach dem internationalen 10/20-System, American Electroencephalographic Society, 1991; hellgrau mit gestrichelter Umrandung: Zusatzelektroden; dunkelgrau: Mastoid- und EOG-Elektroden)

3.3.2.2. Auswertung

Die Auswertung der EEG-Daten erfolgte mit der Software BrainVision Analyzer in Version 1.05 (Firma Brain Products GmbH, München). Als Referenzelektrode diente allen anderen Kanälen die Cz-Elektrode. Die Daten wurden mit einem 70Hz-Tiefpass-Filter und einem 0,5Hz-Hochpass-Filter (Zeitkonstante = 0,3 s) gefiltert (Butterworth, 1974). Entsprechend den in der Versuchsanordnung definierten Bedingungen

erfolgte eine Segmentierung der EEG-Aufzeichnung. Diese Segmente umfassten jeweils den Bereich von 200 ms vor dem jeweiligen Stimulus bis zu 900 ms nach dem Stimulus. Mit einer computergestützten Artefaktkorrektur (Ausschluss von Segmenten mit Spannungsabweichungen von über $\pm 70 \mu\text{V}$) und einer Baseline-Korrektur (Baseline = EEG-Aktivität in den 200 ms vor dem Stimulus) wurden Störeinflüsse auf den zu untersuchenden EEG-Bereich reduziert. Aus den so gewonnen Segmentdaten wurden reizsynchrone Mittel (Averages) der evozierten Potenziale berechnet, sofern mindestens 30 artefaktfreie Segmente vorlagen. Die Latenzen und Amplituden der evozierten Potenziale N1, N2, P3a und P3b wurden computergestützt in vorgegeben Zeitfenstern ermittelt (*siehe Tabelle 3-1*).

Stimmten die Reaktionen bei mehr als 50 Darbietungen nicht zu den definierten, experimentellen Bedingungen überein (hohe Fehlerzahl bei Versuchsdurchführung) oder zeigte sich eine extreme Tendenz zu gar keiner bzw. ausschließlicher Reaktion bei der Entscheidungsbedingung ($n \leq 10$ bzw. $n \geq 70$), wurden die betroffenen Versuchsteilnehmer von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Eine Probandin wurde von der weiteren Auswertung ausgeschlossen, da im Rahmen der psychometrischen Untersuchung Auffälligkeiten bestanden. Eine weitere Probandin musste aufgrund starker Artefakte im EEG ebenfalls von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden.

Evoziertes Potenzial	Zeitfenster (von)	Zeitfenster (bis)
N1	70 ms	130 ms
N2	170 ms	230 ms
P3a	180 ms	360 ms
P3b	300 ms	500 ms

Tabelle 3-3: Zeitfenster für die computergestützte Detektion der evozierten Potenziale

3.4. Statistik

Die statistischen Berechnungen erfolgten mit Hilfe des Programms SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) in Version 15 für Microsoft Windows.

3.4.1. Ausreißeranalyse

Um mögliche Verzerrungseffekte durch Ausreißer zu minimieren, wurde eine Ausreißeranalyse durchgeführt. Hierbei wurden die Lagemaße zur Verteilung der Amplitudenwerte jeder abgeleiteten Elektroden errechnet und Werte unterhalb des ersten Quartils minus drei Interquartilsabständen bzw.

oberhalb des dritten Quartils plus drei Interquartilsabständen als Ausreißer identifiziert und von weiteren Berechnungen ausgeschlossen (Tukey, 1977; Clark-Carter, 2004).

3.4.2. Gruppenvergleiche

Bei nicht a priori festgelegten Gruppen wurden zur Durchführung von Vergleichsstatistiken anhand bestimmter Merkmale die Merkmalsausprägungen aller Probanden deskriptiv untersucht und der Median als Cut-Off-Wert für die Zugehörigkeit zu der einen oder anderen Gruppe ermittelt.

3.4.3. MANOVA mit Messwiederholung

Zur Untersuchung von Effekten bei mehrfaktoriellem Design wurden multivariate Varianzanalysen (MANOVA) mit Messwiederholung durchgeführt. Hierbei wurde jeweils mittels Mauchly-Test die Annahme auf Sphärizität überprüft und bei signifikant positiven Ergebnissen die Anzahl der Freiheitsgrade mittels Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser (bei $\epsilon < 0,75$) korrigiert. Post-hoc-t-Tests mit Bonferroni-Korrektur wurden genutzt, um signifikante Effekte näher zu beurteilen.

Es wurde einerseits ein 3x4-Modell genutzt mit den Faktoren Elektrode (Fz, Cz, Pz) und Bedingung (Go, NoGo, freiwillige Reaktion, Kontrolle), andererseits ein 3x2-Modell mit den Faktoren Elektrode (Fz, Cz, Pz) und Entscheidung (mit Reaktion, ohne Reaktion).

3.4.4. t-Tests

Zur Feststellung von statistisch signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten jüngerer und älterer Probanden wurde der t-Test für unabhängige Stichproben genutzt. Die Annahme gleicher Varianzen wurde hierbei mittels Levene-Test auf Varianzgleichheit überprüft und bei nicht-signifikantem Ergebnis der t-Wert mit Hilfe des Tests mit gepoolten Varianzen gerechnet, ansonsten mit dem konservativeren t-Test bei ungleichen Varianzen.

3.4.5. Mann-Whitney-U-Test

Bei Ungleichverteilung der Geschlechter in den beiden Vergleichsgruppen wurde zur Homogenitätstestung der Mann-Whitney-U-Test gerechnet, um bei entsprechend hoher Überschreitungswahrscheinlichkeit des Tests etwaige geschlechtsspezifische Unterschiede der untersuchten Potenziale auszuschließen.

3.4.6. Korrelationen

Zur Überprüfung möglicher linearer Zusammenhänge zwischen zwei Merkmalen wurden Korrelationen zweiseitig nach Pearson berechnet. Handelte es sich bei mindestens einem der Merkmale um ein ordinal-skaliertes Item, wurde statt des Pearson-Algorithmus die Korrelation nach Spearman berechnet.

3.4.7. Signifikanz

Entsprechend der in der medizinischen Wissenschaft üblichen Vorgehensweise wurde das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ festgelegt. Die Nullhypothesen statistischer Tests wurden bei kleineren p-Werten verworfen und das Ergebnis als „signifikant“ erachtet. Bei $p < 0,01$ wurde das Ergebnis als „hoch signifikant“ aufgefasst. Statistische Tests mit nicht-signifikantem $p < 0,1$ entsprachen Trends.

4. Ergebnisse

Für die Analyse der EEG-Daten blieben nach Artefaktkorrektur im Mittel 134,9 Segmente für die Go-Bedingung, 74,0 Segmente für die NoGo-Bedingung, 74,7 Segmente für die Entscheidungsbedingung (davon 43,4 Segmente mit und 31,3 Segmente ohne Reaktion) sowie 143,7 Segmente für die Kontrollbedingung übrig.

Bedingung	Anzahl	EEG-Segmente [n]	EEG-Segmente [%]
Go	160	134,9	84,3%
NoGo	80	74,0	92,5%
Entscheidung	80	74,7	93,4%
Kontrollen	160	143,7	89,8%

Tabelle 4-1: Anzahl der berücksichtigten EEG-Segmente nach Artefaktkorrektur im Verhältnis zur Anzahl der dargebotenen Experimentalbedingungen

4.1. Jüngere Probanden

4.1.1. Verhaltensdaten

Von den 160 dargebotenen Go-Stimuli reagierten die jüngeren Probanden bei 153,9 ($\pm 4,8$) der Aufgabe entsprechend richtig mit einem Tastendruck. Bei der 80-fach präsentierten Entscheidungsbedingung reagierten sie 46,1 ($\pm 9,5$) Mal mit Tastendruck. Im Mittel kam es bei 9,8 ($\pm 9,6$) Reizen bei NoGo- bzw. Kontrollbedingungen zu einer fehlerhaften Antwort.

Bedingung	Anzahl	Reaktionen [n]	Reaktionen [%]
Go	160	153,9	96,2%
Entscheidung	80	46,1	57,6%
NoGo / Kontrollen	240	9,8	4,1%

Tabelle 4-2: Reaktionen bei jüngeren Probanden

Die mittlere Reaktionszeit zwischen Reizdarbietung und Tastendruck betrug 414,5 ms ($\pm 102,7$ ms) bei Go-Bedingungen und 679,1 ms ($\pm 181,1$ ms) bei der Entscheidungsbedingung. Die Reaktionszeit bei freier Entscheidung war signifikant verlängert ($F(1, 17) = 113,159$; $p < 0,001$) und korrelierte signifikant mit der Reaktionszeit der Go-Reaktion ($r = 0,865$; $p < 0,001$).

4.1.2. Elektrophysiologische Daten

4.1.2.1. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Bedingungen

Bei der **N1-Amplitude** zeigte der Mauchly-Test sowohl bei den Elektroden ($\chi^2 = 12,35$; $p = 0,002$) als auch der Interaktion der Haupteffekte Elektroden und Bedingungen ($\chi^2 = 32,45$; $p = 0,042$) eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme, so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser (bei $\varepsilon = 0,65$ bzw. $0,66$) korrigiert wurden. Dabei zeigten sich signifikante Effekte auf die Amplitude durch die Elektrodenposition ($F(1,3, 22,11) = 80,1$; $p < 0,001$), die dargebotene Bedingung ($F(3, 51) = 6,92$; $p = 0,001$) sowie deren Interaktion ($F(3,95, 67,19) = 10,34$; $p < 0,001$). Post-hoc-Tests zeigten signifikant negativere N1-Amplituden in Fz gegenüber Cz und Pz sowie in Cz gegenüber Pz (jeweils $p < 0,001$). NoGo-N1-Amplituden waren signifikant höher gegenüber N1-Amplituden bei der Entscheidungs- ($p = 0,003$) bzw. der Kontrollbedingung ($p = 0,002$).

Bei der **N2-Amplitude** verletzen, wie der Mauchly-Test zeigte, die Elektrodenposition ($\chi^2 = 15,21$; $p < 0,001$) und die Interaktion der Haupteffekte die Annahme auf Sphärizität ($\chi^2 = 35,79$; $p = 0,018$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,62$ bzw. $0,68$) korrigiert. Signifikante Effekte konnten hierbei sowohl für die Haupteffekte als auch die Interaktion beider festgestellt werden. Ein hoher F-Wert zeigte sich in Abhängigkeit von der Elektrodenposition ($F(1,24, 21,07) = 21,65$; $p < 0,001$) sowie ein signifikantes Ergebnis bei der Bedingung ($F(3, 51) = 9,03$; $p < 0,001$). Die Interaktion zwischen Aufgabe und Elektrode war ebenfalls signifikant ($F(4,07, 69,18) = 9,92$; $p < 0,001$). Die N2-Amplitude war in Fz höher als in Cz ($p < 0,001$) sowie höher als in Pz ($p = 0,001$). In der Post-hoc-Analyse zeigten sich signifikanten Unterschiede der N2-Amplitude zwischen Go und Entscheidung ($p = 0,006$) bzw. Kontrolle ($p = 0,006$) sowie zwischen NoGo und Entscheidung ($p = 0,036$).

Die Annahme auf Sphärizität war bei der **P3a-Amplitude** für die Interaktion der Haupteffekte verletzt (Mauchly-Test, $\chi^2 = 62,35$; $p < 0,001$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,42$) korrigiert. Es zeigten sich signifikante Effekte sowohl bei den Haupteffekten Elektrodenposition ($F(2, 34) = 23,46$; $p < 0,001$) und Bedingung ($F(3, 51) = 23,18$; $p < 0,001$) als auch der Interaktion beider Haupteffekte ($F(2,52, 42,89) = 10,94$; $p < 0,001$). Dabei unterschied sich die P3a-Amplitude in Fz signifikant von größeren P3a-Amplituden in Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p < 0,001$). Die P3a-Amplitude war signifikant größer bei Go gegenüber der Kontrollbedingung ($p = 0,008$), bei NoGo wiederum signifikant größer als bei Go ($p = 0,001$), Entscheidungsbedingung ($p = 0,001$) und Kontrollbedingung ($p < 0,001$) sowie bei Entscheidung größer als bei der Kontrollbedingung ($p = 0,002$).

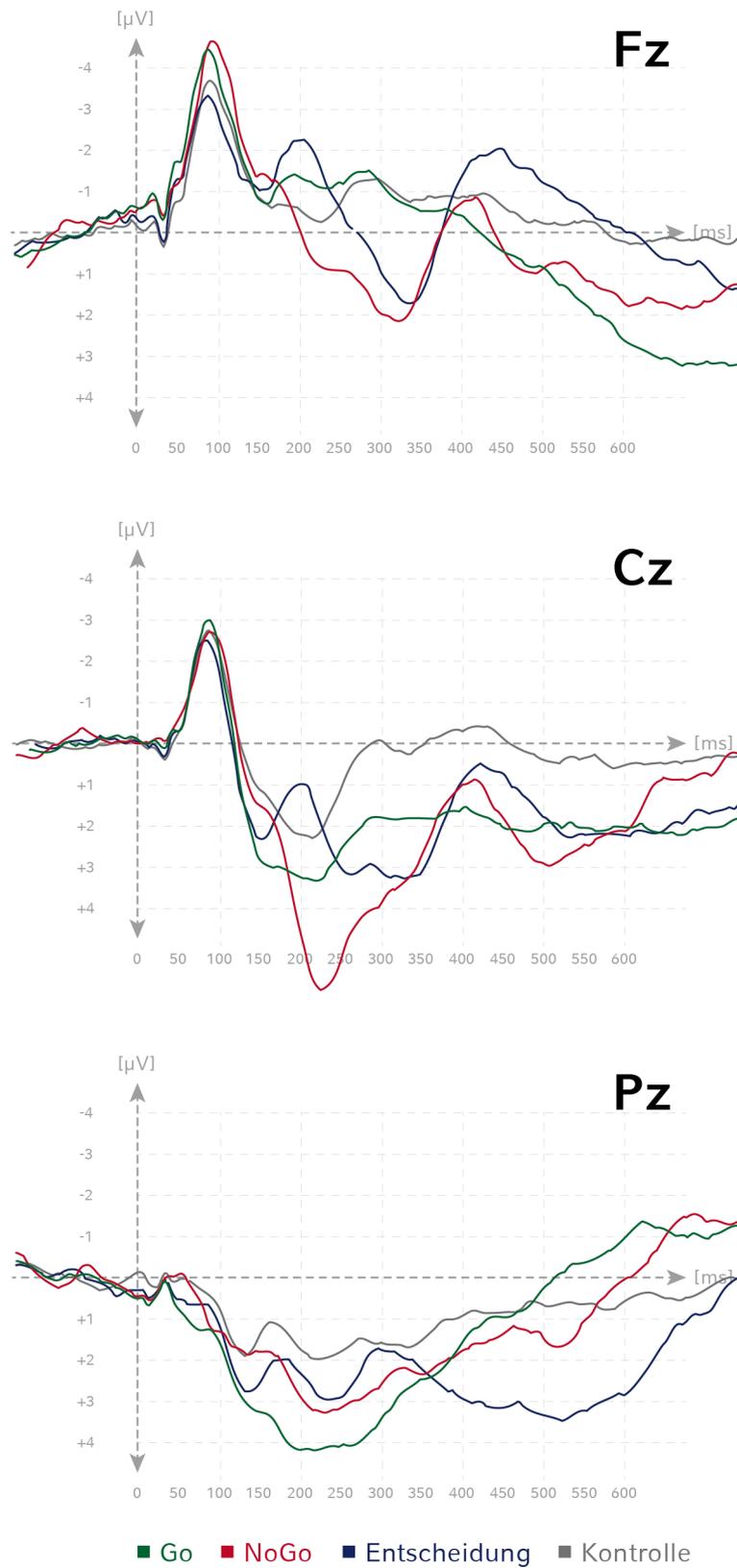


Abbildung 4-1: Mittlere Potenzialverläufe der jüngeren Probanden an Fz, Cz und Pz bei Go-, NoGo-, Entscheidungs- und Kontrollbedingung

Bei der **P3b-Amplitude** zeigte der Mauchly-Test bei der Interaktion zwischen Elektrodenposition und Bedingung eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme ($\chi^2 = 58,79$; $p < 0,001$), so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,44$) korrigiert wurden. Signifikante Effekte konnten bei Elektrodenposition ($F(2, 34) = 11,76$; $p < 0,001$) und Bedingung ($F(3, 51) = 36,02$; $p < 0,001$) sowie bei der Interaktion zwischen beiden Haupteffekten ($F(2,64, 44,89) = 4,07$; $p = 0,015$) festgestellt werden. Post-hoc-Tests zeigten signifikant kleinere P3b-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p = 0,005$). Die P3b-Amplitude war bei Go signifikant kleiner als bei NoGo ($p = 0,005$) und Entscheidung ($p = 0,048$) und signifikant größer als bei der Kontrollbedingung ($p < 0,001$). Bei NoGo wiederum zeigten sich signifikant größere P3b-Amplituden als bei der Kontrollbedingung ($p < 0,001$). Die P3b-Amplituden der Entscheidungsbedingung waren signifikant größer als die der Kontrollbedingung ($p < 0,001$).

4.1.2.2. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Entscheidungsreaktion

Die Vergleichsuntersuchung der **N1-Amplituden** bei Entscheidung mit und ohne Reaktion ergab signifikante Effekte bei der Elektrodenposition ($F(1,47, 24,96) = 68,91$; $p < 0,001$). Wegen Verletzung der Sphärizitäts-Annahme bei den Elektroden im Mauchly-Test ($\chi^2 = 7,19$; $p = 0,027$), wurden die Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,734$) korrigiert. Weder die Entscheidung selbst ($F(1, 17) = 0,84$; $p = 0,372$) noch deren Interaktion mit der Elektrodenposition ($F(2, 34) = 0,64$; $p = 0,534$) waren signifikant. In den Post-hoc-Tests zeigten sich signifikant negativere N1-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p = 0,005$) und Pz ($p < 0,001$) bzw. in Cz gegenüber Pz ($p < 0,001$).

Die **N2-Amplitude** verletzte im Mauchly-Test die Sphärizitäts-Annahme bei Elektrodenposition ($\chi^2 = 16,1$; $p < 0,001$) und Interaktion von Elektrodenposition und Entscheidung ($\chi^2 = 19,7$; $p < 0,001$) mit entsprechender Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,61$ bzw. $0,59$). Es zeigte sich ein signifikanter Effekt der Elektrodenposition ($F(1,22, 20,8) = 23,36$; $p < 0,001$), nicht jedoch der Entscheidung ($F(1, 17) = 0,23$; $p = 0,637$). Die Interaktion von Elektrodenposition und Entscheidung war ebenfalls nicht signifikant ($F(1,17, 19,91) = 0,44$; $p = 0,548$). Die Post-hoc-Testung zeigte signifikant größere N2-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p < 0,001$) sowie Pz ($p < 0,001$).

Bei der **P3a-Amplitude** musste wegen der Verletzung der Sphärizitäts-Annahme bei der Interaktion von Elektrodenposition und Entscheidung ($\chi^2 = 11,0$; $p = 0,004$) eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,67$) vorgenommen werden. Es zeigte sich ein signifikanter Effekt bezüglich der Elektrodenposition ($F(2, 34) = 10,02$; $p < 0,001$), nicht jedoch bei der Entscheidung ($F(1, 17) = 2,69$; $p =$

0,119) oder dem Interaktionseffekt (Elektrode x Selektion) ($F(1,34, 22,71) = 0,33; p = 0,638$). In der frontalen Elektrode Fz waren P3a-Amplituden signifikant kleiner als in Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p = 0,046$).

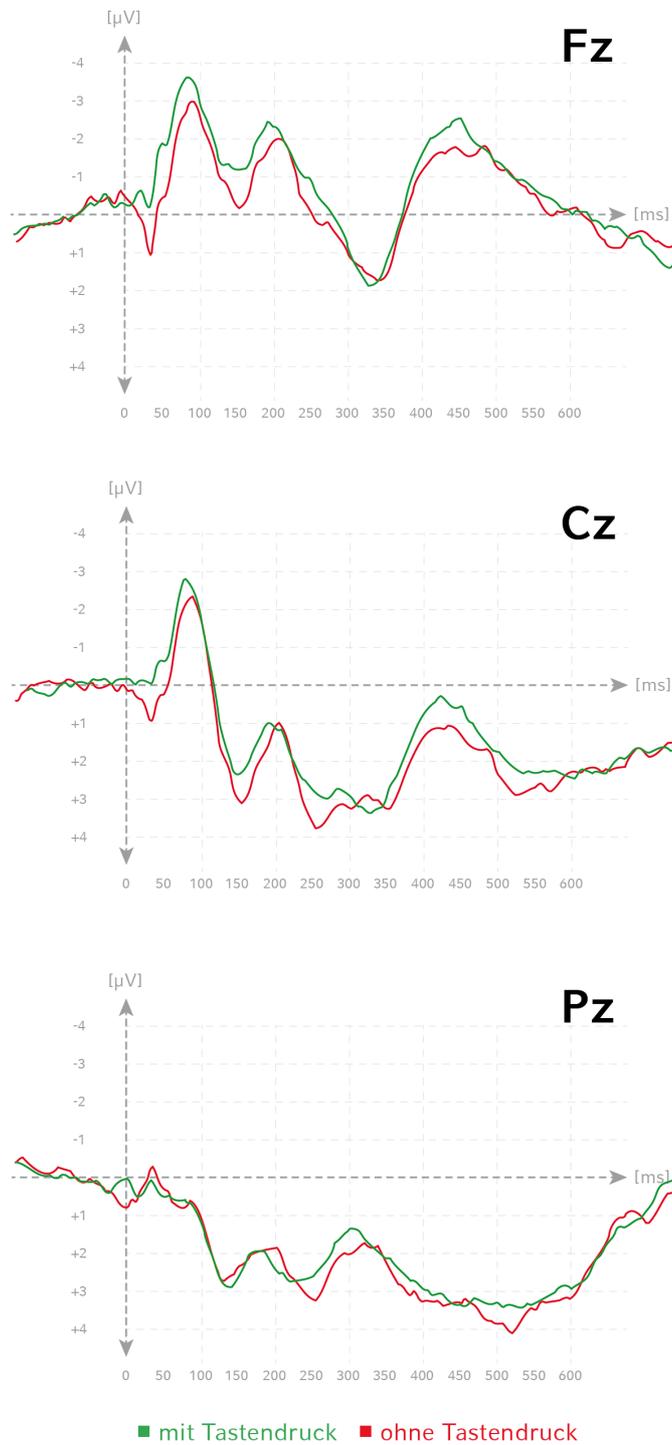


Abbildung 4-2: Mittlere Potenzialverläufe der jüngeren Probanden an Fz, Cz und Pz bei Entscheidungsbedingungen mit und ohne Tastendruck

Wie der Mauchly-Test zeigte, verletzte die Interaktion der Haupteffekte bei der **P3b-Amplitude** die Annahme auf Sphärizität ($\chi^2 = 21,17$; $p < 0,001$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0,58$) korrigiert. Ein signifikanter Effekt zeigte sich hinsichtlich der Elektrodenposition ($F(2, 34) = 10,6$; $p < 0,001$). Die Entscheidung hatte keinen signifikanten Effekt ($F(1, 17) = 0,35$; $p = 0,563$), ebensowenig die Interaktion ($F(1,15, 19,61) = 0,9$; $p = 0,369$). Die Amplituden der P3b waren in Fz signifikant kleiner als in Cz ($p = 0,001$) und Pz ($p = 0,011$).

4.1.3. Korrelationen Verhaltens- zu elektrophysiologischen Daten

Die Reaktionszeit der Go-Bedingung korrelierte signifikant mit P3b-Amplituden in Cz ($r = -0,47$; $p = 0,05$). In C4 zeigten sowohl P3a- als auch P3b-Amplituden signifikante Korrelationen mit der Reaktionsgeschwindigkeit ($r = -0,47$; $p = 0,047$; bzw. $r = -0,54$; $p = 0,019$).

Die Reaktionszeit der Entscheidungsbedingung korrelierte signifikant mit N1-Amplituden in Fz ($r = -0,048$; $p = 0,04$) und P4 ($r = 0,55$; $p = 0,018$), P3a-Amplituden in C3 ($r = 0,49$; $p = 0,038$), P3 ($r = 0,48$; $p = 0,043$) und P4 ($r = 0,55$; $p = 0,017$) sowie P3b-Amplituden in P3 ($r = 0,53$; $p = 0,02$) und Pz ($r = 0,57$; $p = 0,018$).

4.2. Ältere Probanden

4.2.1. Verhaltensdaten

Die älteren Probanden reagierten bei 153,2 ($\pm 7,7$) der insgesamt 160 Go-Stimuli folgerichtig mit einem Tastendruck. Bei der 80-fach präsentierten Entscheidungsbedingung reagierten sie 46,9 ($\pm 9,7$) Mal mit Tastendruck. Die Anzahl fehlerhafter Antworten bei NoGo- bzw. Kontrollbedingungen lag bei 9,1 ($\pm 9,4$).

Bedingung	Anzahl	Reaktionen [n]	Reaktionen [%]
Go	160	153,2	95,8%
Entscheidung	80	46,9	58,6%
NoGo / Kontrollen	240	9,1	3,8%

Tabelle 4-3: Reaktionen bei älteren Probanden

Die mittlere Reaktionszeit zwischen Reizdarbietung und Tastendruck betrug 412,2 ms ($\pm 84,1$ ms) bei Go-Bedingungen und 680,7 ms ($\pm 152,0$ ms) bei der Entscheidungsbedingung. Die Reaktionszeit bei freier Entscheidung war signifikant verlängert ($F(1, 16) = 65,956$; $p < 0,001$), korrelierte aber nicht signifikant mit der Reaktionszeit der Go-Reaktion ($r = 0,454$; $p < 0,067$).

4.2.2. Elektrophysiologische Daten

4.2.2.1. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Bedingungen

Bei der **N1-Amplitude** zeigte der Mauchly-Test bei der Interaktion zwischen Elektroden und Bedingungen eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme ($\chi^2 = 46,17$; $p = 0,001$), so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser (bei $\varepsilon = 0,466$) korrigiert wurden. Dabei zeigten sich signifikante Effekte auf die Amplitude durch die Elektrodenposition ($F(2, 32) = 59,45$; $p < 0,001$), die dargebotene Bedingung ($F(3, 48) = 3,104$; $p = 0,035$) sowie die Interaktion der Haupteffekte ($F(2,79, 44,71) = 5,24$; $p = 0,004$). Post-hoc zeigten sich signifikant negativere N1-Amplituden in Fz ($p < 0,001$) und Cz ($p < 0,001$) gegenüber Pz. Bei der Post-hoc-Analyse der Bedingungen zeigte sich ein Trend von niedrigeren Go-N1-Amplituden gegenüber Kontroll-N1-Amplituden ($p = 0,051$).

Wie der Mauchly-Test zeigte, verletzten die Elektrodenposition ($\chi^2 = 13,94$; $p = 0,001$) und die Interaktion der Haupteffekte bei der **N2-Amplitude** die Annahme auf Sphärizität ($\chi^2 = 50,43$; $p < 0,001$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,62$ bzw. $0,52$) korrigiert. Signifikante Effekte konnten hierbei für die Elektrodenposition ($F(1,25, 19,93) = 18,69$; $p < 0,001$), die Bedingung ($F(3, 48) = 10,25$; $p < 0,001$) sowie deren Interaktion ($F(3,09, 49,51) = 2,94$; $p = 0,041$) festgestellt werden. Die Post-hoc-Analyse zeigte in Fz signifikant negativere N2-Amplituden gegenüber Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p < 0,001$). N2-Amplituden waren bei Go signifikant positiver gegenüber der Entscheidungs- ($p = 0,001$) und Kontrollbedingung ($p = 0,001$).

Bei der **P3a-Amplitude** zeigte der Mauchly-Test bei der Bedingung eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme ($\chi^2 = 13,83$; $p = 0,017$) wie auch bei der Interaktion der Haupteffekte ($\chi^2 = 34,66$; $p = 0,025$) so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,71$ resp. $0,6$) korrigiert wurden. Signifikante Effekte konnten sowohl bei Elektrodenposition ($F(2, 32) = 7,6$; $p = 0,002$) und Bedingung ($F(2,14, 34,21) = 39,24$; $p < 0,001$) als auch bei der Interaktion zwischen beiden Haupteffekten ($F(3,58, 57,33) = 8,42$; $p < 0,001$) festgestellt werden. Post-hoc-Tests zeigten signifikant kleinere P3a-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p = 0,006$). Der Unterschied zwischen höheren P3a-Amplituden in Cz gegenüber Pz erreichte Trendniveau ($p = 0,078$). Die P3a-Amplitude war bei Go ($p = 0,004$), NoGo ($p < 0,001$) und Entscheidungsbedingung ($p = 0,002$) signifikant größer als bei der Kontrollbedingung. Bei NoGo wiederum zeigten sich signifikant größere P3a-Amplituden als bei Go ($p < 0,001$) und der Entscheidungsbedingung ($p < 0,001$).

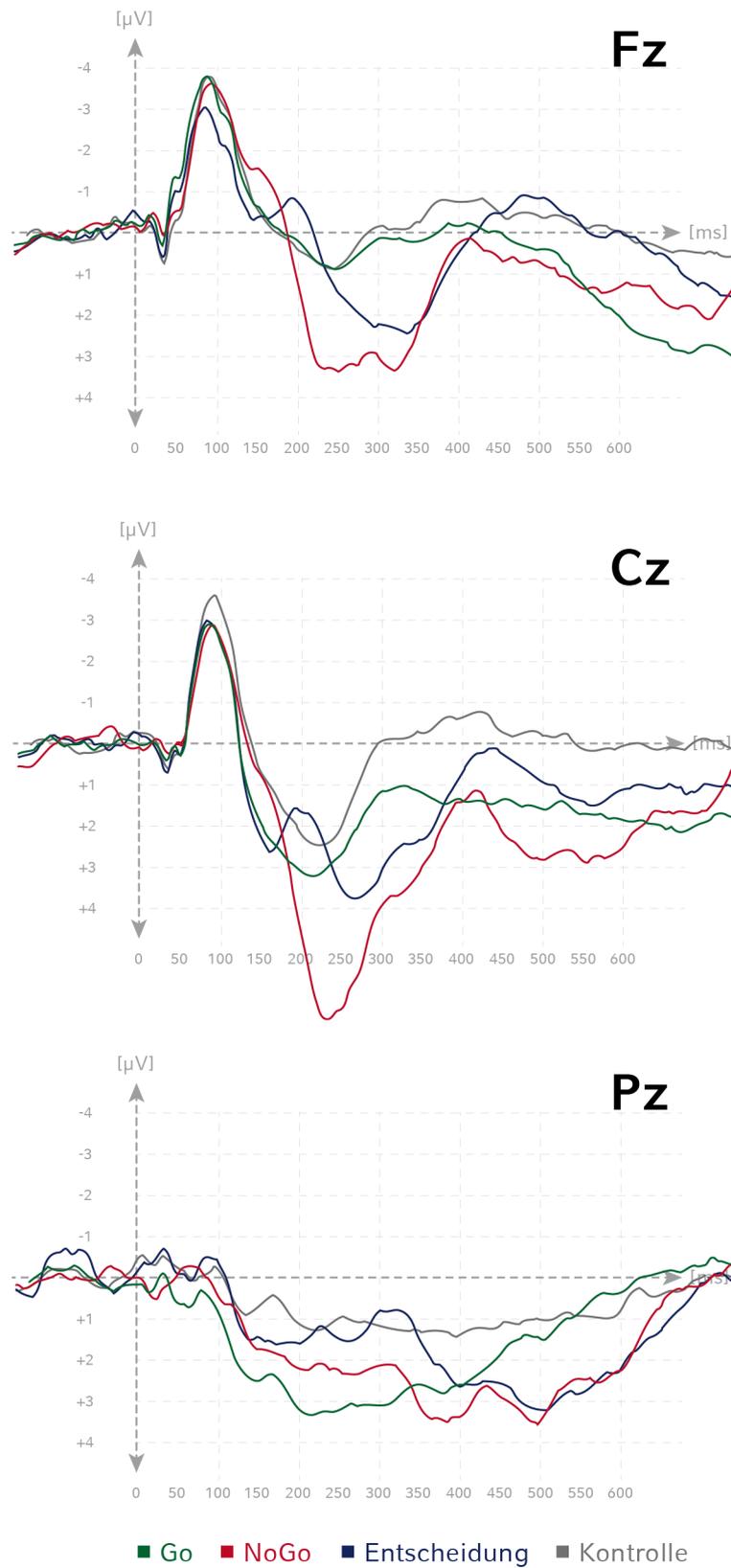


Abbildung 4-3: Mittlere Potenzialverläufe der älteren Probanden an Fz, Cz und Pz bei Go-, NoGo-, Entscheidungs- und Kontrollbedingung

Bei der **P3b-Amplitude** zeigte der Mauchly-Test bei der Elektrodenposition ($\chi^2 = 9,94$; $p = 0,007$) wie auch bei der Interaktion der Haupteffekte eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme ($\chi^2 = 66,51$; $p < 0,001$), so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,67$ bzw. $0,52$) korrigiert wurden. Sowohl Elektrodenposition ($F(1,35, 21,55) = 3,25$; $p = 0,075$) als auch Bedingung ($F(3, 48) = 38,8$; $p < 0,001$) zeigten signifikante Effekte, nicht jedoch die Interaktion beider ($F(3,14, 50,19) = 1,93$; $p = 0,134$). Post-hoc erwiesen sich P3b-Amplituden bei NoGo-Bedingungen als signifikant größer als bei Go ($p < 0,001$), Entscheidung ($p = 0,023$) und Kontrolle ($p < 0,001$). Auch P3b-Amplituden bei Go ($p = 0,002$) und Entscheidung ($p < 0,001$) waren höher als die der Kontrollbedingung. Gegenüber Go zeigte die Entscheidungsbedingung einen Trend höherer P3b-Amplituden an ($p = 0,097$).

4.2.2.2. Amplitudeneffekte bei Elektroden und Entscheidungsreaktion

Die Vergleichsuntersuchung der **N1-Amplituden** bei Entscheidung mit und ohne Reaktion ergab einen signifikanten Effekt der Elektrodenposition ($F(1,56, 25,02) = 28,42$; $p < 0,001$). Wegen Verletzung der Sphärizitäts-Annahme bei den Elektroden im Mauchly-Test ($\chi^2 = 4,9$; $p = 0,086$), wurden die Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,78$) korrigiert. Weder Entscheidung ($F(1, 16) = 0,369$; $p = 0,552$) noch die Interaktion der Haupteffekte ($F(2, 32) = 0,074$; $p = 0,929$) waren signifikant. Die Post-hoc-Testung zeigte signifikant höhere N1-Amplituden in Fz ($p < 0,001$) und Cz ($p < 0,001$) gegenüber Pz.

Die Sphärizitäts-Annahme wurde entsprechend den Ergebnissen des Mauchly-Test bei der **N2-Amplitude** durch die Elektrodenposition ($\chi^2 = 17,7$; $p < 0,001$) und die Interaktion der Haupteffekte ($\chi^2 = 10,27$; $p = 0,006$) verletzt. Dementsprechend wurden die Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,59$ bzw. $0,67$) korrigiert. Ein signifikanter Effekt bestand bei der Elektrodenposition ($F(1,18, 18,91) = 14,66$; $p = 0,001$), nicht jedoch bei der Entscheidung ($F(1, 16) = 0,55$; $p = 0,471$) oder der Interaktion von Elektrodenposition und Entscheidung ($F(1,34, 21,39) = 0,96$; $p = 0,366$). Die Post-hoc-Testung zeigte signifikant höhere N2-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p = 0,008$).

Eine Korrektur der Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\varepsilon = 0,683$) wurde bei Verletzung der Sphärizitäts-Annahme ($\chi^2 = 9,36$; $p = 0,009$) im Mauchly-Test für die Interaktion (Elektrode x Selektion) vorgenommen. Bei der **P3a-Amplitude** zeigte sich ein signifikanter Effekt bezüglich der Elektrodenposition ($F(2, 32) = 4,13$; $p = 0,025$) und ein Trend bei der Entscheidung ($F(1, 16) = 3,9$; $p = 0,066$). Der Interaktionseffekt von Elektrode und Selektion zeigte keinen Effekt ($F(1,37, 21,86) = 0,16$; $p = 0,774$). In der zentralen Elektrode Cz waren P3a-Amplituden signifikant höher als in Pz ($p = 0,049$). Als Trend zeigten sich höhere P3a-Amplituden bei der Entscheidungsbedingung ohne Tastendruck gegenüber Entscheidungen mit Tastendruck ($p = 0,066$).

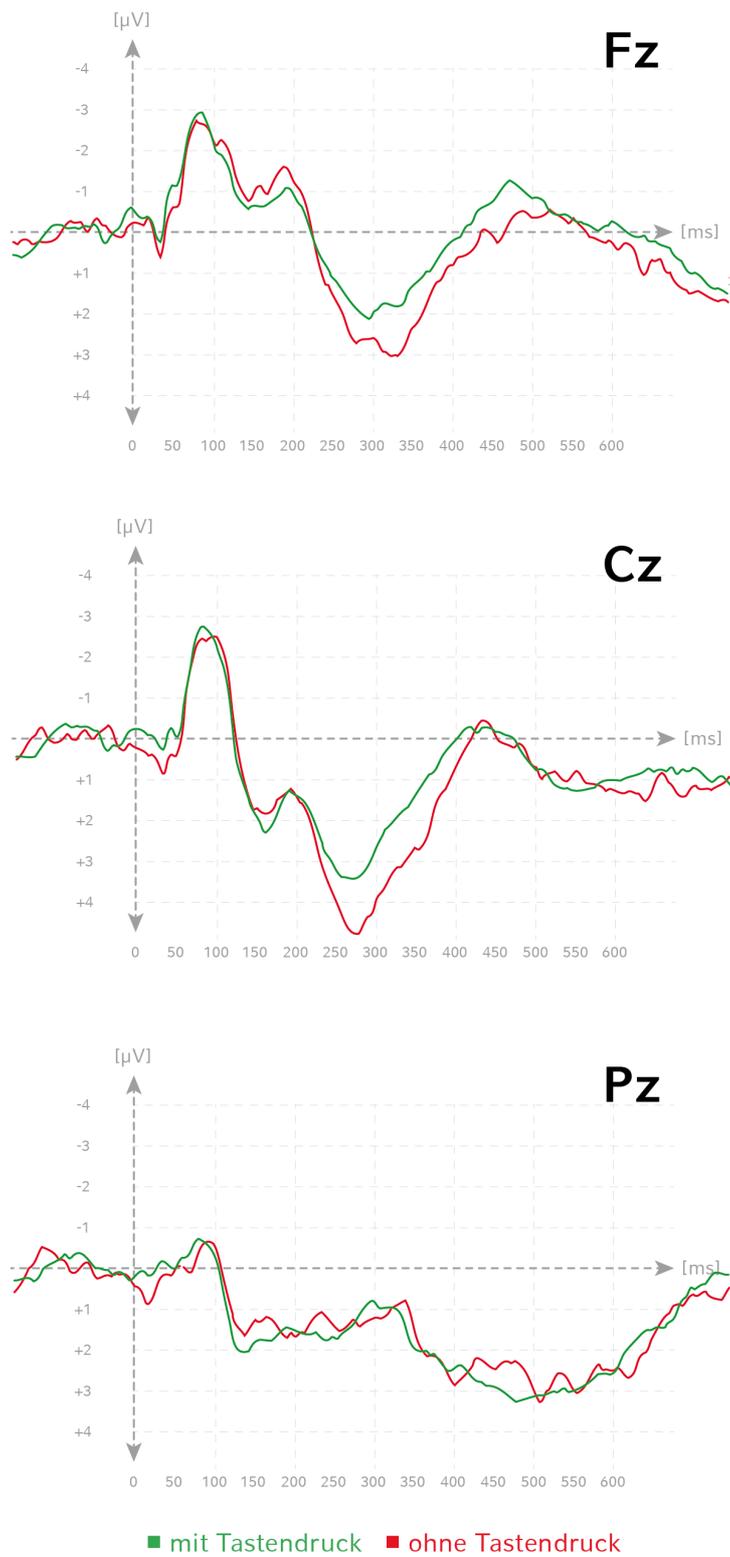


Abbildung 4-4: Mittlere Potenzialverläufe der älteren Probanden an Fz, Cz und Pz bei Entscheidungsbedingungen mit und ohne Tastendruck

Wie der Mauchly-Test zeigte, verletzte die Interaktion der Haupteffekte bei der **P3b-Amplitude** die Annahme auf Sphärizität ($\chi^2 = 8,89$; $p = 0,012$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0,691$) korrigiert. Ein signifikanter Effekt zeigte sich hinsichtlich der Entscheidung ($F(1, 16) = 8,17$; $p = 0,011$). Die Elektrodenposition hatte keinen signifikanten Effekt ($F(2, 32) = 1,24$; $p = 0,303$), ebensowenig die Interaktion beider Haupteffekte ($F(1,38, 22,11) = 0,27$; $p = 0,125$). Die Post-hoc-Analyse identifizierte höhere P3b-Amplituden bei Entscheidungen ohne Tastendruck gegenüber Entscheidungen mit Tastendruck ($p = 0,011$).

4.2.3. Korrelationen Verhaltens- zu elektrophysiologischen Daten

Die Reaktionszeit der Go-Bedingung korrelierte signifikant mit N1-Amplituden in F3 ($r = 0,56$; $p = 0,02$). P3a-Go-Amplituden korrelierten in P3 ebenfalls signifikant ($r = -0,49$; $p = 0,044$) sowie P3b-Amplituden bei Go in C3 ($r = -0,53$; $p = 0,029$), Cz ($r = -0,55$; $p = 0,021$) und C4 ($r = -0,5$; $p = 0,041$). Ferner zeigten sich Korrelationstrends der Go-Bedingung bei N1-Amplituden in F4 ($r = 0,44$; $p = 0,076$) und P3 ($r = -0,46$; $p = 0,066$) sowie bei P3a-Amplituden in C3 ($r = -0,43$; $p = 0,083$) und Cz ($r = -0,45$; $p = 0,072$).

Die Reaktionszeit der Entscheidungsbedingung korrelierte signifikant mit P3b-Amplituden in C4 ($r = -0,57$; $p = 0,016$).

4.3. Vergleich: jüngere und ältere Probanden

4.3.1. Verhaltensdaten

Richtigkeit und Reaktionszeiten der experimentellen Antworten unterschieden sich kaum zwischen jüngeren und älteren Probanden.

Bedingung	jüngere	ältere
Anzahl Reaktionen Go	153,9	153,2
Reaktionszeit Go	414,5 ms	412,2 ms
Anzahl Reaktionen Entscheidung	46,1	46,9
Reaktionszeit Entscheidung	679,1 ms	680,7 ms
Anzahl Reaktionen NoGo / Kontrollen	9,8	9,1

Tabelle 4-4: Antwortanzahl und Reaktionszeiten entsprechend dem Versuchsaufbau bei jüngeren und älteren Probanden

Es zeigten sich keine statistischen Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Probanden hinsichtlich Antwortanzahl bei der Go-Bedingung ($T = 0,585$; $p = 0,563$), bei der Entscheidungsbedingung ($T = -0,5$; $p = 0,62$) und NoGo- bzw. Kontrollbedingungen ($T = 0,459$; $p = 0,65$) sowie den Reaktionszeiten bei der Go- ($T = 0,071$; $p = 0,944$) und Entscheidungsbedingung ($T = 0,593$; $p = 0,978$). Die Reaktionszeit bei freier Entscheidung korrelierte signifikant mit der Reaktionszeit der Go-Reaktion ($r = 0,704$; $p < 0,001$).

4.3.2. Geschlechtseffekte

In der demografischen Verteilung der beiden Versuchsgruppen jüngerer ($n = 18$) und älterer Probanden ($n = 17$) bestand eine Ungleichheit bezüglich des Geschlechts, so dass bei den jüngeren Probanden verhältnismäßig mehr männliche Probanden ($n = 8$, entsprechend 44,4% der jüngeren Probanden) als in der älteren Versuchsgruppe ($n = 5$, entsprechend 29,4% der Gruppe) vorhanden waren. Bei der Berechnung der Mann-Whitney-U-Tests der weiblichen und der männlichen Versuchsteilnehmer bezogen auf die untersuchten Potenziale zeigte sich ein signifikantes Ergebnis beim P3a-Potenzial an der Elektrode Pz während der Kontrollbedingung ($p = 0,014$). Bei allen übrigen Potenzialen zeigten sich im Geschlechtervergleich nicht-signifikante Testwerte.

4.3.3. Multivariate Varianzanalysen der elektrophysiologischen Daten

Im Vergleich der N1-Amplitude von jüngeren und älteren Probanden mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigte der Mauchly-Test sowohl bei der Elektrodenposition ($\chi^2 = 9,13$; $p = 0,01$) als auch der Interaktion zwischen den Haupteffekten ($\chi^2 = 60,64$; $p < 0,001$) eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme, so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser (bei $\epsilon = 0,8$ bzw. $0,65$) korrigiert wurden. Dabei zeigten sich signifikante Effekte für die Elektrodenposition ($F(1,6, 52,87) = 137,09$; $p < 0,001$), die Interaktion von Alter und Elektrodenposition ($F(1,6, 52,87) = 4,12$; $p = 0,03$), die Bedingung ($F(3, 99) = 5,2$; $p = 0,002$), die Interaktion von Alter und Bedingung ($F(3, 99) = 4,37$; $p = 0,006$) sowie die Interaktion von Elektrodenposition und Bedingung ($F(3,93, 129,54) = 13,1$; $p < 0,001$). Kein signifikanter Effekt bestand für die Interaktion von Elektrodenposition, Bedingung und Alter ($F(3,93, 129,54) = 1,62$; $p = 0,175$). Es zeigte sich kein signifikanter Zwischensubjekteffekt für die Altersgruppe ($F = 0,79$; $p = 0,381$).

Die Post-hoc-Testung zeigte signifikant negativere N1-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p = 0,001$) und Pz ($p < 0,001$) sowie in Cz gegenüber Pz ($p < 0,001$). Bei jüngeren Probanden zeigten sich gegenüber der älteren Probandengruppe negativere N1-Amplituden in Fz (j: $-4,25$ mV; ä: $-3,78$ mV); umgekehrt verhält es sich an

den Elektroden Cz (j: -2,97 mV; ä: -3,39 mV) und Pz (j: 0,15 mV; ä: -0,71 mV). Die N1-Amplituden bei NoGo waren signifikant höher als bei der Entscheidungsbedingung (p = 0,002).

N1	df1	df2	F	p	post-hoc
Elektrodenposition	1,60	52,87	137,09	< 0,001	Fz > Cz > Pz
Elektrodenposition * Altersgruppe	1,60	52,87	4,12	0,030	Fz: j > ä Cz: j < ä Pz: j < ä
Bedingung	3,00	99,00	5,20	0,002	NoGo > Vol
Bedingung * Altersgruppe	3,00	99,00	4,37	0,006	Go: j ~ ä NoGo: j ~ ä Vol: j < ä K: j < ä
Elektrodenposition * Bedingung	3,93	129,54	13,10	< 0,001	Fz > Cz > Pz
Elektrodenposition * Bedingung * Altersgruppe	3,93	129,54	1,62	0,175	

Tabelle 4-5: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung

(Bedingungen x Elektroden x Altersgruppe) für die N1 (df1 = Zähler-Freiheitsgrad, df2 = Nenner-Freiheitsgrad, F = kritischer F-Wert, p = Signifikanzniveau; Größenvergleiche in der post-hoc-Spalte beziehen sich auf die absolute Amplitudenhöhe)

Bei der **N2-Amplitude** verletzten, wie der Mauchly-Test zeigte, die Elektrodenposition ($\chi^2 = 30,08$; $p < 0,001$) und die Interaktion der Haupteffekte die Annahme auf Sphärizität ($\chi^2 = 70,27$; $p < 0,001$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0,621$ bzw. $0,627$) korrigiert. Signifikante Effekte konnten hierbei sowohl für den Haupteffekt Elektrodenposition ($F(1,24, 41,01) = 38,8$; $p < 0,001$), den Haupteffekt Bedingung ($F(3, 99) = 18,69$; $p < 0,001$) als auch die Interaktion der Haupteffekte ($F(3,76, 124,05) = 10,39$; $p < 0,001$) festgestellt werden. Kein hoher F-Wert zeigte sich bei den Interaktionen Elektrodenposition x Altersgruppe ($F(1,24, 41,01) = 1,67$; $p = 0,206$), Bedingung x Altersgruppe ($F(3, 99) = 0,205$; $p = 0,893$) sowie Elektrodenposition x Bedingung x Altersgruppe ($F(3,76, 124,05) = 1,54$; $p = 0,197$). Die Post-hoc-Analyse zeigte signifikant negativere N2-Amplituden in Fz im Vergleich zu Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p < 0,001$). N2-Amplituden bei Go waren kleiner als bei Kontroll- ($p < 0,001$), NoGo ($p < 0,001$) und Entscheidungsbedingung ($p < 0,001$) sowie bei NoGo kleiner als bei Entscheidung ($p = 0,001$). Es zeigte sich kein signifikanter Zwischensubjekteffekt für die Altersgruppe ($F = 0,01$; $p = 0,927$).

N2	df1	df2	F	p	post-hoc
Elektrodenposition	1,24	41,01	38,80	< 0,001	Fz > Cz Fz > Pz
Elektrodenposition * Altersgruppe	1,24	41,01	1,67	0,206	
Bedingung	3,00	99,00	18,69	< 0,001	Vol > NoGo > Go K > Go
Bedingung * Altersgruppe	3,00	99,00	0,21	0,893	
Elektrodenposition * Bedingung	3,76	124,05	10,39	< 0,001	Fz > Cz Fz > Pz
Elektrodenposition * Bedingung * Altersgruppe	3,76	124,05	1,54	0,197	

Tabelle 4-6: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung

(Bedingungen x Elektroden x Altersgruppe) für die N2 (df1 = Zähler-Freiheitsgrad, df2 = Nenner-

Freiheitsgrad, F = kritischer F-Wert, p = Signifikanzniveau; Größenvergleiche in der post-hoc-Spalte beziehen sich auf die absolute Amplitudenhöhe)

Die Annahme auf Sphärizität war bei der **P3a-Amplitude** für die Interaktion der Haupteffekte verletzt (Mauchly-Test, $\chi^2 = 48,63$; $p < 0,001$) und die Freiheitsgrade wurden unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0,643$) korrigiert. Es zeigten sich signifikante Effekte sowohl bei den Haupteffekten Elektrodenposition ($F(2, 66) = 26,41$; $p < 0,001$) und Bedingung ($F(3, 99) = 59,66$; $p < 0,001$) als auch der Interaktion beider Haupteffekte ($F(3,86, 127,38) = 18,28$; $p < 0,001$). Die Interaktion der Haupteffekte mit der Altersgruppe war nicht signifikant (Elektrodenposition: $F(2, 66) = 2,31$; $p = 0,107$; Bedingung: $F(3, 99) = 0,56$; $p = 0,635$; Elektrodenposition und Bedingung: $F(3,86, 127,38) = 0,803$; $p = 0,522$). Dabei unterschied sich die P3a-Amplitude in Cz signifikant von niedrigeren P3a-Amplituden in Pz ($p = 0,042$) und Fz ($p < 0,001$). Auch in Pz waren die P3a-Amplituden signifikant höher als in Fz ($p < 0,001$). Die P3a-Amplitude war signifikant größer bei Go gegenüber der Entscheidungsbedingung ($p = 0,027$) und Kontrollbedingung ($p < 0,001$), bei NoGo wiederum signifikant größer als bei Go ($p = 0,044$), Entscheidungsbedingung ($p < 0,001$) und Kontrollbedingung ($p < 0,001$). Es zeigte sich kein signifikanter Zwischenssubjekteffekt für die Altersgruppe ($F = 0,14$; $p = 0,708$).

P3a	df1	df2	F	p	post-hoc
Elektrodenposition	2,00	66,00	26,41	< 0,001	Cz > Pz > Fz
Elektrodenposition * Altersgruppe	2,00	66,00	2,31	0,107	
Bedingung	3,00	99,00	59,66	< 0,001	NoGo > Go > K NoGo > Vol > K
Bedingung * Altersgruppe	3,00	99,00	0,56	0,635	
Elektrodenposition * Bedingung	3,86	127,38	18,28	< 0,001	Cz > Pz > Fz
Elektrodenposition * Bedingung * Altersgruppe	3,86	127,38	0,80	0,522	

Tabelle 4-7: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung (Bedingungen x Elektroden x Altersgruppe) für die P3a (df1 = Zähler-Freiheitsgrad, df2 = Nenner-Freiheitsgrad, F = kritischer F-Wert, p = Signifikanzniveau)

Bei der **P3b-Amplitude** zeigte der Mauchly-Test eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme bei der Elektrodenposition ($\chi^2 = 12,13$; $p = 0,002$) und der Interaktion zwischen Elektrodenposition und Bedingung ($\chi^2 = 89,6$; $p < 0,001$), so dass die Freiheitsgrade unter Abschätzung der Sphärizität nach Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0,76$ bzw. $0,539$) korrigiert wurden. Signifikante Effekte konnten bei Elektrodenposition ($F(1,52, 50,17) = 11,28$; $p < 0,001$), Bedingung ($F(3, 99) = 74,21$; $p < 0,001$) sowie bei der Interaktion zwischen beiden Haupteffekten ($F(3,23, 106,69) = 5,02$; $p = 0,002$) festgestellt werden. Es zeigte sich kein signifikanter Zwischensubjekteffekt für die Altersgruppe ($F = 0,001$; $p = 0,982$).

P3b	df1	df2	F	p	post-hoc
Elektrodenposition	1,52	50,17	11,28	< 0,001	Pz > Fz Cz > Fz
Elektrodenposition * Altersgruppe	1,52	50,17	0,58	0,521	
Bedingung	3,00	99,00	74,21	< 0,001	NoGo > Vol > Go > K
Bedingung * Altersgruppe	3,00	99,00	0,22	0,879	
Elektrodenposition * Bedingung	3,23	0,00	5,02	0,002	Pz > Fz Cz > Fz
Elektrodenposition * Bedingung * Altersgruppe	3,23	0,00	0,72	0,550	

Tabelle 4-8: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung (Bedingungen x Elektroden x Altersgruppe) für die P3b (df1 = Zähler-Freiheitsgrad, df2 = Nenner-Freiheitsgrad, F = kritischer F-Wert, p = Signifikanzniveau)

Die Interaktionen der Altersgruppe mit den Haupteffekten waren nicht signifikant (Elektrodenposition: $F(1,52, 50,17) = 0,58$; $p = 0,521$; Bedingung: $F(3, 99) = 0,22$; $p = 0,879$; Elektrodenposition und

Bedingung: $F(3,23, 106,69) = 0,72; p = 0,55$). Post-hoc-Tests zeigten signifikant kleinere P3b-Amplituden in Fz gegenüber Cz ($p = 0,004$) und Pz ($p = 0,002$). Die P3b-Amplitude war bei NoGo signifikant größer als bei Go ($p < 0,001$), Entscheidung ($p = 0,023$) und Kontrolle ($p < 0,001$). Bei der Entscheidungsbedingung war die P3b-Amplitude signifikant größer als bei Go ($p = 0,002$) und Kontrolle ($p < 0,001$). Bei Go war die P3b-Amplitude signifikant größer als bei Kontrollbedingungen ($p < 0,001$).

4.3.4. Korrelationen des Alters zu elektrophysiologischen Daten

Berechnungen zu linearen Zusammenhängen zwischen Alter und Amplituden evozierter Potenziale zeigte ein vielfältiges Bild signifikanter Korrelationen. So fanden sich in höherem Lebensalter höhere N1-Amplituden an Pz bei Entscheidungsbedingung mit Tastendruck ($r = -0,34; p = 0,045$) und Kontrollbedingung ($r = -0,4; p = 0,019$). N2-Amplituden korrelierten an Fz bei Go mit dem Lebensalter ($r = 0,36; p = 0,032$). Je älter ein Proband war, desto negativer waren die Amplituden der P3a an Pz bzw. der P3b an Cz sowohl bei Entscheidungsbedingung (P3a: $r = -0,44; p = 0,008$; P3b: $r = -0,35; p = 0,04$) als auch bei Entscheidungsbedingung mit Tastendruck (P3a: $r = -0,39; p = 0,024$; P3b: $r = -0,44; p = 0,01$).

Alter		N1		N2		P3a		P3b	P3b
Bedingung	Elektrode	r	p	r	p	r	p	r	p
Go	Fz	0,150	0,380	0,360	0,032	0,150	0,400	-0,095	0,590
	Cz	0,032	0,860	-0,082	0,640	-0,092	0,600	-0,170	0,340
	Pz	-0,220	0,200	-0,160	0,360	-0,200	0,250	-0,084	0,630
NoGo	Fz	0,310	0,073	0,080	0,650	0,280	0,110	-0,008	0,970
	Cz	-0,034	0,850	-0,140	0,430	0,088	0,620	-0,140	0,420
	Pz	-0,230	0,180	-0,024	0,890	-0,110	0,520	0,046	0,790
V	Fz	0,140	0,410	0,300	0,078	0,250	0,150	0,081	0,650
	Cz	-0,110	0,530	-0,019	0,910	-0,091	0,610	-0,350	0,040
	Pz	-0,310	0,069	-0,140	0,420	-0,440	0,008	-0,068	0,700
VmR	Fz	0,180	0,310	0,270	0,110	0,180	0,300	0,088	0,620
	Cz	-0,150	0,390	0,017	0,920	-0,110	0,550	-0,440	0,010
	Pz	-0,340	0,045	-0,210	0,220	-0,390	0,024	-0,230	0,190
VoR	Fz	0,023	0,890	0,260	0,140	0,330	0,054	0,200	0,250
	Cz	-0,051	0,770	0,015	0,930	0,013	0,940	-0,140	0,410
	Pz	-0,230	0,180	-0,100	0,550	-0,290	0,100	-0,062	0,730
K	Fz	-0,071	0,690	0,230	0,190	0,220	0,210	0,280	0,110
	Cz	-0,280	0,098	-0,013	0,940	-0,057	0,740	-0,260	0,130
	Pz	-0,400	0,019	-0,180	0,290	-0,210	0,230	-0,079	0,660

Tabelle 4-9: Korrelationen zwischen Alter der Probanden und Amplituden der evozierten Potenziale (gelb hinterlegt = signifikant; orange hinterlegt = Trend)

4.3.5. Mittelwertvergleiche der elektrophysiologischen Daten

Signifikante Unterschiede zwischen den Potenzial-Amplituden in der Gruppe jüngerer Probanden gegenüber der Gruppe älterer Probanden zeigten sich vorrangig bei der N1-Amplitude und insbesondere an der Elektrode Pz (Mittelwertunterschied = Amplitude jüngerer Probanden – Amplitude älterer Probanden):

- ▶ N1-Amplitude
 - ▶ Fz, NoGo-Bedingung ($T = -2,12$; $p = 0,044$; $\bar{x} = -0,97$; 95% CI [-1,91; -0,03])
 - ▶ Cz, Kontrollbedingung, Trend ($T = 1,93$; $p = 0,063$; $\bar{x} = 0,84$; 95% CI [-0,05; 1,73])
 - ▶ Pz, Go-Bedingung ($T = 2,04$; $p = 0,049$; $\bar{x} = 0,69$; 95% CI [0,00; 1,38])
 - ▶ Pz, NoGo-Bedingung, Trend ($T = 1,84$; $p = 0,075$; $\bar{x} = 0,68$; 95% CI [-0,07; 1,44])
 - ▶ Pz, Entscheidungsbedingung ($T = 2,87$; $p = 0,008$; $\bar{x} = 1,20$; 95% CI [0,34; 2,06])
 - ▶ Pz, Kontrollbedingung ($T = 2,73$; $p = 0,010$; $\bar{x} = 0,86$; 95% CI [0,22; 1,50])
- ▶ N2-Amplitude
 - ▶ Fz, Go-Bedingung ($T = -2,09$; $p = 0,044$; $\bar{x} = -1,29$; 95% CI [-2,54; -0,04])
- ▶ N2-Amplitude
 - ▶ Pz, Entscheidungsbedingung ($T = 2,23$; $p = 0,033$; $\bar{x} = 1,02$; 95% CI [0,09; 1,95])

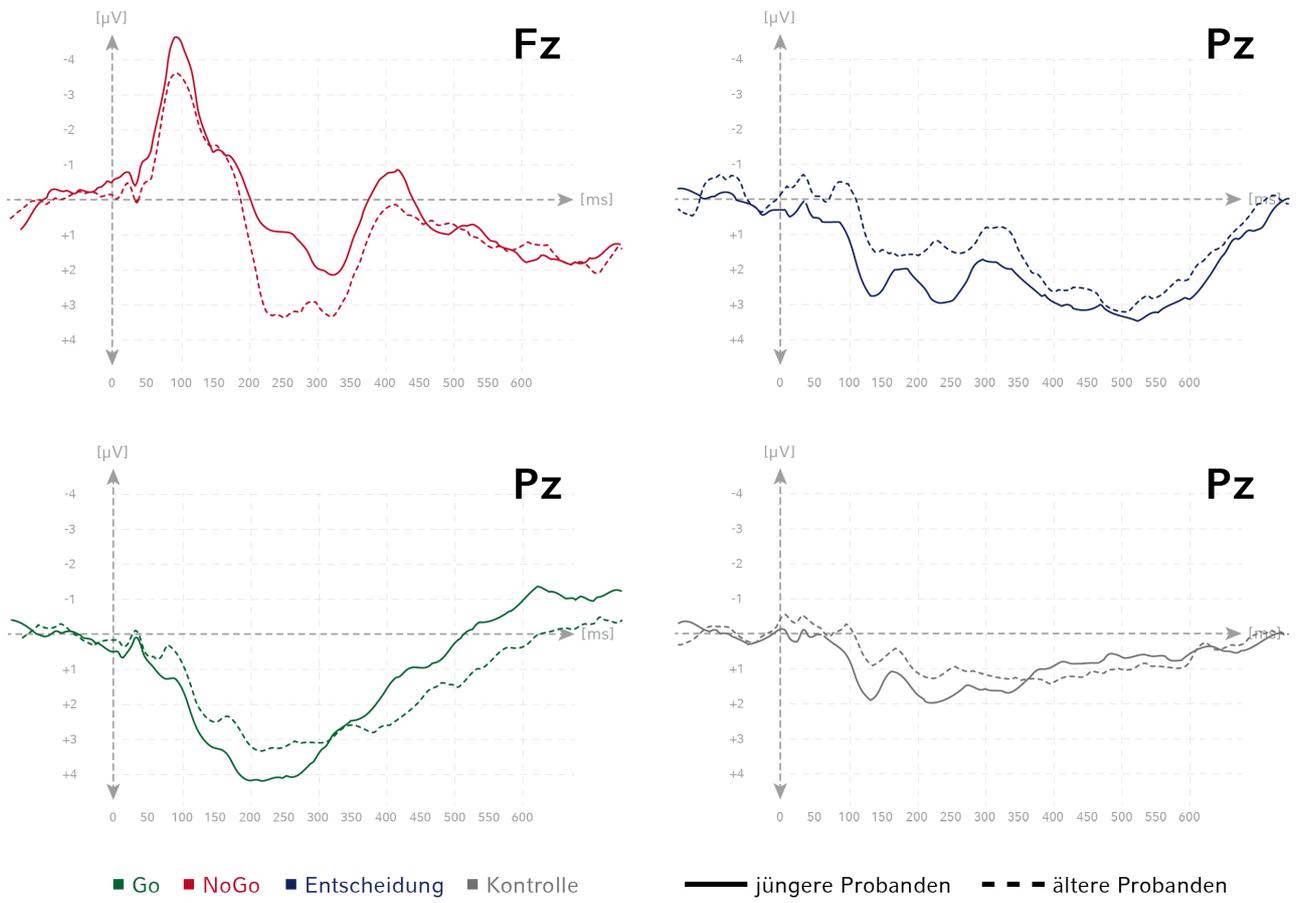


Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der EEG-Kurven jüngerer und älterer Probanden

4.3.6. Korrelationen Verhaltens- zu elektrophysiologischen Daten

Bei der Berechnung der Korrelationen zwischen Reaktionszeiten bei Go- und Entscheidungsbedingung mit den bei der jeweiligen Bedingung erfassten Amplituden der evozierten Potenziale N1, N2 und P3a/P3b über alle Probanden zeigten sich signifikante Korrelationen der P3a- und P3b-Amplituden in Cz bei der Go-Bedingung (P3a: $r = -0,4$; $p = 0,019$; P3b: $r = -0,5$; $p = 0,002$) sowie ein Trend bei P3b-Amplituden an Pz ($r = -0,31$; $p = 0,031$) mit ausgeprägteren P3-Amplituden je schneller die Probanden reagierten.

Reaktionszeit bei Go	N1		N2		P3a		P3b	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Fz	-0,033	0,850	-0,170	0,340	-0,037	0,830	-0,180	0,310
Cz	-0,007	0,970	-0,210	0,230	-0,400	0,019	-0,500	0,002
Pz	-0,160	0,350	-0,096	0,580	-0,160	0,350	-0,310	0,066

Tabelle 4-10: Korrelationen zwischen Reaktionszeit bei Go-Bedingung der Probanden und Amplituden der evozierten Potenziale (gelb hinterlegt = signifikant; orange hinterlegt = Trend)

Bei der Korrelation der Entscheidungsreaktionszeit zu evozierten Potenzialen fielen lediglich Trends auf. N1- und N2-Amplituden korrelierten zur Reaktionszeit in Fz (N1: $r = -0,29$; $p = 0,097$; N2: $r = -0,31$; $p = 0,068$), entsprechend negativeren N1- bzw. N2-Amplituden je länger ein Proband zum Tastendruck bei Entscheidungsbedingungen benötigte. Ein Trend zeigte sich zusätzlich bei der P3b-Amplitude in Pz ($r = 0,34$; $p = 0,05$).

Reaktionszeit bei Entscheidung mit Tastendruck	N1		N2		P3a		P3b	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Fz	-0,290	0,097	-0,310	0,068	-0,120	0,480	-0,170	0,330
Cz	-0,130	0,440	-0,110	0,510	0,230	0,220	-0,015	0,930
Pz	0,008	0,960	0,084	0,630	-0,074	0,680	0,340	0,050

Tabelle 4-11: Korrelationen zwischen Reaktionszeit bei Entscheidungsbedingung mit Tastendruck der Probanden und Amplituden der evozierten Potenziale (orange hinterlegt = Trend)

4.3.7. Motivation und Anstrengungsbereitschaft

Die subjektive Bewertung der Motivation und Anstrengungsbereitschaft der jüngeren und älteren Probanden unterschied sich hinsichtlich der Mühe, die sich die Probanden bei der Bearbeitung der experimentellen Aufgabe gegeben haben. Sowohl jüngere ($1,89 \pm 0,76$) als auch ältere Probanden ($1,53 \pm 0,72$) bewerteten die Aufgabe gleichermaßen als recht leicht ($T = 1,439$; $p = 0,16$). Ebenfalls gleich bewerteten jüngere ($2,22 \pm 0,81$) und auch ältere Probanden ($1,82 \pm 1,02$) die durch die Aufgabe bereitete Anstrengung als moderat ($T = 1,289$; $p = 0,206$). Ältere Probanden gaben an, sich bei der Bearbeitung der Aufgabe weniger Mühe ($3,65 \pm 1,12$) gegeben zu haben als jüngere Probanden ($4,61 \pm 0,7$) mit statistisch signifikantem Unterschied ($T = 3,046$; $p = 0,005$). Bemessen am individuellen Leistungsvermögen bewerteten jüngere ($3,67 \pm 0,84$) wie ältere Probanden ($3,71 \pm 0,78$) ihre erbrachte Leistung bei der Versuchsaufgabe als überdurchschnittlich ($T = -0,144$; $p = 0,887$).

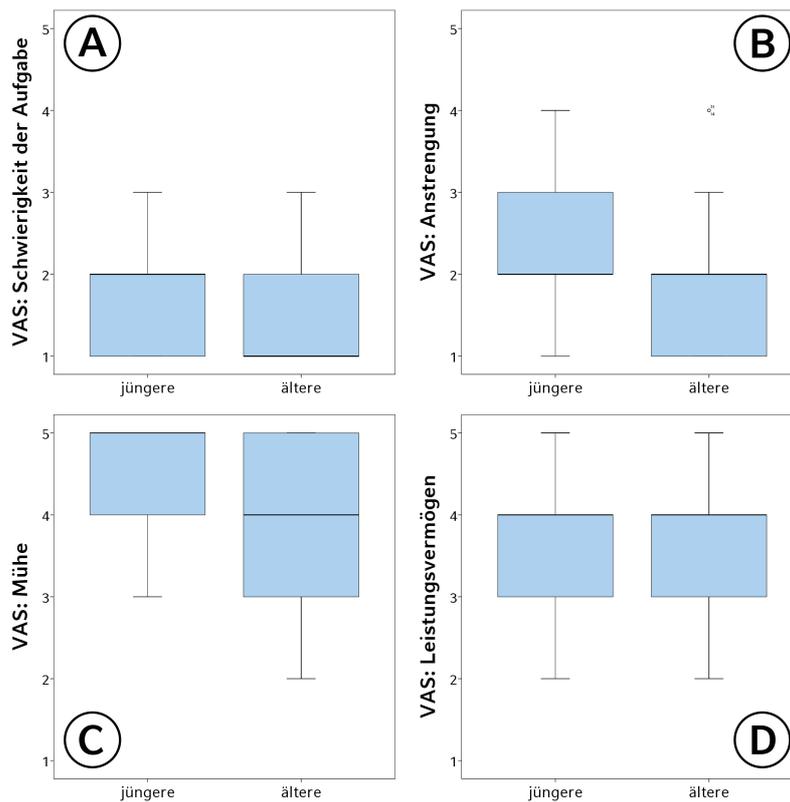


Abbildung 4-6: Selbsteinschätzung der Probandengruppen zur Motivation bzw. Anstrengungsbereitschaft: Schwierigkeit der Aufgabe (A), Anstrengung durch die Aufgabe (B), bei der Aufgabenbearbeitung investierte Mühe und Leistung (C), bei der Aufgabenbearbeitung relativ zum eigenen Leistungsvermögen erbrachte Leistung (D)

Statistisch zeigten sich keine Korrelation zwischen der von den Probanden angegebenen Mühe und den im Experiment erbrachten Reaktionszeiten (Go-Bedingung: $r = -0,131$; $p = 0,452$; Entscheidungsbedingung: $r = -0,029$; $p = 0,869$). Gleiches gilt für das Verhältnis zur Anzahl richtiger Reaktionen bei der Go-Bedingung ($r = 0,246$; $p = 0,154$) und der Anzahl der fehlerhaften Reaktionen bei den NoGo- bzw. Kontrollbedingungen ($r = -0,130$; $p = 0,455$). Vergleichbare Ergebnisse zeigten sich auch in den jeweiligen Gruppen.

Gruppe	Reaktionszeit Go		Reaktionszeit Entscheidung		Antworten Go (richtig)		Fehler	
	r	p	r	p	r	p	r	p
jüngere	-0,035	0,889	0,033	0,897	0,342	0,165	0,121	0,633
ältere	-0,186	0,474	-0,077	0,768	0,262	0,309	-0,399	0,112
Gesamt	-0,131	0,452	-0,029	0,869	0,246	0,154	-0,130	0,455

Tabelle 4-12: Korrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen der von den Probanden angegebenen erbrachten Mühe bei der Aufgabenbearbeitung und den ermittelten Reaktionszeiten bzw. Genauigkeit der Antworten im Experiment

Bei Unterteilung der Probanden in zwei Gruppen anhand der investierten Mühe in eine Gruppe mit Personen, die angegeben hatten, sich viel Mühe gegeben zu haben (entsprechend 5 Punkten auf dem Fragebogen; $n = 18$), und eine Gruppe, die sich wenig Mühe gegeben hatte (1 bis 4 Punkte auf dem Fragebogen; $n = 17$), fallen im Mittelwertvergleich zentral lokalisiert signifikante Unterschiede bei Go-, NoGo- und Entscheidungsbedingung auf (Mittelwertunterschied = Amplitude bei wenig Mühe – Amplitude bei viel Mühe):

- ▶ N2-Amplitude (mehr Mühe → positivere Amplitude)
 - ▶ Cz, NoGo-Bedingung ($T = -2,80$; $p = 0,008$; $\bar{x} = -1,80$; 95% CI [-3,10; -0,49])
 - ▶ Cz, Volitions-Bedingung ($T = -2,43$; $p = 0,021$; $\bar{x} = -1,09$; 95% CI [-2,00; -0,18])
 - ▶ Cz, Volition-Bedingung ohne Reaktion ($T = -2,08$; $p = 0,046$; $\bar{x} = -1,00$; 95% CI [-1,97; -0,02])
- ▶ P3a-Amplitude (mehr Mühe → positivere Amplitude)
 - ▶ Cz, Go-Bedingung ($T = -2,27$; $p = 0,030$; $\bar{x} = -1,71$; 95% CI [-3,25; -0,18])
 - ▶ Cz, NoGo-Bedingung ($T = -2,96$; $p = 0,007$; $\bar{x} = -2,67$; 95% CI [-4,52; -0,81])
 - ▶ Cz, Volitions-Bedingung ($T = -2,23$; $p = 0,037$; $\bar{x} = -1,72$; 95% CI [-3,32; -0,12])
 - ▶ Cz, Volitions-Bedingung ohne Reaktion ($T = -2,54$; $p = 0,018$; $\bar{x} = -1,84$; 95% CI [-3,33; -0,34])

- ▶ P3b-Amplitude (mehr Mühe → positivere Amplitude)
 - ▶ Cz, Go-Bedingung ($T = -2,65$; $p = 0,012$; $\bar{x} = -1,75$; 95% CI [-3,09; -0,41])
 - ▶ Cz, NoGo-Bedingung ($T = -2,15$; $p = 0,039$; $\bar{x} = -1,56$; 95% CI [-3,03; -0,08])
 - ▶ Cz, Volitions-Bedingung ($T = -2,30$; $p = 0,028$; $\bar{x} = -1,69$; 95% CI [-3,19; -0,20])
 - ▶ Cz, Volitions-Bedingung ohne Reaktion ($T = -2,57$; $p = 0,015$; $\bar{x} = -1,78$; 95% CI [-3,19; -0,37])

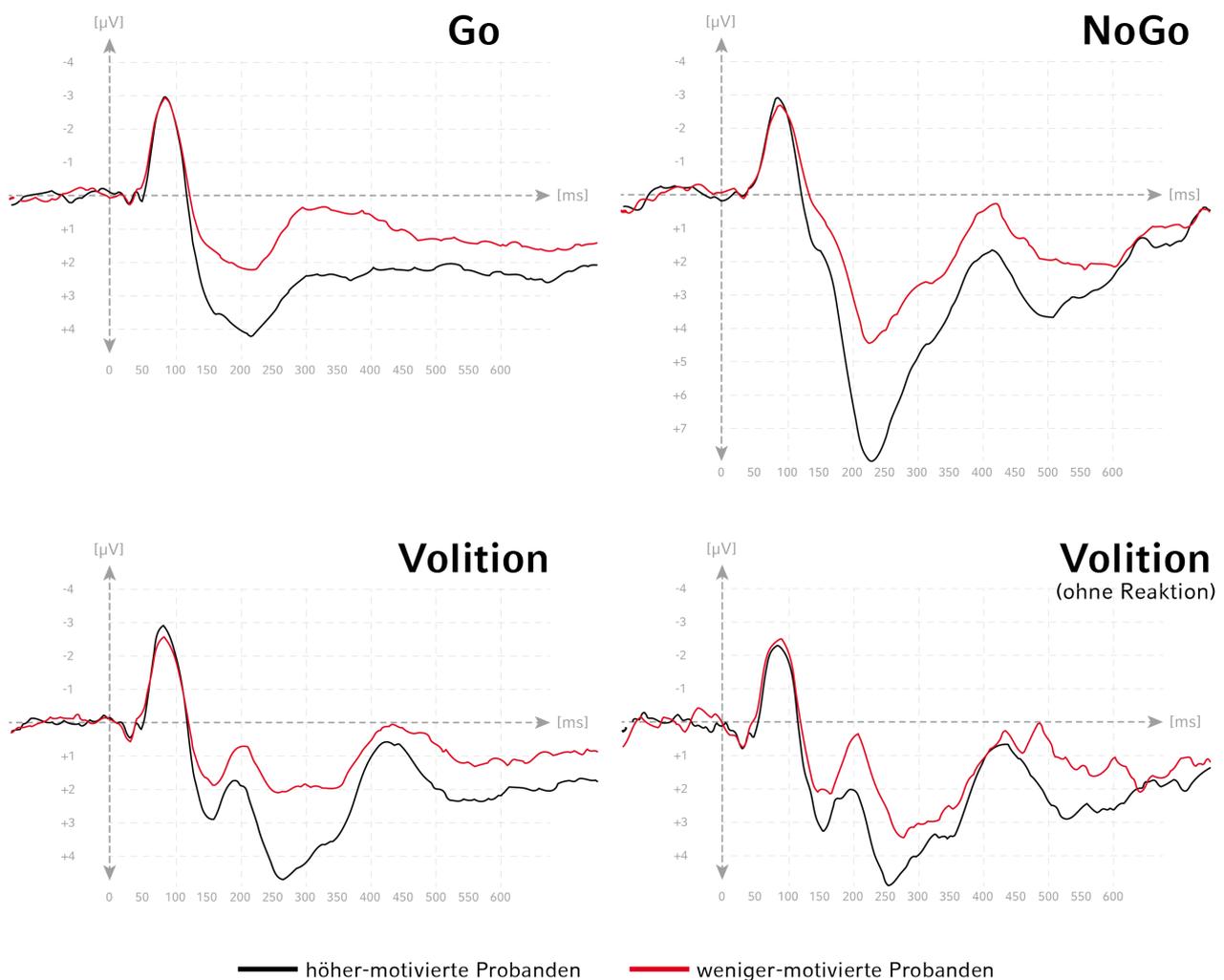


Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der EEG-Kurven von weniger-motivierten und höher-motivierten Probanden mit signifikantem Unterschied der N2-, P3a- und P3b-Amplituden in Cz bei Go, NoGo und Entscheidungsbedingung

4.3.8. Mittelwertvergleiche Schnell- vs. Langsam-Antworter

Bei Unterteilung der Probanden in zwei Gruppen anhand der Reaktionszeit bei Go- und Entscheidungsbedingung (mittlere Zeit von der Stimuluspräsentation bis zum erfolgten Tastendruck) in eine Gruppe mit schneller (Go: ≤ 398 ms; $n = 17$; Entscheidung: ≤ 630 ms; $n = 17$) und eine Gruppe mit langsamer Reaktion (Go: ≥ 399 ms; $n = 18$; Entscheidung: ≥ 631 ms; $n = 18$) fallen im Mittelwertvergleich signifikante Unterschiede der P3a- und P3b-Amplituden bei der **Go-Bedingung** auf, wobei das 95%-Konfidenzintervall des signifikanten Unterschieds in der P3a-Amplitude bei Pz die Null mit enthält (Mittelwertunterschied = Amplitude bei langsamer Reaktion – Amplitude bei schneller Reaktion):

- ▶ P3a-Amplitude
 - ▶ Cz, Go-Bedingung, Trend ($T = -1,90$; $p = 0,067$; $\bar{x} = -1,46$; 95% CI [-3,03; 0,11])
 - ▶ Pz, Go-Bedingung ($T = -2,04$; $p = 0,049$; $\bar{x} = -1,20$; 95% CI [-2,40; 0,00])
- ▶ P3b-Amplitude
 - ▶ Cz, Go-Bedingung ($T = -4,23$; $p = 0,000$; $\bar{x} = -2,47$; 95% CI [-3,67; -1,28])
 - ▶ Pz, Go-Bedingung ($T = -2,77$; $p = 0,009$; $\bar{x} = -1,69$; 95% CI [-2,93; -0,45])

Bei der Entscheidungsbedingung existierte im Mittelwertvergleich lediglich ein Trend der N2-Amplitude in Fz, wobei jedoch das 95%-Konfidenzintervall die Null mit einschließt ($T = -1,74$; $p = 0,092$; $\bar{x} = -1,19$; 95% CI [-2,58; 0,2]).

5. Diskussion

Die vorliegende Studie untersucht Effekte des Alterns auf Verhaltenskontrollprozesse und den dabei messbaren neuronalen Korrelaten in Form ereignis-korrelierter Potenziale bei gesunden, erwachsenen Probanden. Zur Untersuchung dieser Effekte wurde ein Experiment mit angepasstem Go-/NoGo-Paradigma verwendet, bei dem zusätzlich zu den Bedingungen Go („instruierter Tastendruck“) und NoGo („instruierte Inhibition“) auch eine Entscheidungsbedingung präsentiert wurde. Bei Präsentation dieser Bedingung war es Aufgabe des Probanden, selbst zwischen aktiver („freiwilliger Tastendruck“) oder passiver Reaktion („freiwillige Inhibition“) zu entscheiden, insgesamt aber möglichst gleich häufig beide Optionen gewählt zu haben. Während des Experiments wurde eine 32-Kanal-EEG-Messung unter standardisierten Bedingungen durchgeführt, um die neuronalen Korrelate aktiver Reaktionen (Tastendruck) und passiver Reaktionen (Inhibition) als Ausdruck von Verhaltenskontrollprozessen zu vergleichen und Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Probanden herauszuarbeiten.

Beim direkten Vergleich der N1-, N2- und P3a-/P3b-Amplituden zwischen jüngeren und älteren Probanden fielen parietal negativere N1-Amplituden bei älteren Probanden bei Go-, Entscheidungs- sowie Kontrollbedingung und größere P3a-Amplituden bei jüngeren Probanden bei Entscheidungsbedingung auf. Frontal waren die N1-Amplitude bei NoGo-Bedingung sowie die N2-Amplitude bei Go-Bedingung bei jüngeren Probanden negativer als bei älteren Probanden. Der Altersunterschied der N1-Amplitude bei der Kontrollbedingung spricht für eine generelle N1-Erhöhung im Alter (Karayanidis et al., 1995; Anderer et al., 1996; Chao et al., 1997).

Die N2 ist in verschiedenen Studien mit unterschiedlichen neuronalen Vorgängen assoziiert worden. So ist die N2 unter anderem als Ausdruck von Inhibitionsprozessen beim Unterdrücken falscher Reaktions-tendenzen bezeichnet worden (Falkenstein et al., 1999), aber auch als Zeichen der Konfliktüberwachung bei seltenen Reizen (Donkers et al., 2004; Nieuwenhuis et al., 2003). Auch die Auswahlreaktion (Gajewski et al., 2008) und die Stimulusklassifikation bei Aufgaben mit Auswahlbedingungen (Ritter et al., 1982; Ritter et al., 1983) sind als Eigenschaften der N2 postuliert worden. In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass bei Go-Bedingung die N2-Amplitude im Alter geringer ausgeprägt ist. Zur N2-Amplitude im Alter wurden in früheren Studien unterschiedliche Zusammenhänge beschrieben, wobei einerseits zunehmende Amplituden im Alter (Friedman et al., 1993; Gaeta et al., 2003) wie auch abnehmende Amplituden postuliert wurden (Woods, 1992; Enoki et al., 1993; Anderer et al., 1996; Amenedo et al., 1998; Czigler et al., 2006). Im Sinne der Unterdrückung falscher Reaktionstendenzen

könnte die höhere N2-Amplitude bei jüngeren Probanden bei der Go-Bedingung als Ausdruck eines größeren Fehlervermeidungsprozesses verstanden werden.

Die P3a-Amplituden bei der Entscheidungsbedingung waren im Alter signifikant kleiner als bei den jüngeren Probanden. Niedrigere P3-Amplituden im Alter wurden bereits mehrfach beschrieben (Iragui et al., 1993; Gilmore, 1995; Friedman et al., 1997; Ford et al., 1997; McEvoy et al., 2001; Gaeta et al., 2003; Friedman et al., 2007; Friedman, 2008b). Die P3 wurde in zahlreichen Arbeiten mit verschiedenen Konzepten wie der Entscheidungsfindung, Aufmerksamkeitsprozessen, Informationsverarbeitung und Kontextaktualisierung in Verbindung gebracht (Pfefferbaum et al., 1985; Kopp et al., 1996; Bruin et al., 2001; Bekker et al., 2004; Kamarajan et al., 2005b). Möglicherweise könnten die niedrigen P3-Amplituden im Alter mit reduzierten Aufmerksamkeits- und Informationsverarbeitungsprozessen zusammenhängen. Im Einklang mit der Theorie, die P3-Verteilung würde mit dem Alter gleichmäßiger (Mullis et al., 1985), könnte der Unterschied auch relativer Natur sein. Doch auch der Versuchsaufbau kann als mögliche Einflussgröße auf die Alters-P3 angesehen werden. So zeigte Pfefferbaum eine stärkere Abhängigkeit der P3 vom Alter bei visuellen Aufgaben als bei akustischen Paradigmen (Pfefferbaum et al., 1984a).

Die Häufigkeit richtiger Reaktionen bei der Go-Bedingung sowie falscher Reaktionen bei der NoGo- bzw. Kontroll-Bedingung zeigte sowohl bei jüngeren als auch älteren Probanden eine hohe Treffer- respektive geringe Fehlerquote. Die erreichte Genauigkeit bei der Bearbeitung der Experimentalaufgabe stimmt mit den Raten anderer Studien weitestgehend überein (Scheffers et al., 1996; Fallgatter et al., 1999; Menon et al., 2001; Nieuwenhuis et al., 2003; Donkers et al., 2004). Die Fehlerrate, also ausgelassene Tastendrucke bei der Go- bzw. getätigte Tastendrucke bei der NoGo- bzw. Kontroll-Bedingung, unterschied sich dabei nur unwesentlich zwischen beiden Gruppen. Dies kann einerseits als Zeichen für die Einfachheit der Aufgabe interpretiert werden (Friedman et al., 1997). Andererseits zeigen auch andere Studien vergleichbare Ergebnisse bei der Genauigkeit, mit der Aufgaben zur Überprüfung kognitiver Fähigkeiten von jüngeren und älteren Probanden bearbeitet werden (Cabeza et al., 2000; Mayr, 2001).

Bei der freiwilligen Experimentalbedingung sollten die Probanden jedes Mal neu entscheiden, ob sie mit einem Tastendruck reagieren oder nicht. Insgesamt sollte jedoch die Anzahl für und wider den Tastendruck etwa gleich groß sein. Sowohl jüngere als auch ältere Probanden schafften es gleichermaßen diese symmetrische Aufteilung annähernd zu erreichen, wobei die Entscheidung zum Tastendruck etwas häufiger gefällt wurde. Entscheidungsaufgaben wurden in der Vergangenheit meist als Entscheidungen zwischen mehreren Handlungen ausgelegt. Der Entscheidung, eine vorgegebene Handlung durchzuführen, wurde bislang nur in einigen wenigen Arbeiten der willentlichen Entscheidung, diese Handlung nicht

umzusetzen, gegenübergestellt (Karch et al., 2009; Kühn et al., 2009; Karch et al., 2010a; Karch et al., 2010b). Soweit vergleichbar zeigte sich auch in diesen Arbeiten ein leichtes Überwiegen der Entscheidung zur Handlungsausführung.

Im Vergleich zum instruierten Tastendruck bei der Go-Bedingung imponiert beim freiwilligen Tastendruck der Entscheidungsbedingung die deutlich längere Reaktionszeit. Bei beiden Bedingungen ist das Verhalten, also der Tastendruck, gleich, unterscheidet sich aber in dessen Initiierung dadurch, dass einerseits ein eher passives Reagieren auf vorgegebene Instruktionen erfolgt und andererseits eine aktive Kontrolle der weiteren Handlungsplanung mit weiteren kognitiven Abläufen erfolgt. Der Aufwand freiwilliger Verhaltensänderung bei aktiver Kontrolle über die Aufgabenbearbeitung wurde auch in anderen Studien gezeigt und äußert sich in verlängerten Reaktionszeiten (Arrington et al., 2004; Forstmann et al., 2006). Wie auch bei Treffer- und Fehlerquote konnte kein nennenswerter Unterschied zwischen den Reaktionszeiten der jüngeren und älteren Probanden gefunden werden, obwohl in unterschiedlichen Studien die Reaktionsschnelligkeit altersanfällig war (Spirduso et al., 1978; Pelosi et al., 1999; Kok, 2000; Mayr, 2001; Colcombe et al., 2003b), auch wenn Gegenbeispiele beschrieben sind (Iragui et al., 1993; Bahramali et al., 1999). Hierbei ist es denkbar, dass die spezifischen Anweisungen durch die akustische Reizdarbietung eine geringere Belastung des Arbeitsgedächtnisses als bei anderen Entscheidungsexperimenten zur Folge hatten (Kray et al., 2000). Durch diese geringere Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses fällt womöglich der sonst beobachtete zusätzliche Aufwand bei der Entscheidungsaufgabe weg (Friedman et al., 2008a).

Die Reaktionszeiten der Versuchsteilnehmer bei freier Entscheidung und bei der Go-Bedingung korrelierten positiv miteinander, so dass prinzipiell unabhängig vom Alter schnell reagierende und langsam reagierende Probanden voneinander unterschieden werden konnten (Goodin et al., 1998).

Die elektrophysiologischen Analysen ergaben größere N1-Amplituden bei NoGo im Vergleich zur Entscheidungsbedingung, wobei ältere Probanden hier ausgeprägtere N1-Amplituden vorwiesen. Als Potenzial früher sensorischer Abläufe wäre ein solcher Effekt bei dieser Aufgabestellung in Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen nicht zu erwarten. Hier könnte im Sinne einer selektiven Aufmerksamkeitszuwendung eine Erwartungshaltung bezüglich der häufiger auftretenden Experimentalbedingung „Go“ (Tonkombination: mittel-hoch) und dessen Gegenpart „NoGo“ (mittel-tief) bestehen, die zu ausgeprägteren N1-Amplituden führt. Die topografische Verteilung zeigte ausgeprägtere N1-Amplituden in Fz gegenüber Cz und Pz sowie in Cz gegenüber Pz. Jüngere Probanden

hatten hierbei eher frontal negativere N1-Amplituden, ältere Probanden hingegen zentro-parietal. Dies könnte als Hinweis auf einen Alterseffekt parietaler Strukturen gedeutet werden (Díaz et al., 1998).

Die N2-Amplitude zeigte größere Amplituden in Fz gegenüber Cz und Pz. Der Zusammenhang zwischen der N2-Amplitude und medial-frontalen Hirnabschnitten wurde bereits in einer Studie gezeigt (Tian et al., 2008). Hierbei zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Altersgruppen, die für eine veränderte Topografie der Potenziale im Alter sprechen würde, wie sie bereits in früheren Arbeiten gezeigt wurde (Goodin et al., 1978a; Friedman et al., 1993).

Die Elektrodenposition zeigte bei P3a-Amplituden signifikante Effekte in beiden Probandengruppen: P3a-Amplituden in Cz und Pz waren größer als in Fz. Auch die Bedingung ging mit signifikanten Effekten einher: Go-, NoGo- und Entscheidungs-P3a-Amplituden waren größer als in der Kontrollbedingung, zusätzlich waren auch die Amplituden bei NoGo größer als bei der Entscheidungsbedingung. Parietale Entscheidungs-P3a-Amplituden korrelierten negativ mit dem Alter. Die P3a wird als Orientierungsreaktion verstanden, wenn ein veränderter Reiz die Aufmerksamkeit weckt (Friedman, 2008b). Ein Zusammenhang zwischen Alter und niedrigeren P3a-Amplituden wurde in mehreren Studien nahe gelegt (Friedman et al., 1994; Fabiani et al., 1995; Kazmerski et al., 1995; Czigler et al., 2006; Weisz et al., 2006). Hierbei wurde in vielen Studien eine mehr frontale Lokalisierung von P3a-Amplituden im Alter gezeigt, so dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie als relative Amplituden-Verminderung bei im Alter verstärkt frontaler Beteiligung an der P3a gedeutet werden könnten.

Bei der P3b-Amplitude zeigten sich in beiden Altersgruppen signifikant größere Amplituden in Cz und Pz gegenüber Fz, was mit der Bedeutung der temporo-parietalen Übergangsregion als Generatorstruktur erklärt werden kann (Knight et al., 1989; Holt et al., 1995; Mulert et al., 2004b). Hinsichtlich der Experimentalbedingungen zeigte die P3b bei NoGo die größten Amplituden, die sich signifikant von den Amplituden bei Go, Entscheidung und Kontrolle unterschieden. Außerdem waren P3b-Amplituden bei Go und Entscheidung signifikant größer als bei der Kontrollbedingung. Eine Reduktion der P3b-Amplitude im Alter wurde bereits beschrieben (Friedman, 2008b). Problematisch hierbei ist der Einfluss eines breitflächigen kortikalen Netzwerks, das bei der Entstehung der P3b eine Rolle spielt. Insofern ist noch unklar, inwiefern strukturelle Veränderungen einzelner Hirnabschnitte zu den beobachteten Effekten beitragen.

Weder bei N1- noch bei N2-Amplituden konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Entscheidungsbedingung mit und ohne Reaktion beobachtet werden. Dies trifft auch für die P3a- und P3b-

Amplitude bei jüngeren Probanden zu, nicht jedoch für die Gruppe älterer Probanden, bei denen sich signifikant kleinere P3a- bzw. P3b-Amplituden bei der Entscheidung zum Tastendruck im Vergleich zur Entscheidung gegen den Tastendruck zeigten. Dies könnte etwa durch Potenzial-Überlagerungen durch die motorische Reaktion erklärt werden, die im Mittel etwa 680 Millisekunden nach Reizdarbietung und damit in unmittelbarer zeitlicher Nähe zur P3 erfolgte. Im Großen und Ganzen scheint die neurophysiologische Reaktion nicht von der Art der getroffenen Entscheidung abzuhängen und damit vielmehr den Entscheidungsprozess selbst zu reflektieren.

Versuchsteilnehmer können die Aufgabenbearbeitung eines Experiments in positiver Weise beeinflussen, wenn sie sich besonders bemühen und anstrengen, die Aufgabe so gewissenhaft und schnell zu bearbeiten wie es ihnen möglich ist (Mulert et al., 2005a). Um zu prüfen, inwiefern die investierte Anstrengung und eine hohe Motivation bei der Aufgabenbearbeitung selbige beeinflusst und welche Unterschiede dabei zwischen jüngeren und älteren Probanden bestehen, beurteilten die Versuchsteilnehmer im Anschluss an den Versuch ihre eigene Leistung, Mühe und Anstrengung anhand einer 5-stufigen Likert-Skala („Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung“).

Der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe wurde von jüngeren und älteren Probanden gleichermaßen als relativ leicht eingeschätzt. Auch die Anstrengung durch die Aufgabe wurde demzufolge von beiden Versuchsgruppen als gering eingestuft. Bemessen an individuellen Leistungsvermögen schätzten jüngere und auch ältere Versuchsteilnehmer ihre Leistung überdurchschnittlich hoch ein. Lediglich bei der Beurteilung der investierten Mühe unterschieden sich die Angaben der beiden Versuchsgruppen signifikant voneinander: Während jüngere Probanden angaben, sich sehr viel Mühe bereitet zu haben, bewerteten ältere Testpersonen ihre Mühe deutlich geringer, aber immer noch überdurchschnittlich.

Weder bei den jüngeren noch den älteren Probanden stand diese Selbsteinschätzung in Zusammenhang mit der tatsächlich erbrachten Leistung, bemessen an quantifizierbaren Leistungskorrelaten wie der Reaktionszeit bei Tastendruckbedingungen und der Anzahl richtiger bzw. falscher Reaktionen. Hier wäre ein signifikanter Zusammenhang zwischen schnellen Reaktionszeiten und investierter Mühe zu erwarten gewesen. Eine mögliche Erklärung für die Diskrepanz dieser Ergebnisse könnte in der Stichprobengröße und der geringen Streuung der quantifizierbaren Leistungsmerkmale liegen.

Signifikante Zusammenhänge zeigten sich jedoch deutlich bei den elektrophysiologischen Daten. Sowohl bei jüngeren als auch älteren Probanden ergaben sich Hinweise auf den Einfluss der Mühe auf kognitive Verarbeitungsprozesse, hauptsächlich die N2- und die P3-Amplituden betreffend.

Die elektrophysiologischen Daten der Probanden zeigten deutliche Unterschiede, je nachdem ob sich ein Proband eher wenig oder eher viel Mühe bei der Aufgabendurchführung gegeben hatte. Hierbei zeigte sich ein positiver Zusammenhang zwischen der investierten Anstrengung und der Höhe der N2- und P3-Amplituden, vor allem zentral. Mittlerweile wurde in zahlreichen Arbeiten ein starker Zusammenhang zwischen N1-Amplituden und der in die Bewältigung einer experimentellen Aufgabe investierten Mühe im Bereich des ACC gezeigt (Mulert et al., 2005a, Mulert et al., 2007, Tian et al., 2008, Mulert et al., 2008, Esposito et al., 2009, Mulert et al., 2010, Enge et al., 2011). Hierbei konnte eine Beteiligung und Mehraktivierung des ACC bei bewusster Anstrengung nachgewiesen werden. Keine dieser Studien konnte jedoch ähnlich ausgeprägte Effekte der Amplituden bei N2 und P3 wie in der vorliegenden Arbeit zeigen. Die deutlichen Mittelwertunterschiede zwischen Probanden mit eher wenig und solchen mit eher viel Mühe bei der Aufgabenbearbeitung sprechen für eine motivationsabhängige Verstärkung der damit verbundenen kognitiven Prozesse – insbesondere Fehlervermeidungs- und Aufmerksamkeitsprozesse, Informationsverarbeitung und Kontextaktualisierung – in zentral lokalisierten Arealen. Die Diskrepanz zu früheren Arbeiten könnte einerseits durch unterschiedliche experimentelle Paradigmen bedingt sein. Andererseits könnten hier möglicherweise auch Effekte des Alters eine Rolle spielen (Ford et al., 1997): Jüngere Probanden zeigten in der vorliegenden Studie die Tendenz, die eigene Mühe eher hoch einzuschätzen – rund drei Viertel gaben an, „sehr viel“ Mühe investiert zu haben – und stellen daher einen Großteil der hoch-motivierten Probanden dar. Bei älteren Probanden war die Angabe zur investierten Mühe nahezu gleichmäßig auf die Angaben „wenig“ bis „sehr viel“ verteilt (Mulert et al., 2005a). Hierzu wären weitere Untersuchungen an einer größeren Studienpopulation nötig.

Die Untersuchung der Reaktionszeiten und Korrelationen zu den Amplituden in N1, N2 bzw. P3a/P3b während der jeweiligen Bedingung (Go bzw. Entscheidung mit Tastendruck) zeigte zentral erniedrigte P3b-Amplituden bei langsam reagierenden, jüngeren Probanden. In der Gruppe älterer Probanden korrelierten längere Reaktionszeiten während der Go-Bedingung mit zentral niedrigeren Amplituden der P3b. Dieses Ergebnis stimmt zwar mit anderen Befunden überein (Iragui et al., 1993; Pekkonen et al., 1996; Amenedo et al., 1998), andere Studien haben solche Änderungen jedoch nicht feststellen können (Goodin et al., 1978a; Brown et al., 1983; Picton et al., 1984; Barrett et al., 1987). Eine mögliche Erklärung für diese unterschiedlichen Feststellungen könnte in voneinander abweichenden Experimentalbedingungen und Stimuli liegen.

Jüngere Probanden hatten bei der freien Entscheidung zum Tastendruck ausgeprägtere frontale N1- und parietale P3b-Amplituden, wenn sie sich langsamer zum Tastendruck bei der volitionalen Bedingung

entschieden. Eine wichtige Generatorstruktur der P3b ist die temporo-parietale Übergangsregion (Knight et al., 1989; Holt et al., 1995; Mulert et al., 2004b). Auch hier sind Verzögerungen durch intensivere Vorgänge der Reizevaluation denkbar, allerdings könnten hier auch Überlagerungen durch die motorische Reaktion für diese Befunde verantwortlich sein.

Ein möglicher Einflussfaktor auf die Ergebnisse könnte die ungleiche Verteilung des Geschlechts sein. Um potenzielle Effekte auszuschließen haben wir einen Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, der keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtsgruppen gezeigt hat. Ein weiterer limitierender Faktor der Studie dürfte in der Stichprobengröße von 17 respektive 18 Personen pro Gruppe liegen. Insbesondere bei der P3-Amplitude ist eine inter-individuelle Variabilität vorbeschrieben, die von verschiedenen Faktoren wie Geschlecht, Tages- bzw. Jahreszeit, Persönlichkeit und Aufgabenfaktoren abhängt (Polich, 1991). Trotz des standardisierten Messvorgangs lässt sich diese Variabilität nur schwer kontrollieren oder gar präzise quantifizieren; hierzu fehlen noch Standards zu adäquaten aber simplen Paradigmen oder gar normative Datenbanken mit entsprechenden Daten (Kügler et al., 1993). Entsprechend wurde auf eine präzise Berechnung zur Fallzahlabstimmung (Moher et al., 1994; Eng, 2003) verzichtet und die Gruppengröße im Sinne einer Pilotstudie geschätzt.

Fraglich bleibt, ob eine noch strengere Definition der Ausschlusskriterien mögliche Störeinflüsse eingeschränkt oder eher zu Verzerrungen der Beobachtungen geführt hätte. So könnte zum Ausschluss neuro-degenerativer Prozesse über die psychometrische Testung hinaus auch eine apparative Diagnostik erfolgen, um klinisch [noch] inapparente Degenerationsprozesse zu identifizieren (Zamrini et al., 2004). Darüber hinaus belegen zahlreiche Untersuchungen den positiven Einfluss von sportlicher Aktivität auf kognitive Funktionen und deren elektrophysiologischen Korrelaten (Bashore, 1989; Kramer et al., 1999; Cotman et al., 2002; Colcombe et al., 2003a; Colcombe et al., 2003b; Weuve et al., 2004; Colcombe et al., 2004). Ob der Ein- bzw. Ausschluss einzelner Probanden in Abhängigkeit einer kostspieligen und nicht notwendigerweise unfehlbaren bildgebenden Untersuchung oder einer Quantifizierung der sportlichen Aktivitäten zu anderen Ergebnissen kommt, müsste sorgfältig eruiert und dann in separaten Studien untersucht werden.

Die elektrophysiologischen Schwankungen in den vorliegenden Ergebnissen sind unter Umständen auf übereinander liegenden Hirnregionen zurückzuführen, die unterschiedliche Generatorfunktionen erfüllen und so die topografisch ermittelten Summationspotenziale verschieden stark beeinflussen. Die Gültigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse müsste in Folgeuntersuchungen geklärt werden.

6. Zusammenfassung

Die neurowissenschaftliche Forschung hat in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte verzeichnen können, die sowohl kulturellen Änderungen als auch technischen Neuerungen zu verdanken sind. Die zentrale Frage nach den inneren Zusammenhängen menschlichen Denkens treibt dazu an, in ausgeklügelten Studien Teilaspekte aufzuschlüsseln. Mit den exekutiven Funktionen wurden bereits viele Aspekte kognitiver Fähigkeiten untersucht, die nach wie vor im Mittelpunkt neurowissenschaftlicher Forschung stehen. Besonders das Konzept der Willensfreiheit wurde in den letzten Jahren verstärkt aufgegriffen und durch mediale Aufmerksamkeit auch einem breiteren Publikum zugänglich. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zu einzelnen Aspekten der exekutiven Funktionen, die sich mit volitionalen Gesichtspunkten und Alterseffekten befassen, dabei aber teilweise zu widersprüchlichen Ergebnissen kommen. Bislang gibt es keine Untersuchungen, die speziell Alterseinflüsse von Entscheidungen auf ereignis-korrelierte Potenziale erforschen.

In der vorliegenden Arbeit wurden Verhaltenskontrollprozesse gesunder, erwachsener Probanden im Alter von 18 bis 65 Jahren mittels 32-Kanal-EEG-Datenerhebung untersucht. Ziel war es, mit freien Entscheidungen assoziierte Veränderungen ereignis-korrelierter Potenziale sowie Unterschiede zwischen instruierter und freiwilliger Reaktionen im Vergleich zwischen jüngeren und älteren Probanden zu beschreiben. Hierzu nahmen insgesamt 35 Probanden (18 jüngere und 17 ältere Personen) an einem modifizierten auditorischen Go-/NoGo-Experiment mit Tastendruck teil. Dabei wurden 480 Stimuli, bestehend aus je einer von fünf möglichen Tonkombinationen, dargeboten, die entweder eine instruierte oder eine freiwillige Reaktion erforderlich machten bzw. eine Kontrollbedingung darstellten. Während des Experiments wurden Verhaltensdaten und ereignis-korrelierte Potenziale aufgezeichnet, nach Abschluss des Experiments wurden zusätzlich motivationale Aspekte mit einem Fragebogen erfasst.

Im Vergleich zum instruierten Tastendruck (Go-Bedingung) imponierte bei der freiwilligen Entscheidung zum Tastendruck eine deutlich verlängerte Reaktionszeit. Entgegen den Erwartungen zeigten sich beim Vergleich der Leistungsdaten (Reaktionszeiten, Richtigkeit der instruierten Reaktionen, Häufigkeit der freiwilligen Entscheidungen) keine Unterschiede zwischen den jüngeren und älteren Probanden.

Auffällige Befunde bei Entscheidungsbedingungen betrafen vor allem die parietalen N1-Amplituden im Vergleich älterer zu jüngeren Probanden. Hierbei zeigte sich bei N1-Amplituden der älteren Probandengruppe eine signifikant deutlichere Negativität in parietalen Abschnitten. Die Amplituden der P3a waren

bei älteren Probanden signifikant niedriger als bei jüngeren Probanden. In der Korrelationsanalyse zeigte zunehmendes Alter niedrigere Amplituden der P3a in parietalen und der P3b in zentralen Hirnregionen.

Die Entscheidung zum freiwilligen Tastendruck unterschied sich elektrophysiologisch nicht von der Entscheidung, freiwillig den Tastendruck zu unterlassen. Allerdings konnten bei der jüngeren Probandengruppe niedrigere P3a- und P3b-Amplituden bei der Entscheidung zum Tastendruck gegenüber der Entscheidung gegen den Tastendruck gezeigt werden, was sich bei älteren Versuchspersonen nicht zeigte. Insgesamt schien die Art der Entscheidung keinen bzw. einen geringen Einfluss auf die neurobiologische Reaktion zu haben.

Insgesamt scheinen Alterseffekte neuronaler Korrelate von Entscheidungen parietale Hirnabschnitte zu betreffen und vorrangig im Zusammenhang mit dem frühen ereignis-korrelierten Potenzial N1 sowie den späten Potenzialen P3a und P3b zu stehen.

Die verlängerten Reaktionszeiten während der Entscheidung sowohl bei jüngeren als auch älteren Probanden deuten auf zusätzliche kognitive Prozesse hin, die unabhängig vom Endresultat (Tastendruck oder nicht) ablaufen. Interessanterweise zeigten sich hierbei hohe frontal betonte N1-Amplituden bei jüngeren Probanden, die umso negativer ausgeprägt waren, je langsamer ein jüngerer Versuchsteilnehmer reagierte, während parietal lokalisierte P3b-Amplituden mit wachsender Reaktionszeit anstiegen. Bei älteren Probanden zeigten sich solche Effekte nicht.

Ein positiver Zusammenhang zeigte sich zwischen der investierten Anstrengung der Probanden und der Höhe der N2- und P3-Amplituden an zentralen Elektroden: Je mehr Mühe bei der Aufgabenbearbeitung investiert wurde, desto positiver waren die Amplituden. Ein Großteil der Personen, die sich viel Mühe bereitet hatten, gehörte zur jüngeren Probandengruppe.

Diese Ergebnisse stützen die Hypothese, dass es elektrophysiologische, altersabhängige Unterschiede bei Entscheidungen gibt. Ferner ergeben sich Hinweise auf einen Schwerpunkt in zentro-parietalen Hirnarealen mit Einfluss auf N1 und P3a/P3b. Hieraus lassen sich weitere Fragestellungen ableiten, die in weiteren Studien neue Erkenntnisse über Einflussfaktoren und Entstehungsmechanismen dieser Befunde und damit ein besseres Verständnis über Alterungsprozesse des menschlichen Gehirns liefern könnten.

7. Literatur

- Ahonniska et al., 2000 *Ahonniska J, Ahonen T, Aro T, Tolvanen A, Lyytinen H:*
„Repeated assessment of the Tower of Hanoi test: reliability and age effects“
Assessment, 2000. 7(3):297-310.
- Alain et al., 1999 *Alain C, Woods DL:*
„Age-related changes in processing auditory stimuli during visual attention: evidence for deficits in inhibitory control and sensory memory“
Psychology And Aging, 1999. 14(3):507-19.
- Allison et al., 1984 *Allison T, Hume AL, Wood CC, Goff WR:*
„Developmental and aging changes in somatosensory, auditory and visual evoked potentials“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1984. 58(1):14-24.
- Altenmüller, 2005 *Altenmüller E:*
„Ereigniskorrelierte Potentiale“
In: „Evozierte Potenziale“, Stöhr M, Dichgans J, Buettner UW, Hess CW.
Springer Medizin Verlag Heidelberg. 2005.
- Amenedo et al., 1998 *Amenedo E, Díaz F:*
„Automatic and effortful processes in auditory memory reflected by event-related potentials. Age-related findings“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1998. 108(4):361-9.
- Amenedo et al., 1999 *Amenedo E, Díaz F:*
„Ageing-related changes in the processing of attended and unattended standard stimuli“
Neuroreport, 1999. 10(11):2383-8.
- American Electroencephalographic Society, 1991
American Electroencephalographic Society:
„American Electroencephalographic Society guidelines for standard electrode position nomenclature“
Journal of Clinical Neurophysiology : Official Publication of the American Electroencephalographic Society, 1991. 8(2):200-202.
- Anderer et al., 1996 *Anderer P, Semlitsch HV, Saletu B:*
„Multichannel auditory event-related brain potentials: effects of normal aging on the scalp distribution of N1, P2, N2 and P300 latencies and amplitudes“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1996. 99(5):458-72.
- Anderer et al., 1998 *Anderer P, Pascual-Marqui RD, Semlitsch HV, Saletu B:*

„Differential effects of normal aging on sources of standard N1, target N1 and target P300 auditory event-related brain potentials revealed by low resolution electromagnetic tomography (LORETA)“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1998. 108(2):160-74.

Andres, 2003

Andrés P:

„Frontal cortex as the central executive of working memory: time to revise our view“

2010-02-11 19:38:19

Andrés, 2003

Andrés P:

„Frontal cortex as the central executive of working memory: time to revise our view“

Cortex; A Journal Devoted To the Study of the Nervous System And Behavior, 2003. 39(4-5):871-895.

Arrington et al., 2004

Arrington CM, Logan GD:

„The cost of a voluntary task switch“

Psychological Science : A Journal of the American Psychological Society / APS, 2004. 15(9):610-5.

Baddeley et al., 1974

Baddeley A, Hitch GJ:

„Working memory“

In: “The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory (Volume 8)”, Bower GH. New York: Academic Press. 1974.

Baddeley et al., 1976

Baddeley A, Mehrabian A:

„The psychology of memory“

Harper & Row New York. 1976.

Baddeley et al., 1992

Baddeley A, Hitch GJ:

„Working memory“

Science (New York, N.Y.), 1992. 255:556-559.

Baddeley, 1986

Baddeley A:

„Working memory“

Oxford: Oxford University Press. 1986.

Baddeley, 1998a

Baddeley A:

„Recent developments in working memory“

Current Opinion In Neurobiology, 1998. 8(2):234-238.

Baddeley, 1998b

Baddeley A:

„Working memory“

Comptes Rendus De L'Académie Des Sciences. Série III, Sciences De La Vie,

1998. 321(2-3):167-173.
- Baddeley, 2000** *Baddeley A:*
„The episodic buffer: a new component of working memory?“
Trends In Cognitive Sciences, 2000. 4(11):417-423.
- Baddeley, 2001** *Baddeley A:*
„Is working memory still working?“
The American Psychologist, 2001. 56(11):851-864.
- Baddeley, 2003** *Baddeley A:*
„Working memory and language: an overview“
Journal of Communication Disorders, 2003. 36(3):189-208.
- Badgaiyan, 2000** *Badgaiyan RD:*
„Executive control, willed actions, and nonconscious processing“
Human Brain Mapping, 2000. 9(1):38-41.
- Bahramali et al., 1999** *Bahramali H, Gordon E, Lagopoulos J, Lim CL, Leslie J, Wright J:*
„The effects of age on late components of the ERP and reaction time“
Experimental Aging Research, 1999. 25(1):69-80.
- Barrett et al., 1987** *Barrett G, Neshige R, Shibasaki H:*
„Human auditory and somatosensory event-related potentials: effects of response condition and age“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1987. 66(4):409-19.
- Bashore, 1989** *Bashore TR:*
„Age, physical fitness, and mental processing speed“
Annual Review of Gerontology & Geriatrics, 1989. 9:120-44.
- Beck et al., 1961** *Beck AT, Ward CH, Mendelson M, Mock J, Erbaugh J:*
„An inventory for measuring depression“
Archives of General Psychiatry, 1961. 4:561-571.
- Bekker et al., 2004** *Bekker EM, Kenemans JL, Verbaten MN:*
„Electrophysiological correlates of attention, inhibition, sensitivity and bias in a continuous performance task“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2004. 115(9):2001-13.
- Bekker et al., 2005** *Bekker EM, Kenemans JL, Verbaten MN:*
„Source analysis of the N2 in a cued Go/NoGo task“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 2005. 22(2):221-31.
- Bench et al., 1993** *Bench CJ, Frith CD, Grasby PM, Friston KJ, Paulesu E, Frackowiak RS, Dolan RJ:*

- „Investigations of the functional anatomy of attention using the Stroop test“
Neuropsychologia, 1993. 31(9):907-922.
- Bennett et al., 2004** *Bennett IJ, Golob EJ, Starr A:*
„Age-related differences in auditory event-related potentials during a cued attention task“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2004. 115(11):2602-15.
- Berg, 1948** *Berg EA:*
„A simple objective technique for measuring flexibility in thinking“
The Journal of General Psychology, 1948. 39:15-22.
- Berman et al., 1995** *Berman KF, Ostrem JL, Randolph C, Gold J, Goldberg TE, Coppola R, Carson RE, Herscovitch P, Weinberger DR:*
„Physiological activation of a cortical network during performance of the Wisconsin Card Sorting Test: a positron emission tomography study“
Neuropsychologia, 1995. 33(8):1027-46.
- Bertoli et al., 2002** *Bertoli S, Smurzynski J, Probst R:*
„Temporal resolution in young and elderly subjects as measured by mismatch negativity and a psychoacoustic gap detection task“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2002. 113(3):396-406.
- Bertoli et al., 2005** *Bertoli S, Smurzynski J, Probst R:*
„Effects of age, age-related hearing loss, and contralateral cafeteria noise on the discrimination of small frequency changes: psychoacoustic and electrophysiological measures“
Journal of the Association For Research In Otolaryngology : JARO, 2005. 6(3):207-22.
- Beteleva et al., 2009** *Beteleva TG, Sinitsyn SV, Farber DA:*
„Age-related specificity of the processing of visual information in the system of working memory“
Fiziologija Cheloveka, 2009. 35(6):25-36.
- Birbaumer et al., 1990** *Birbaumer N, Schmidt RF:*
„Biologische Psychologie“
Heidelberg: Springer Medizin Verlag. 1990.
- Bishop et al., 2001** *Bishop DV, Aamodt-Leeper G, Creswell C, McGurk R, Skuse DH:*
„Individual differences in cognitive planning on the Tower of Hanoi task: neuropsychological maturity or measurement error?“

Journal of Child Psychology And Psychiatry, And Allied Disciplines, 2001.
42(4):551-6.

- Blackwood et al., 1987** *Blackwood DH, St Clair DM, Blackburn IM, Tyrer GM:*
„Cognitive brain potentials and psychological deficits in Alzheimer's dementia
and Korsakoff's amnesic syndrome“
Psychological Medicine, 1987. 17(2):349-58.
- Brass et al., 2005** *Brass M, Derrfuss J, Forstmann B, von Cramon DY:*
„The role of the inferior frontal junction area in cognitive control“
Trends In Cognitive Sciences, 2005. 9(7):314-6.
- Braver et al., 2001** *Braver TS, Barch DM, Gray JR, Molfese DL, Snyder A:*
„Anterior cingulate cortex and response conflict: effects of frequency,
inhibition and errors“
Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991), 2001. 11(9):825-36.
- Brown et al., 1983** *Brown WS, Marsh JT, LaRue A:*
„Exponential electrophysiological aging: P3 latency“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1983. 55(3):277-85.
- Bruin et al., 2001** *Bruin KJ, Wijers AA, van Staveren AS:*
„Response priming in a go/nogo task: do we have to explain the go/nogo N2
effect in terms of response activation instead of inhibition?“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of
Clinical Neurophysiology, 2001. 112(9):1660-71.
- Bunge et al., 2000** *Bunge SA, Klingberg T, Jacobsen RB, Gabrieli JD:*
„A resource model of the neural basis of executive working memory“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of
America, 2000. 97(7):3573-8.
- Butterworth, 1974** *Butterworth S:*
„On the Theory of Filter Amplifiers.“
Circuit theory: foundations and classical contributions, 1974. :221.
- Cabeza et al., 2000** *Cabeza R, Nyberg L:*
„Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies“
Journal of Cognitive Neuroscience, 2000. 12(1):1-47.
- Callaway et al., 1973** *Callaway E, Halliday RA:*
„Evoked potential variability: effects of age, amplitude and methods of
measurement“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1973. 34(2):125-33.

- Cannon et al., 2005** *Cannon TD, Glahn DC, Kim J, Van Erp TGM, Karlsgodt K, Cohen MS, Nuechterlein KH, Bava S, Shirinyan D:*
„Dorsolateral prefrontal cortex activity during maintenance and manipulation of information in working memory in patients with schizophrenia“
Archives of General Psychiatry, 2005. 62(10):1071-80.
- Carlin et al., 2000** *Carlin D, Bonerba J, Phipps M, Alexander G, Shapiro M, Grafman J:*
„Planning impairments in frontal lobe dementia and frontal lobe lesion patients“
Neuropsychologia, 2000. 38(5):655-65.
- Celesia, 1986** *Celesia GG:*
„EEG and event-related potentials in aging and dementia“
Journal of Clinical Neurophysiology : Official Publication of the American Electroencephalographic Society, 1986. 3(2):99-111.
- Chao et al., 1997** *Chao LL, Knight RT:*
„Prefrontal deficits in attention and inhibitory control with aging“
Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991), 1997. 7(1):63-9.
- Clark-Carter, 2004** *Clark-Carter D:*
„Quantitative psychological research: A student's handbook“
Psychology press Hove, UK. 2004.
- Cockburn, 1995** *Cockburn J:*
„Performance on the Tower of London test after severe head injury“
Journal of the International Neuropsychological Society : JINS, 1995. 1(6):537-44.
- Cohen et al., 1995** *Cohen HL, Wang W, Porjesz B, Begleiter H:*
„Auditory P300 in young alcoholics: regional response characteristics“
Alcoholism, Clinical And Experimental Research, 1995. 19(2):469-75.
- Colcombe et al., 2003a** *Colcombe SJ, Erickson KI, Raz N, Webb AG, Cohen NJ, McAuley E, Kramer AF:*
„Aerobic fitness reduces brain tissue loss in aging humans“
The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences And Medical Sciences, 2003. 58(2):176-80.
- Colcombe et al., 2003b** *Colcombe S, Kramer AF:*
„Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study“
Psychological Science : A Journal of the American Psychological Society / APS, 2003. 14(2):125-30.
- Colcombe et al., 2004** *Colcombe SJ, Kramer AF, Erickson KI, Scalf P, McAuley E, Cohen NJ, Webb A,*

- Jerome GJ, Marquez DX, Elavsky S:*
„Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004. 101(9):3316-21.
- Collette et al., 2002** *Collette F, Van der Linden M:*
„Brain imaging of the central executive component of working memory“
Neuroscience And Biobehavioral Reviews, 2002. 26(2):105-25.
- Contestabile et al., 1995** *Contestabile MT, Suppressa F, Tonelli G, Giorgi D, Antonnicola G, D'Alba E:*
„The influence of age on the flash visual evoked potentials“
Acta Ophthalmologica Scandinavica, 1995. 73(4):308-12.
- Cooper et al., 2006** *Cooper RJ, Todd J, McGill K, Michie PT:*
„Auditory sensory memory and the aging brain: A mismatch negativity study“
Neurobiology of Aging, 2006. 27(5):752-62.
- Cotman et al., 2002** *Cotman CW, Berchtold NC:*
„Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity“
Trends In Neurosciences, 2002. 25(6):295-301.
- Courchesne et al., 1975** *Courchesne E, Hillyard SA, Galambos R:*
„Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man“
Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1975. 39(2):131-143.
- Courtney et al., 1998** *Courtney SM, Petit L, Maisog JM, Ungerleider LG, Haxby JV:*
„An area specialized for spatial working memory in human frontal cortex“
Science (New York, N.Y.), 1998. 279(5355):1347-51.
- Cunnington et al., 2005** *Cunnington R, Windischberger C, Moser E:*
„Premovement activity of the pre-supplementary motor area and the readiness for action: studies of time-resolved event-related functional MRI“
Human Movement Science, 2005. 24(5-6):644-56.
- Czigler et al., 1992** *Czigler I, Csibra G, Csontos A:*
„Age and inter-stimulus interval effects on event-related potentials to frequent and infrequent auditory stimuli“
Biological Psychology, 1992. 33(2-3):195-206.
- Czigler et al., 2005** *Czigler I, Balázs L:*
„Age-related effects of novel visual stimuli in a letter-matching task: an event-related potential study“
Biological Psychology, 2005. 69(2):229-42.
- Czigler et al., 2006** *Czigler I, Pató L, Poszet E, Balázs L:*

- „Age and novelty: event-related potentials to visual stimuli within an auditory oddball-visual detection task“
International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International Organization of Psychophysiology, 2006. 62(2):290-9.
- D'Esposito, 1995** *D'Esposito M, Detre JA, Alsop DC, Shin RK, Atlas S, Grossman M:*
„The neural basis of the central executive system of working memory“
2010-07-06 22:52:19
- Dagher et al., 1999** *Dagher A, Owen AM, Boecker H, Brooks DJ:*
„Mapping the network for planning: a correlational PET activation study with the Tower of London task“
Brain : A Journal of Neurology, 1999. 122 (Pt 10):1973-87.
- Danek et al., 2005** *Danek A, Göhringer T:*
„Kognitive Neurologie und Neuropsychologie“
In: "Frontalhirn", Förstl H.. Springer. 2005.
- Debener et al., 2005** *Debener S, Ullsperger M, Siegel M, Fiehler K, von Cramon DY, Engel AK:*
„Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring“
The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society For Neuroscience, 2005. 25(50):11730-7.
- Debener et al., 2006** *Debener S, Ullsperger M, Siegel M, Engel AK:*
„Single-trial EEG-fMRI reveals the dynamics of cognitive function“
Trends In Cognitive Sciences, 2006. 10(12):558-63.
- Deiber et al., 1991** *Deiber MP, Passingham RE, Colebatch JG, Friston KJ, Nixon PD, Frackowiak RS:*
„Cortical areas and the selection of movement: a study with positron emission tomography“
Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale, 1991. 84(2):393-402.
- Della Sala et al., 1999** *Della Sala S, Gray C, Baddeley A, Allamano N, Wilson L:*
„Pattern span: a tool for unwinding visuo-spatial memory“
Neuropsychologia, 1999. 37(10):1189-99.
- Derogatis, 1977** *Derogatis LR:*
„SCL-90-R, administration, scoring & procedure manual-I for the R(evised) version“
John Hopkins University School of Medicine, Baltimore. 1977.
- Díaz et al., 1998** *Díaz F, Amenedo E:*

- „Ageing effects on flash visual evoked potentials (FVEP) recorded from parietal and occipital electrodes“
Neurophysiologie Clinique = Clinical Neurophysiology, 1998. 28(5):399-412.
- Donchin et al., 1978 *Donchin E, Ritter W, McCallum WC:*
„Cognitive psychophysiology: The endogenous components of the ERP“
In: “Event-related brain potentials in man”, Callaway E, Tueting P, Koslow SH.
Academic Press. 1978.
- Donchin et al., 1988 *Donchin E, Coles MGH:*
„Is the P300 component a manifestation of context updating?“
Behavioral and Brain Sciences, 1988. 11(03):357-374.
- Donkers et al., 2004 *Donkers FCL, van Boxtel GJM:*
„The N2 in go/no-go tasks reflects conflict monitoring not response inhibition“
Brain And Cognition, 2004. 56(2):165-76.
- Dunbar et al., 1984 *Dunbar K, MacLeod CM:*
„A horse race of a different color: Stroop interference patterns with transformed words“
Journal of Experimental Psychology. Human Perception And Performance, 1984. 10(5):622-639.
- Durston et al., 2002 *Durston S, Thomas KM, Worden MS, Yang Y, Casey BJ:*
„The effect of preceding context on inhibition: an event-related fMRI study“
NeuroImage, 2002. 16(2):449-53.
- Eichele et al., 2005 *Eichele T, Specht K, Moosmann M, Jongsma MLA, Quiroga RQ, Nordby H, Hugdahl K:*
„Assessing the spatiotemporal evolution of neuronal activation with single-trial event-related potentials and functional MRI“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005. 102(49):17798-803.
- Eimer, 1993 *Eimer M:*
„Effects of attention and stimulus probability on ERPs in a Go/Nogo task“
Biological Psychology, 1993. 35(2):123-138.
- Eng, 2003 *Eng J:*
„Sample size estimation: how many individuals should be studied?“
Radiology, 2003. 227(2):309-13.
- Enge et al., 2011 *Enge S, Fleischhauer M, Lesch KP, Strobel A:*
„On the role of serotonin and effort in voluntary attention: evidence of genetic

- variation in N1 modulation“
Behavioural Brain Research, 2011. 216(1):122-8.
- Enoki et al., 1993 *Enoki H, Sanada S, Yoshinaga H, Oka E, Ohtahara S:*
„The effects of age on the N200 component of the auditory event-related potentials“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 1993. 1(3):161-7.
- Esposito et al., 2009 *Esposito F, Mulert C, Goebel R:*
„Combined distributed source and single-trial EEG-fMRI modeling: application to effortful decision making processes“
NeuroImage, 2009. 47(1):112-21.
- Fabiani et al., 1995 *Fabiani M, Friedman D:*
„Changes in brain activity patterns in aging: the novelty oddball“
Psychophysiology, 1995. 32(6):579-94.
- Falkenstein et al., 1995 *Falkenstein M, Koshlykova NA, Kiroj VN, Hoormann J, Hohnsbein J:*
„Late ERP components in visual and auditory Go/Nogo tasks“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1995. 96(1):36-43.
- Falkenstein et al., 1999 *Falkenstein M, Hoormann J, Hohnsbein J:*
„ERP components in Go/Nogo tasks and their relation to inhibition“
Acta Psychologica, 1999. 101(2-3):267-291.
- Fallgatter et al., 1999 *Fallgatter AJ, Mueller TJ, Strik WK:*
„Age-related changes in the brain electrical correlates of response control“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 1999. 110(5):833-8.
- Farah et al., 1988 *Farah MJ, Hammond KM, Levine DN, Calvanio R:*
„Visual and spatial mental imagery: dissociable systems of representation“
Cognitive Psychology, 1988. 20(4):439-62.
- Fjell et al., 2001 *Fjell AM, Walhovd KB:*
„P300 and neuropsychological tests as measures of aging: scalp topography and cognitive changes“
Brain Topography, 2001. 14(1):25-40.
- Fjell et al., 2003 *Fjell AM, Walhovd KB:*
„On the topography of P3a and P3b across the adult lifespan--a factor-analytic study using orthogonal procrustes rotation“
Brain Topography, 2003. 15(3):153-64.
- Folstein et al., 1985 *Folstein M, Anthony JC, Parhad I, Duffy B, Gruenberg EM:*

- „The meaning of cognitive impairment in the elderly“
Journal of the American Geriatrics Society, 1985. 33(4):228-35.
- Ford et al., 1994 *Ford JM, Sullivan EV, Marsh L, White PM, Lim KO, Pfefferbaum A:*
„The relationship between P300 amplitude and regional gray matter volumes depends upon the attentional system engaged“
Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1994. 90(3):214-228.
- Ford et al., 1995 *Ford JM, Roth WT, Isaacks BG, White PM, Hood SH, Pfefferbaum A:*
„Elderly men and women are less responsive to startling noises: N1, P3 and blink evidence“
Biological Psychology, 1995. 39(2-3):57-80.
- Ford et al., 1997 *Ford JM, Roth WT, Isaacks BG, Tinklenberg JR, Yesavage J, Pfefferbaum A:*
„Automatic and effortful processing in aging and dementia: event-related brain potentials“
Neurobiology of Aging, 1997. 18(2):169-80.
- Ford et al., 1999 *Ford JM, Mathalon DH, Marsh L, Faustman WO, Harris D, Hoff AL, Beal M, Pfefferbaum A:*
„P300 amplitude is related to clinical state in severely and moderately ill patients with schizophrenia“
Biological Psychiatry, 1999. 46(1):94-101.
- Forstmann et al., 2006 *Forstmann BU, Brass M, Koch I, von Cramon DY:*
„Voluntary selection of task sets revealed by functional magnetic resonance imaging“
Journal of Cognitive Neuroscience, 2006. 18(3):388-98.
- Forstmann et al., 2008 *Forstmann BU, Wolfensteller U, Derrfuss J, Neumann J, Brass M, Ridderinkhof KR, von Cramon DY:*
„When the choice is ours: context and agency modulate the neural bases of decision-making“
PloS One, 2008. 3(4):e1899.
- Frey et al., 2000 *Frey S, Petrides M:*
„Orbitofrontal cortex: A key prefrontal region for encoding information“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000. 97(15):8723-7.
- Friedman et al., 1993 *Friedman D, Simpson G, Hamberger M:*
„Age-related changes in scalp topography to novel and target stimuli“
Psychophysiology, 1993. 30(4):383-96.
- Friedman et al., 1994 *Friedman D, Simpson GV:*

„ERP amplitude and scalp distribution to target and novel events: effects of temporal order in young, middle-aged and older adults“

Brain Research. Cognitive Brain Research, 1994. 2(1):49-63.

Friedman et al., 1997 *Friedman D, Kazmerski V, Fabiani M:*

„An overview of age-related changes in the scalp distribution of P3b“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1997. 104(6):498-513.

Friedman et al., 2007 *Friedman D, Nessler D, Johnson Jr R:*

„Memory encoding and retrieval in the aging brain“

Clinical EEG And Neuroscience : Official Journal of the EEG And Clinical Neuroscience Society (ENCS), 2007. 38(1):2-7.

Friedman et al., 2008a *Friedman D, Nessler D, Johnson Jr R, Ritter W, Bersick M:*

„Age-related changes in executive function: an event-related potential (ERP) investigation of task-switching“

Neuropsychology, Development, And Cognition. Section B, Aging, Neuropsychology And Cognition, 2008. 15(1):95-128.

Friedman, 2008b *Friedman D:*

„Oxford handbook of event-related potential components: The components of aging“

Luck S, Kappenman E. New York: Oxford University Press. 2008.

Frith et al., 1991 *Frith CD, Friston K, Liddle PF, Frackowiak RS:*

„Willed action and the prefrontal cortex in man: a study with PET“

Proceedings. Biological Sciences / the Royal Society, 1991. 244(1311):241-6.

Funahashi et al., 1989 *Funahashi S, Bruce CJ, Goldman-Rakic PS:*

„Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex“

Journal of Neurophysiology, 1989. 61(2):331-49.

Funahashi et al., 1990 *Funahashi S, Bruce CJ, Goldman-Rakic PS:*

„Visuospatial coding in primate prefrontal neurons revealed by oculomotor paradigms“

Journal of Neurophysiology, 1990. 63(4):814-31.

Funahashi et al., 1993 *Funahashi S, Bruce CJ, Goldman-Rakic PS:*

„Dorsolateral prefrontal lesions and oculomotor delayed-response performance: evidence for mnemonic "scotomas"“

The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society For Neuroscience, 1993. 13(4):1479-97.

Funahashi, 2006 *Funahashi S:*

- „Prefrontal cortex and working memory processes“
Neuroscience, 2006. 139(1):251-61.
- Fuster, 1989 *Fuster JM:*
„The prefrontal cortex: Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe“
Raven Press New York. 1989.
- Gaeta et al., 1998 *Gaeta H, Friedman D, Ritter W, Cheng J:*
„An event-related potential study of age-related changes in sensitivity to stimulus deviance“
Neurobiology of Aging, 1998. 19(5):447-59.
- Gaeta et al., 2001 *Gaeta H, Friedman D, Ritter W, Cheng J:*
„An event-related potential evaluation of involuntary attentional shifts in young and older adults“
Psychology And Aging, 2001. 16(1):55-68.
- Gaeta et al., 2002 *Gaeta H, Friedman D, Ritter W, Hunt G:*
„Age-related changes in neural trace generation of rule-based auditory features“
Neurobiology of Aging, 2002. 23(3):443-55.
- Gaeta et al., 2003 *Gaeta H, Friedman D, Ritter W:*
„Auditory selective attention in young and elderly adults: the selection of single versus conjoint features“
Psychophysiology, 2003. 40(3):389-406.
- Gajewski et al., 2008 *Gajewski PD, Stoerig P, Falkenstein M:*
„ERP--correlates of response selection in a response conflict paradigm“
Brain Research, 2008. 1189:127-34.
- Gallinat et al., 2002 *Gallinat J, Mulert C, Bajbouj M, Herrmann WM, Schunter J, Senkowski D, Moukhtieva R, Kronfeldt D, Winterer G:*
„Frontal and temporal dysfunction of auditory stimulus processing in schizophrenia“
Neuroimage, 2002. 17(1):110-127.
- Garavan et al., 1999 *Garavan H, Ross TJ, Stein EA:*
„Right hemispheric dominance of inhibitory control: an event-related functional MRI study“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999. 96(14):8301-6.
- Garavan et al., 2002 *Garavan H, Ross TJ, Murphy K, Roche RAP, Stein EA:*

- „Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: inhibition, error detection, and correction“**
NeuroImage, 2002. 17(4):1820-9.
- Giard et al., 1994** *Giard MH, Perrin F, Echallier JF, Thevenet M, Froment JC, Pernier J:*
„Dissociation of temporal and frontal components in the human auditory N1 wave: a scalp current density and dipole model analysis“
Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 1994. 92(3):238-252.
- Gilmore, 1995** *Gilmore R:*
„Evoked potentials in the elderly“
Journal of Clinical Neurophysiology : Official Publication of the American Electroencephalographic Society, 1995. 12(2):132-8.
- Goel et al., 1995** *Goel V, Grafman J:*
„Are the frontal lobes implicated in "planning" functions? Interpreting data from the Tower of Hanoi“
Neuropsychologia, 1995. 33(5):623-42.
- Golden, 1978** *Golden CJ:*
„Stroop Color and Word Test: A manual for clinical and experimental uses“
Chicago, Illinois: Stoelting. 1978.
- Goldman et al., 1970** *Goldman PS, Rosvold HE:*
„Localization of function within the dorsolateral prefrontal cortex of the rhesus monkey“
Experimental Neurology, 1970. 27(2):291-304.
- Golob et al., 2001** *Golob EJ, Miranda GG, Johnson JK, Starr A:*
„Sensory cortical interactions in aging, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease“
Neurobiology of Aging, 2001. 22(5):755-63.
- Goodin et al., 1978a** *Goodin DS, Squires KC, Henderson BH, Starr A:*
„Age-related variations in evoked potentials to auditory stimuli in normal human subjects“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1978. 44(4):447-58.
- Goodin et al., 1978b** *Goodin DS, Squires KC, Starr A:*
„Long latency event-related components of the auditory evoked potential in dementia“
Brain : A Journal of Neurology, 1978. 101(4):635-48.
- Goodin et al., 1998** *Goodin DS, Aminoff MJ:*

„Event-related potentials in the study of sensory discrimination and motor response in simple and choice reaction tasks“

Journal of Clinical Neurophysiology : Official Publication of the American Electroencephalographic Society, 1998. 15(1):34-43.

Goschke, 2002

Goschke T:

„Volition und kognitive Kontrolle“

In: „Lehrbuch Allgemeine Psychologie“, Müsseler J, Prinz W. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 2002.

Grafman et al., 1999

Grafman J, Litvan I:

„Evidence for four forms of neuroplasticity“

In: „Neuronal plasticity: Building a bridge from the laboratory to the clinic“, Grafman J, Christen Y. Berlin: Springer. 1999.

Graham et al., 1997

Graham JE, Rockwood K, Beattie BL, Eastwood R, Gauthier S, Tuokko H, McDowell I:

„Prevalence and severity of cognitive impairment with and without dementia in an elderly population“

Lancet, 1997. 349(9068):1793-6.

Hecker et al., 1997

Hecker R, Mapperson B:

„Dissociation of visual and spatial processing in working memory“

Neuropsychologia, 1997. 35(5):599-603.

Hegerl, 1995

Hegerl U:

„Schizophrenics with small P300: a subgroup with neurodevelopmental disturbance and a high risk for-tardive dyskinesia?“

Acta Psychiatrica Scandinavia, 1995. 91(2):120-125.

Hegerl, 1998

Hegerl U:

„Ereigniskorrelierte Potentiale“

In: „Neurophysiologische Untersuchungen in der Psychiatrie: EEG, EKP, Schlafpolygraphie, Motorik, autonome Funktionen“, Hegerl U. Wien: Springer. 1998.

Hillyard et al., 1973

Hillyard SA, Hink RF, Schwent VL, Picton TW:

„Electrical signs of selective attention in the human brain“

Science, 1973. 182(4108):177.

Holt et al., 1995

Holt LE, Raine A, Pa G, Schneider LS, Henderson VW, Pollock VE:

„P300 topography in Alzheimer's disease“

Psychophysiology, 1995. 32(3):257-65.

Humes et al., 1997

Humes GE, Welsh MC, Retzlaff P, Cookson N:

- „Towers of Hanoi and London: Reliability of two executive function tasks.“
Assessment, 1997.
- Hyder et al., 1997 *Hyder F, Phelps EA, Wiggins CJ, Labar KS, Blamire AM, Shulman RG:*
„"Willed action"; a functional MRI study of the human
prefrontal cortex during a sensorimotor task“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of
America, 1997. 94(13):6989-94.
- Iragui et al., 1993 *Iragui VJ, Kutas M, Mitchiner MR, Hillyard SA:*
„Effects of aging on event-related brain potentials and reaction times in an
auditory oddball task“
Psychophysiology, 1993. 30:10-10.
- Jarrold et al., 2006 *Jarrold C, Towse JN:*
„Individual differences in working memory“
Neuroscience, 2006. 139(1):39-50.
- Jodo et al., 1992 *Jodo E, Kayama Y:*
„Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go
task.“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1992. 82(6):477-482.
- Johnstone et al., 1996 *Johnstone SJ, Barry RJ, Anderson JW, Coyle SF:*
„Age-related changes in child and adolescent event-related potential
component morphology, amplitude and latency to standard and target stimuli
in an auditory oddball task“
International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International
Organization of Psychophysiology, 1996. 24(3):223-38.
- Jonides et al., 2005 *Jonides J, Lacey SC, Nee DE:*
„Processes of working memory in mind and brain“
Current Directions in Psychological Science, 2005. 14(1):2.
- Jonkman et al., 2007 *Jonkman LM, Sniiedt FLF, Kemner C:*
„Source localization of the Nogo-N2: a developmental study“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of
Clinical Neurophysiology, 2007. 118(5):1069-77.
- Juckel et al., 1996 *Juckel G, Müller-Schubert A, Gaebel W, Hegerl U:*
„Residual symptoms and P300 in schizophrenic outpatients“
Psychiatry Research, 1996. 65(1):23-32.
- Kafer et al., 1997 *Kafer KL, Hunter M:*
„On testing the face validity of planning/problem-solving tasks in a normal

population“

Journal of the International Neuropsychological Society : JINS, 1997. 3(2):108-19.

- Kaiser et al., 2003** *Kaiser S, Unger J, Kiefer M, Markela J, Mundt C, Weisbrod M:*
„Executive control deficit in depression: event-related potentials in a Go/Nogo task“
Psychiatry Research, 2003. 122(3):169-84.
- Kamarajan et al., 2005a** *Kamarajan C, Porjesz B, Jones KA, Choi K, Chorlian DB, Padmanabhapillai A, Rangaswamy M, Stimus AT, Begleiter H:*
„Alcoholism is a disinhibitory disorder: neurophysiological evidence from a Go/No-Go task“
Biological Psychology, 2005. 69(3):353-73.
- Kamarajan et al., 2005b** *Kamarajan C, Porjesz B, Jones KA, Chorlian DB, Padmanabhapillai A, Rangaswamy M, Stimus AT, Begleiter H:*
„Spatial-anatomical mapping of NoGo-P3 in the offspring of alcoholics: evidence of cognitive and neural disinhibition as a risk for alcoholism“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2005. 116(5):1049-61.
- Karayanidis et al., 1995** *Karayanidis F, Andrews S, Ward PB, Michie PT:*
„ERP indices of auditory selective attention in aging and Parkinson's disease“
Psychophysiology, 1995. 32(4):335-50.
- Karch et al., 2008a** *Karch S, Jäger L, Karamatskos E, Graz C, Stammel A, Flatz W, Lutz J, Holtschmidt-Täschner B, Genius J, Leicht G, Pogarell O, Born C, Möller HJ, Hegerl U, Reiser M, Soyka M, Mulert C:*
„Influence of trait anxiety on inhibitory control in alcohol-dependent patients: simultaneous acquisition of ERPs and BOLD responses“
Journal of Psychiatric Research, 2008. 42(9):734-45.
- Karch et al., 2009** *Karch S, Mulert C, Thalmeier T, Lutz J, Leicht G, Meindl T, Möller HJ, Jäger L, Pogarell O:*
„The free choice whether or not to respond after stimulus presentation“
Human Brain Mapping, 2009. 30(9):2971-85.
- Karch et al., 2010a** *Karch S, Thalmeier T, Lutz J, Cerovecki A, Opgen-Rhein M, Hock B, Leicht G, Hennig-Fast K, Meindl T, Riedel M, Mulert C, Pogarell O:*
„Neural correlates (ERP/fMRI) of voluntary selection in adult ADHD patients“
European Archives of Psychiatry And Clinical Neuroscience, 2010. 260(5):427-40.

- Karch et al., 2010b** *Karch S, Feuerecker R, Leicht G, Meindl T, Hantschk I, Kirsch V, Ertl M, Lutz J, Pogarell O, Mulert C:*
„Separating distinct aspects of the voluntary selection between response alternatives: N2- and P3-related BOLD responses“
NeuroImage, 2010. 51(1):356-364.
- Kazmerski et al., 1995** *Kazmerski VA, Friedman D:*
„Repetition of novel stimuli in an ERP oddball paradigm: Aging effects“
Journal of Psychophysiology, 1995. 9:298-311.
- Kelly et al., 2004** *Kelly AMC, Hester R, Murphy K, Javitt DC, Foxe JJ, Garavan H:*
„Prefrontal-subcortical dissociations underlying inhibitory control revealed by event-related fMRI“
The European Journal of Neuroscience, 2004. 19(11):3105-12.
- Kiefer et al., 1998** *Kiefer M, Marzinzik F, Weisbrod M, Scherg M, Spitzer M:*
„The time course of brain activations during response inhibition: evidence from event-related potentials in a go/no go task“
Neuroreport, 1998. 9(4):765-70.
- Kisley et al., 2005** *Kisley MA, Davalos DB, Engleman LL, Guinther PM, Davis HP:*
„Age-related change in neural processing of time-dependent stimulus features“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 2005. 25(3):913-25.
- Klinke et al., 1968** *Klinke R, Fruhstorfer H, Finkenzeller P:*
„Evoked responses as a function of external and stored information“
Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1968. 25(2):119-122.
- Knight et al., 1989** *Knight RT, Scabini D, Woods DL, Clayworth CC:*
„Contributions of temporal-parietal junction to the human auditory P3“
Brain Research, 1989. 502(1):109-116.
- Knight, 1984** *Knight RT:*
„Decreased response to novel stimuli after prefrontal lesions in man“
Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 1984. 59(1):9-20.
- Kok et al., 1986** *Kok A, Rooyakkers JA:*
„ERPs to laterally presented pictures and words in a semantic categorization task“
Psychophysiology, 1986. 23(6):672-83.
- Kok, 2000** *Kok A:*
„Age-related changes in involuntary and voluntary attention as reflected in components of the event-related potential (ERP)“

- Biological Psychology, 2000. 54(1-3):107-43.
- Konishi et al., 1998** *Konishi S, Nakajima K, Uchida I, Kameyama M, Nakahara K, Sekihara K, Miyashita Y:*
„Transient activation of inferior prefrontal cortex during cognitive set shifting“
Nature Neuroscience, 1998. 1(1):80-4.
- Konishi et al., 1999a** *Konishi S, Nakajima K, Uchida I, Kikyo H, Kameyama M, Miyashita Y:*
„Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI“
Brain : A Journal of Neurology, 1999. 122 (Pt 5):981-91.
- Konishi et al., 1999b** *Konishi S, Kawazu M, Uchida I, Kikyo H, Asakura I, Miyashita Y:*
„Contribution of working memory to transient activation in human inferior prefrontal cortex during performance of the Wisconsin Card Sorting Test“
Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991), 1999. 9(7):745-53.
- Kopp et al., 1996** *Kopp B, Mattler U, Goertz R, Rist F:*
„N2, P3 and the lateralized readiness potential in a nogo task involving selective response priming“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1996. 99(1):19-27.
- Kostopoulos et al., 2003** *Kostopoulos P, Petrides M:*
„The mid-ventrolateral prefrontal cortex: insights into its role in memory retrieval“
The European Journal of Neuroscience, 2003. 17(7):1489-97.
- Kotovsky et al., 1985** *Kotovsky K, Hayes JR, Simon HA:*
„Why are some problems hard? Evidence from Tower of Hanoi.“
Cognitive Psychology, 1985. 17(2).
- Kramer et al., 1999** *Kramer AF, Hahn S, Cohen NJ, Banich MT, McAuley E, Harrison CR, Chason J, Vakil E, Bardell L, Boileau RA, Colcombe A:*
„Ageing, fitness and neurocognitive function“
Nature, 1999. 400(6743):418-9.
- Kray et al., 2000** *Kray J, Lindenberger U:*
„Adult age differences in task switching“
Psychology And Aging, 2000. 15(1):126-47.
- Kügler et al., 1993** *Kügler CF, Taghavy A, Platt D:*
„The event-related P300 potential analysis of cognitive human brain aging: a review“
Gerontology, 1993. 39(5):280-303.

- Kuhl et al., 1994** *Kuhl J, Goschke T:*
„A theory of action control: Mental subsystems, modes of control, and volitional conflict-resolution strategies.“
In: “Volition and personality: Action versus state orientation”, Kuhl J, Beckmann J. Göttingen/Toronto: Hogrefe. 1994.
- Kühn et al., 2009** *Kühn S, Brass M:*
„When doing nothing is an option: the neural correlates of deciding whether to act or not“
NeuroImage, 2009. 46(4):1187-93.
- Kutas et al., 1994** *Kutas M, Iragui V, Hillyard SA:*
„Effects of aging on event-related brain potentials (ERPs) in a visual detection task“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1994. 92(2):126-39.
- Laplane et al., 1977** *Laplane D, Talairach J, Meininger V, Bancaud J, Orgogozo JM:*
„Clinical consequences of corticectomies involving the supplementary motor area in man“
Journal of the Neurological Sciences, 1977. 34(3):301-14.
- Lau et al., 2004a** *Lau HC, Rogers RD, Haggard P, Passingham RE:*
„Attention to intention“
Science (New York, N.Y.), 2004. 303(5661):1208-10.
- Lau et al., 2004b** *Lau HC, Rogers RD, Ramnani N, Passingham RE:*
„Willed action and attention to the selection of action“
NeuroImage, 2004. 21(4):1407-15.
- Lau et al., 2006** *Lau H, Rogers RD, Passingham RE:*
„Dissociating response selection and conflict in the medial frontal surface“
NeuroImage, 2006. 29(2):446-51.
- Laux et al., 1981** *Laux L, Glanzmann P, Schaffner P, Spielberger CD:*
„Das State-Trait-Angstinventar (STAI)“
Beltz, Weinheim. 1981.
- Lavric et al., 2004** *Lavric A, Pizzagalli DA, Forstmeier S:*
„When 'go' and 'nogo' are equally frequent: ERP components and cortical tomography“
The European Journal of Neuroscience, 2004. 20(9):2483-8.
- Lee et al., 2009** *Lee TMC, Au RKC, Liu HL, Ting KH, Huang CM, Chan CCH:*
„Are errors differentiable from deceptive responses when feigning memory impairment? An fMRI study“

Brain And Cognition, 2009. 69(2):406-12.

Leimkuhler et al., 1985 *Leimkuhler ME, Mesulam MM:*

„Reversible go-no go deficits in a case of frontal lobe tumor“

Annals of Neurology, 1985. 18(5):617-9.

Leòn-Carriòn et al., 1991

Leòn-Carriòn J, Morales M, Forastero P, Domínguez-Morales MR, Murillo F, Jimenez-Baco R, Gordon P:

„The computerized Tower of Hanoi: a new form of administration and suggestions for interpretation“

Perceptual And Motor Skills, 1991. 73(1):63-6.

Levine et al., 1985

Levine DN, Warach J, Farah M:

„Two visual systems in mental imagery: dissociation of "what" and "where" in imagery disorders due to bilateral posterior cerebral lesions“

Neurology, 1985. 35(7):1010-8.

Levinson et al., 1978

Levinson DJ, Darrow CN:

„The seasons of a man's life“

Random House, Inc.. 1978.

Levinson, 1986

Levinson DJ:

„A Conception of Adult Development.“

American Psychologist, 1986. 41(1):3-13.

Levy et al., 2000

Levy R, Goldman-Rakic PS:

„Segregation of working memory functions within the dorsolateral prefrontal cortex“

Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale, 2000. 133(1):23-32.

Lezak et al., 2004

Lezak MD, Howieson DB, Loring DW, Hannay HJ, Fischer JS:

„Neuropsychological Assessment“

New York: Oxford University Press. 2004.

Liddle et al., 2001

Liddle PF, Kiehl KA, Smith AM:

„Event-related fMRI study of response inhibition“

Human Brain Mapping, 2001. 12(2):100-9.

Lindesay et al., 1989

Lindesay J, Briggs K, Murphy E:

„The Guy's/Age Concern survey. Prevalence rates of cognitive impairment, depression and anxiety in an urban elderly community“

The British Journal of Psychiatry : the Journal of Mental Science, 1989. 155:317-

29.

- Logan et al., 1984** *Logan GD, Cowan WB, Davis KA:*
„On the ability to inhibit simple and choice reaction time responses: a model and a method“
Journal of Experimental Psychology. Human Perception And Performance, 1984. 10(2):276-291.
- Logie, 1995** *Logie RH:*
„Visuo-spatial working memory“
Hove: Lawrence Erlbaum Associates. 1995.
- Logothetis et al., 2001** *Logothetis NK, Pauls J, Augath M, Trinath T, Oeltermann A:*
„Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal“
Nature, 2001. 412(6843):150-7.
- Luck et al., 1990** *Luck SJ, Heinze HJ, Mangun GR, Hillyard SA:*
„Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. II. Functional dissociation of P1 and N1 components“
Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1990. 75(6):528-542.
- Luria, 1966** *Luria AR:*
„Higher cortical functions in man“
Tavistock Publications, Andover, Hants. 1966.
- Lutzenberger et al., 1985**
Lutzenberger W, Elbert T, Rockstroh B, Birbaumer N:
„Das EEG: Psychophysiologie und Methodik von Spontan-EEG und ereigniskorrelierten Potentialen“
Berlin: Springer. 1985.
- MacLeod et al., 1988** *MacLeod CM, Dunbar K:*
„Training and Stroop-like interference: evidence for a continuum of automaticity“
Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, And Cognition, 1988. 14(1):126-135.
- Mathalon et al., 2003** *Mathalon DH, Whitfield SL, Ford JM:*
„Anatomy of an error: ERP and fMRI“
Biological Psychology, 2003. 64(1-2):119-41.
- Mayr, 2001** *Mayr U:*
„Age differences in the selection of mental sets: the role of inhibition, stimulus ambiguity, and response-set overlap“
Psychology And Aging, 2001. 16(1):96-109.

- McCulloch, 1951** *McCulloch WS:*
„**Why the mind is in the head**“
In: “Cerebral Mechanisms in Behavior”, Jeffress LA. New York: Wiley. 1951.
- McEvoy et al., 2001** *McEvoy LK, Pellouchoud E, Smith ME, Gevins A:*
„**Neurophysiological signals of working memory in normal aging**“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 2001. 11(3):363-76.
- Mecklinger et al., 1996** *Mecklinger A, Müller N:*
„**Dissociations in the processing of “what” and “where” information in working memory: An event-related potential analysis**“
J. Cognitive Neuroscience, 1996. 8(5):453-473.
- Melchers et al., 2000** *Melchers P, Lehmkuhl G:*
„**Neuropsychologische Diagnostik im Kindes- und Jugendalter**“
Zeitschrift Für Kinder- Und Jugendpsychiatrie Und Psychotherapie, 2000.
28(3):177-87.
- Menon et al., 2001** *Menon V, Adleman NE, White CD, Glover GH, Reiss AL:*
„**Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task**“
Human Brain Mapping, 2001. 12(3):131-143.
- Miller, 2000** *Miller EK:*
„**The neural basis of top-down control of visual attention in the pre- frontal cortex**“
In: “Control of cognitive processes: Attention and performance XVIII”, Monsell S, Driver J. Cambridge: The MIT Press. 2000.
- Milner, 1963** *Milner B:*
„**Effects of different brain lesions on card sorting: The role of the frontal lobes**“
Archives of Neurology, 1963. 9(1):90.
- Milner, 1964** *Milner B:*
„**Some effects of frontal lobectomy in man**“
In: “The frontal granular cortex and behavior”, Warren J, Akert K. New York: McGraw-Hill. 1964.
- Mirsky et al., 1991** *Mirsky AF, Anthony BJ, Duncan CC, Ahearn MB, Kellam SG:*
„**Analysis of the elements of attention: a neuropsychological approach**“
Neuropsychology Review, 1991. 2(2):109-45.
- Mishkin et al., 1983** *Mishkin M, Ungerleider LG, Macko KA:*
„**Object vision and spatial vision: Two cortical pathways**“
Trends in neurosciences, 1983. 6:414-417.

- Miyake et al., 1999 *Miyake A, Shah P:*
„**Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control**“
Cambridge University Press. 1999.
- Miyake et al., 2000 *Miyake A, Emerson MJ, Friedman NP:*
„**Assessment of executive functions in clinical settings: problems and recommendations**“
Seminars In Speech And Language, 2000. 21(2):169-83.
- Moher et al., 1994 *Moher D, Dulberg CS, Wells GA:*
„**Statistical power, sample size, and their reporting in randomized controlled trials**“
JAMA : the Journal of the American Medical Association, 1994. 272(2):122-4.
- Møller et al., 1988 *Møller AR, Jannetta PJ, Sekhar LN:*
„**Contributions from the auditory nerve to the brain-stem auditory evoked potentials (BAEPs): results of intracranial recording in man**“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1988. 71(3):198-211.
- Möller et al., 2005 *Möller HJ, Laux G, Kapfhammer HP:*
„**Psychiatrie und Psychotherapie: Mit 712 Tabellen**“
Springer. 2005.
- Monchi et al., 2001 *Monchi O, Petrides M, Petre V, Worsley K, Dagher A:*
„**Wisconsin Card Sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging**“
The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society For Neuroscience, 2001. 21(19):7733-41.
- Monsell et al., 2000 *Monsell S, Driver J:*
„**Control of cognitive processes: Attention and performance XVIII**“
Cambridge: The MIT Press. 2000.
- Mostofsky et al., 2003 *Mostofsky SH, Schafer JGB, Abrams MT, Goldberg MC, Flower AA, Boyce A, Courtney SM, Calhoun VD, Kraut MA, Denckla MB, Pekar JJ:*
„**fMRI evidence that the neural basis of response inhibition is task-dependent**“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 2003. 17(2):419-30.
- Mueller et al., 2008 *Mueller V, Brehmer Y, von Oertzen T, Li SC, Lindenberger U:*
„**Electrophysiological correlates of selective attention: a lifespan comparison**“
BMC Neuroscience, 2008. 9:18.
- Mulert et al., 2001 *Mulert C, Gallinat J, Pascual-Marqui R, Dorn H, Frick K, Schlattmann P,*

- Mientus S, Herrmann WM, Winterer G:*
„Reduced event-related current density in the anterior cingulate cortex in schizophrenia“
Neuroimage, 2001. 13(4):589-600.
- Mulert et al., 2003** *Mulert C, Gallinat J, Dorn H, Herrmann WM, Winterer G:*
„The relationship between reaction time, error rate and anterior cingulate cortex activity“
International Journal of Psychophysiology, 2003. 47(2):175-183.
- Mulert et al., 2004a** *Mulert C, Jäger L, Schmitt R, Bussfeld P, Pogarell O, Möller HJ, Juckel G, Hegerl U:*
„Integration of fMRI and simultaneous EEG: towards a comprehensive understanding of localization and time-course of brain activity in target detection“
NeuroImage, 2004. 22(1):83-94.
- Mulert et al., 2004b** *Mulert C, Pogarell O, Juckel G, Rujescu D, Giegling I, Rupp D, Mavrogiorgou P, Bussfeld P, Gallinat J, Möller HJ, Hegerl U:*
„The neural basis of the P300 potential. Focus on the time-course of the underlying cortical generators“
European Archives of Psychiatry And Clinical Neuroscience, 2004. 254(3):190-8.
- Mulert et al., 2005a** *Mulert C, Menzinger E, Leicht G, Pogarell O, Hegerl U:*
„Evidence for a close relationship between conscious effort and anterior cingulate cortex activity“
International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International Organization of Psychophysiology, 2005. 56(1):65-80.
- Mulert et al., 2005b** *Mulert C, Jäger L, Propp S, Karch S, Störmann S, Pogarell O, Möller HJ, Juckel G, Hegerl U:*
„Sound level dependence of the primary auditory cortex: Simultaneous measurement with 61-channel EEG and fMRI“
NeuroImage, 2005. 28(1):49-58.
- Mulert et al., 2007** *Mulert C, Leicht G, Pogarell O, Mergl R, Karch S, Juckel G, Möller HJ, Hegerl U:*
„Auditory cortex and anterior cingulate cortex sources of the early evoked gamma-band response: relationship to task difficulty and mental effort“
Neuropsychologia, 2007. 45(10):2294-306.
- Mulert et al., 2008** *Mulert C, Seifert C, Leicht G, Kirsch V, Ertl M, Karch S, Moosmann M, Lutz J, Möller HJ, Hegerl U, Pogarell O, Jäger L:*
„Single-trial coupling of EEG and fMRI reveals the involvement of early anterior cingulate cortex activation in effortful decision making“

- NeuroImage, 2008. 42(1):158-68.
- Mulert et al., 2010** *Mulert C, Leicht G, Hepp P, Kirsch V, Karch S, Pogarell O, Reiser M, Hegerl U, Jäger L, Moller HJ, McCarley RW:*
„Single-trial coupling of the gamma-band response and the corresponding BOLD signal“
NeuroImage, 2010. 49(3):2238-47.
- Müller et al., 2006** *Müller NG, Knight RT:*
„The functional neuroanatomy of working memory: contributions of human brain lesion studies“
Neuroscience, 2006. 139(1):51-8.
- Mullis et al., 1985** *Mullis RJ, Holcomb PJ, Diner BC, Dykman RA:*
„The effects of aging on the P3 component of the visual event-related potential“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1985. 62(2):141-9.
- Murji et al., 1998** *Murji S, DeLuca JW:*
„Preliminary Validity of the Cognitive Function Checklist: Prediction of Tower of London Performance“
The Clinical Neuropsychologist (Neuropsychology, Development and Cognition: Sec, 1998. 12(7):358-364.
- Na et al., 2000** *Na DG, Ryu JW, Byun HS, Choi DS, Lee EJ, Chung WI, Cho JM, Han BK:*
„Functional MR imaging of working memory in the human brain“
Korean Journal of Radiology : Official Journal of the Korean Radiological Society, 2000. 1(1):19-24.
- Näätänen, 1986** *Näätänen R:*
„A classification of N2 kinds of ERP components“
Cerebral psychophysiology: Studies in event related potentials, McCallum, Zappoli, Denoth (Eds.), Electroencephalography & Clinical Neurophysiology, Suppl, 1986. 38(169-172).
- Näätänen, 1990** *Näätänen R:*
„The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function“
Behavioral and Brain Sciences, 1990. 13(2):201-288.
- Nachev et al., 2005** *Nachev P, Rees G, Parton A, Kennard C, Husain M:*
„Volition and conflict in human medial frontal cortex“
Current Biology : CB, 2005. 15(2):122-8.
- Nieuwenhuis et al., 2003**

- Nieuwenhuis S, Yeung N, van den Wildenberg W, Ridderinkhof KR:*
„Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a go/no-go task: effects of response conflict and trial type frequency“
 Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience, 2003. 3(1):17-26.
- Norman et al., 1986** *Norman DA, Shallice T:*
„Attention to action: Willed and automatic control of behaviour“
 In: “Consciousness and Self Regulation”, Davidson RJ, Schwartz GE, Shappiro D. New York. Plenum. 1986.
- Norman et al., 1999** *Norman D, Shallice T:*
„Attention to action: Willed and automatic control of behaviour“
 In: “Cognitive Neuroscience”, Gazzaniga MS. Oxford: Blackwell. 1999.
- Oeser, 2002** *Oeser E:*
„Geschichte der Hirnforschung - von der Antike bis zur Gegenwart“
 Darmstadt: Primus Verlag/Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 2002.
- Ogawa et al., 1990** *Ogawa S, Lee TM, Nayak AS, Glynn P:*
„Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields“
 Magnetic Resonance In Medicine : Official Journal of the Society of Magnetic Resonance In Medicine / Society of Magnetic Resonance In Medicine, 1990. 14(1):68-78.
- Onofrj et al., 1990** *Onofrj MC, Ghilardi MF, Fulgente T, Nobilio D, Bazzano S, Ferracci F, Malatesta G:*
„Mapping of event-related potentials to auditory and visual odd-ball paradigms“
 Electroencephalography And Clinical Neurophysiology. Supplement, 1990. 41:183-201.
- Onofrj et al., 2001** *Onofrj M, Thomas A, Iacono D, D' Andrea Matteo G, Paci C:*
„Age-related changes of evoked potentials“
 Neurophysiologie Clinique = Clinical Neurophysiology, 2001. 31(2):83-103.
- Ouellet et al., 2004** *Ouellet MC, Beauchamp MH, Owen AM, Doyon J:*
„Acquiring a cognitive skill with a new repeating version of the Tower of London task“
 Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne De Psychologie Expérimentale, 2004. 58(4):272-88.
- Owen et al., 1990** *Owen AM, Downes JJ, Sahakian BJ, Polkey CE, Robbins TW:*
„Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man“

- Neuropsychologia, 1990. 28(10):1021-34.
- Owen et al., 1997 *Owen AM, Iddon JL, Hodges JR, Summers BA, Robbins TW:*
„Spatial and non-spatial working memory at different stages of Parkinson's disease“
Neuropsychologia, 1997. 35(4):519-32.
- Owen et al., 2000 *Owen AM, Schneider WX, Duncan J:*
„Executive control and the frontal lobe: Current issues“
Experimental Brain Research, 2000. 133(1):1-2.
- Pardo et al., 1990 *Pardo JV, Pardo PJ, Janer KW, Raichle ME:*
„The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm“
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1990. 87(1):256-259.
- Passingham, 1995 *Passingham RE:*
„The frontal lobes and voluntary action“
Oxford University Press, USA. 1995.
- Paulesu et al., 1993 *Paulesu E, Frith CD, Frackowiak RS:*
„The neural correlates of the verbal component of working memory“
Nature, 1993. 362(6418):342-5.
- Pekkonen et al., 1996 *Pekkonen E, Rinne T, Reinikainen K, Kujala T, Alho K, Näätänen R:*
„Aging effects on auditory processing: an event-related potential study“
Experimental Aging Research, 1996. 22(2):171-84.
- Pelosi et al., 1999 *Pelosi L, Blumhardt LD:*
„Effects of age on working memory: an event-related potential study“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 1999. 7(3):321-334.
- Petrides et al., 1982 *Petrides M, Milner B:*
„Deficits on subject-ordered tasks after frontal- and temporal-lobe lesions in man“
Neuropsychologia, 1982. 20(3):249-62.
- Petrides, 2000 *Petrides M:*
„Dissociable roles of mid-dorsolateral prefrontal and anterior inferotemporal cortex in visual working memory“
The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society For Neuroscience, 2000. 20(19):7496-503.
- Pfefferbaum et al., 1980 *Pfefferbaum A, Ford JM, Roth WT, Kopell BS:*

„Age-related changes in auditory event-related potentials“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1980. 49(3-4):266-76.

Pfefferbaum et al., 1984a

Pfefferbaum A, Ford JM, Wenegrat BG, Roth WT, Kopell BS:

„Clinical application of the P3 component of event-related potentials. I.

Normal aging“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1984. 59(2):85-103.

Pfefferbaum et al., 1984b

Pfefferbaum A, Wenegrat BG, Ford JM, Roth WT, Kopell BS:

„Clinical application of the P3 component of event-related potentials. II.

Dementia, depression and schizophrenia“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1984. 59(2):104-24.

Pfefferbaum et al., 1985 *Pfefferbaum A, Ford JM, Weller BJ, Kopell BS:*

„ERPs to response production and inhibition“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1985. 60(5):423-34.

Phillips et al., 1999

Phillips LH, Wynn V, Gilhooly KJ, Della Sala S, Logie RH:

„The role of memory in the Tower of London task“

Memory (Hove, England), 1999. 7(2):209-31.

Picton et al., 1974

Picton TW, Hillyard SA:

„Human auditory evoked potentials. II: Effects of attention“

Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1974. 36:191-200.

Picton et al., 1984

Picton TW, Stuss DT, Champagne SC, Nelson RF:

„The effects of age on human event-related potentials“

Psychophysiology, 1984. 21(3):312-25.

Picton, 1992

Picton TW:

„The P300 wave of the human event-related potential“

Journal of Clinical Neurophysiology : Official Publication of the American Electroencephalographic Society, 1992. 9(4):456-79.

Polich et al., 1985

Polich J, Howard L, Starr A:

„Effects of age on the P300 component of the event-related potential from auditory stimuli: peak definition, variation, and measurement“

Journal of Gerontology, 1985. 40(6):721-6.

Polich, 1986

Polich J:

„Normal variation of P300 from auditory stimuli“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1986. 65(3):236-40.

- Polich, 1991** *Polich J:*
„P300 in clinical applications: Meaning, method, and measurement.“
American Journal of EEG Technology, 1991.
- Polich, 1996** *Polich J:*
„Meta-analysis of P300 normative aging studies“
Psychophysiology, 1996. 33(4):334-53.
- Polich, 1998** *Polich J:*
„P300 clinical utility and control of variability“
Journal of Clinical Neurophysiology : Official Publication of the American Electroencephalographic Society, 1998. 15(1):14-33.
- Polich, 2004** *Polich J:*
„Clinical application of the P300 event-related brain potential“
Physical Medicine And Rehabilitation Clinics of North America, 2004.
15(1):133-61.
- Polich, 2007** *Polich J:*
„Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b“
Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2007. 118(10):2128-48.
- Pontifex et al., 2009** *Pontifex MB, Hillman CH, Polich J:*
„Age, physical fitness, and attention: P3a and P3b“
Psychophysiology, 2009. 46(2):379-87.
- Postle, 2006** *Postle BR:*
„Working memory as an emergent property of the mind and brain“
Neuroscience, 2006. 139(1):23-38.
- Pritchard et al., 1986** *Pritchard WS, Brandt ME, Shappell SA, O'Dell TJ, Barratt ES:*
„No decrement in visual P300 amplitude during extended performance of the oddball task“
The International Journal of Neuroscience, 1986. 29(3-4):199-204.
- Pritchard et al., 1991** *Pritchard WS, Shappell SA, Brandt ME:*
„Psychophysiology of N200/N400: A review and classification scheme“
In: “Advances in Psychophysiology (Vol. 4)”, Ackles PK, Jennings JR, Coles MGH. Greenwich, CT: JAI Press.. 1991.
- Pritchard, 1981** *Pritchard WS:*
„Psychophysiology of P300“
Psychological Bulletin, 1981. 89(3):506-40.

- Rapport et al., 2001 *Rapport LJ, Van Voorhis A, Tzelepis A, Friedman SR:*
„Executive functioning in adult attention-deficit hyperactivity disorder“
The Clinical Neuropsychologist, 2001. 15(4):479-491.
- Repovs et al., 2006 *Repovs G, Baddeley A:*
„The multi-component model of working memory: Explorations in
experimental cognitive psychology“
Neuroscience, 2006. 139(1):5-21.
- Ridderinkhof et al., 2004
Ridderinkhof KR, Ullsperger M, Crone EA, Nieuwenhuis S:
„The role of the medial frontal cortex in cognitive control“
Science (New York, N.Y.), 2004. 306(5695):443-7.
- Ritter et al., 1982 *Ritter W, Simson R, Vaughan Jr HG, Macht M:*
„Manipulation of event-related potential manifestations of information
processing stages“
Science (New York, N.Y.), 1982. 218(4575):909-11.
- Ritter et al., 1983 *Ritter W, Simson R, Vaughan Jr HG:*
„Event-related potential correlates of two stages of information processing in
physical and semantic discrimination tasks“
Psychophysiology, 1983. 20(2):168-79.
- Roberts et al., 1994 *Roberts LE, Rau H, Lutzenberger W, Birbaumer N:*
„Mapping P300 waves onto inhibition: Go/No-Go discrimination“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1994. 92(1):44-55.
- Roberts et al., 2003 *Roberts AC, Robbins TW, Weiskrantz L:*
„The prefrontal cortex: Executive and cognitive functions“
Oxford: Oxford University Press. 2003.
- Rogers et al., 2004 *Rogers MA, Kasai K, Koji M, Fukuda R, Iwanami A, Nakagome K, Fukuda M,
Kato N:*
„Executive and prefrontal dysfunction in unipolar depression: a review of
neuropsychological and imaging evidence“
Neuroscience Research, 2004. 50(1):1-11.
- Rosburg et al., 2005 *Rosburg T, Trautner P, Dietl T, Korzyukov OA, Boutros NN, Schaller C, Elger CE,
Kurthen M:*
„Subdural recordings of the mismatch negativity (MMN) in patients with focal
epilepsy“
Brain, 2005. 128(4):819.
- Rösler et al., 1986 *Rösler F, Sutton S, Johnson Jr R, Mulder G, Fabiani M, Gorsel EP, Roth WT:*

„Endogenous ERP components and cognitive constructs. A review.“
Electroencephalography and clinical neurophysiology. Supplement, 1986. 38:51.

Rösler, 1982

Rösler F:
„Hirnelektrische Korrelate kognitiver Prozesse“
Springer. 1982.

Rothbart et al., 2001

Rothbart MK, Posner MI:
„Mechanism and Variation in the Development of Attentional Networks“
In: “Handbook of developmental cognitive neuroscience” Cambridge: The MIT Press. 2001.

Rubia et al., 2001

Rubia K, Russell T, Bullmore ET, Soni W, Brammer MJ, Simmons A, Taylor E, Andrew C, Giampietro V, Sharma T:
„An fMRI study of reduced left prefrontal activation in schizophrenia during normal inhibitory function“
Schizophrenia Research, 2001. 52(1-2):47-55.

Rushworth et al., 2007

Rushworth MFS, Buckley MJ, Behrens TEJ, Walton ME, Bannerman DM:
„Functional organization of the medial frontal cortex“
Current Opinion In Neurobiology, 2007. 17(2):220-7.

Scheffers et al., 1996

Scheffers MK, Coles MG, Bernstein P, Gehring WJ, Donchin E:
„Event-related brain potentials and error-related processing: an analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli“
Psychophysiology, 1996. 33(1):42-53.

Schneider, 2006

Schneider F:
„Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie“
Springer. 2006.

Schnider, 2004

Schnider A:
„Verhaltensneurologie - Die neurologische Seite der Neuropsychologie“
Thieme, Stuttgart. 2004.

Schnirman et al., 1998

Schnirman GM, Welsh MC, Retzlaff PD:
„Development of the Tower of London-Revised“
Assessment, 1998. 5(4):355-60.

Schwenkmezger et al., 1992

Schwenkmezger P, Hodapp V, Spielberger CD:
„Das State-Trait-Ärgerausdrucks-Inventar (STAXI)“
Huber. 1992.

Shallice, 1982

Shallice T:

- „**Specific impairments of planning**“
Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1982. 298(1089):199-209.
- Shibata et al., 1997** *Shibata T, Shimoyama I, Ito T, Abba D, Iwasa H, Koseki K, Yamanouchi N, Sato T, Nakajima Y:*
„**The time course of interhemispheric EEG coherence during a GO/NO-GO task in humans**“
Neuroscience Letters, 1997. 233(2-3):117-120.
- Simon, 1975** *Simon HA:*
„**The functional equivalence of problem solving skills**“
Cognitive Psychology, 1975. 7(2):268-288.
- Smith et al., 1995** *Smith EE, Jonides J, Koeppe RA, Awh E, Schumacher EH, Minoshima S:*
„**Spatial versus object working memory: PET investigations**“
Journal of Cognitive Neuroscience, 1995. 7(3):337-356.
- Smith et al., 1999** *Smith EE, Jonides J:*
„**Storage and executive processes in the frontal lobes**“
Science (New York, N.Y.), 1999. 283(5408):1657.
- Snyder et al., 2005** *Snyder JS, Alain C:*
„**Age-related changes in neural activity associated with concurrent vowel segregation**“
Brain Research. Cognitive Brain Research, 2005. 24(3):492-9.
- Sokolov et al., 1975** *Sokolov EN, Vinogradova OS:*
„**Neuronal mechanisms of the orienting reflex**“
Halsted Press. 1975.
- Spear, 1993** *Spear PD:*
„**Neural bases of visual deficits during aging**“
Vision Research, 1993. 33(18):2589-609.
- Spirduso et al., 1978** *Spirduso WW, Clifford P:*
„**Replication of age and physical activity effects on reaction and movement time**“
Journal of Gerontology, 1978. 33(1):26-30.
- Squires et al., 1975** *Squires NK, Squires KC, Hillyard SA:*
„**Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man**“
Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1975. 38(4):387-401.

- Squires et al., 1977 *Squires KC, Donchin E, Herning RI, McCarthy G:*
„On the influence of task relevance and stimulus probability on event-related-potential components“
Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1977. 42(1):1-14.
- Starr et al., 1987 *Starr A, Barrett G:*
„Disordered auditory short-term memory in man and event-related potentials“
Brain : A Journal of Neurology, 1987. 110 (Pt 4):935-59.
- Stroop, 1935 *Stroop JR:*
„Studies of interference in serial verbal reactions“
Journal of Experimental Psychology: General, 1935. 18:643-662.
- Sutton et al., 1965 *Sutton S, Braren M, Zubin J, John ER:*
„Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty“
Science, 1965. 150(3700):1187.
- Syndulko et al., 1982 *Syndulko K, Hansch EC, Cohen SN, Pearce JW, Goldberg Z, Montan B, Tourtellotte WW, Potvin AR:*
„Long-latency event-related potentials in normal aging and dementia“
Advances In Neurology, 1982. 32:279-85.
- Tamm et al., 2004 *Tamm L, Menon V, Ringel J, Reiss AL:*
„Event-related fMRI evidence of frontotemporal involvement in aberrant response inhibition and task switching in attention-deficit/hyperactivity disorder“
Journal of the American Academy of Child And Adolescent Psychiatry, 2004. 43(11):1430-40.
- Tanibuchi et al., 2003 *Tanibuchi I, Goldman-Rakic PS:*
„Dissociation of spatial-, object-, and sound-coding neurons in the mediodorsal nucleus of the primate thalamus“
Journal of Neurophysiology, 2003. 89(2):1067-77.
- Tian et al., 2008 *Tian Y, Yao D:*
„A study on the neural mechanism of inhibition of return by the event-related potential in the Go/NoGo task“
Biological Psychology, 2008. 79(2):171-8.
- Tresch et al., 1993 *Tresch MC, Sinnamon HM, Seamon JG:*
„Double dissociation of spatial and object visual memory: evidence from selective interference in intact human subjects“
Neuropsychologia, 1993. 31(3):211-9.
- Tukey, 1977 *Tukey JW:*

- „Exploratory data analysis“
Addison-Wesley. 1977.
- Turken et al., 1999** *Turken AU, Swick D:*
„Response selection in the human anterior cingulate cortex“
Nature Neuroscience, 1999. 2(10):920-4.
- Ullsperger et al., 2001** *Ullsperger M, von Cramon DY:*
„Subprocesses of performance monitoring: a dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fMRI and ERPs“
NeuroImage, 2001. 14(6):1387-401.
- Ungerleider et al., 1994** *Ungerleider LG, Haxby JV:*
„'What' and 'where' in the human brain“
Current Opinion In Neurobiology, 1994. 4(2):157-65.
- Vallesi et al., 2009** *Vallesi A, Stuss DT, McIntosh AR, Picton TW:*
„Age-related differences in processing irrelevant information: evidence from event-related potentials“
Neuropsychologia, 2009. 47(2):577-86.
- Van Veen et al., 2002** *Van Veen V, Carter CS:*
„The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex“
Journal of Cognitive Neuroscience, 2002. 14(4):593-602.
- Verleger, 1988** *Verleger R:*
„Event-related potentials and cognition: A critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of P3“
Behavioral and Brain Sciences, 1988. 11(03):343-356.
- Vesco et al., 1993** *Vesco KK, Bone RC, Ryan JC, Polich J:*
„P300 in young and elderly subjects: auditory frequency and intensity effects“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1993. 88(4):302-8.
- Wager et al., 2003** *Wager TD, Smith EE:*
„Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis“
Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 2003. 3(4):255.
- Walton et al., 2004** *Walton ME, Devlin JT, Rushworth MFS:*
„Interactions between decision making and performance monitoring within prefrontal cortex“
Nature Neuroscience, 2004. 7(11):1259-65.
- Ward et al., 1997** *Ward G, Allport A:*
„Planning and Problem solving Using the Five disc Tower of London Task“

- The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1997. 50(30):49-78.
- Watanabe et al., 2002** *Watanabe J, Sugiura M, Sato K, Sato Y, Maeda Y, Matsue Y, Fukuda H, Kawashima R:*
„The human prefrontal and parietal association cortices are involved in NO-GO performances: an event-related fMRI study“
NeuroImage, 2002. 17(3):1207-16.
- Watanabe, 1986** *Watanabe M:*
„Prefrontal unit activity during delayed conditional Go/No-Go discrimination in the monkey. II. Relation to Go and No-Go responses“
Brain Research, 1986. 382(1):15-27.
- Weisz et al., 2006** *Weisz J, Czigler I:*
„Age and novelty: event-related brain potentials and autonomic activity“
Psychophysiology, 2006. 43(3):261-71.
- Welsh et al., 1995** *Welsh M, Cicerello A, Cuneo K, Brennan M:*
„Error and Temporal Patterns in Tower of Hanoi Performance: Cognitive Mechanisms and Individual Differences“
J Gen Psychol, 1995. 122(1):69-81.
- Weuve et al., 2004** *Weuve J, Kang JH, Manson JAE, Breteler MMB, Ware JH, Grodstein F:*
„Physical activity, including walking, and cognitive function in older women“
JAMA : the Journal of the American Medical Association, 2004. 292(12):1454-61.
- Woods, 1992** *Woods DL:*
„Auditory selective attention in middle-aged and elderly subjects: an event-related brain potential study“
Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1992. 84(5):456-68.
- World Medical Association, 2000**
World Medical Association:
„Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects.“
JAMA : the Journal of the American Medical Association, 2000. 284:3043-3045.
- Wright et al., 2003** *Wright I, Waterman M, Prescott H, Murdoch-Eaton D:*
„A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends“
Journal of Child Psychology And Psychiatry, And Allied Disciplines, 2003. 44(4):561-575.
- Yamaguchi et al., 1991** *Yamaguchi S, Knight RT:*

„Age effects on the P300 to novel somatosensory stimuli“

Electroencephalography And Clinical Neurophysiology, 1991. 78(4):297-301.

Yamashita et al., 1991 *Yamashita K, Kobayashi S, Koide H, Yamaguchi S:*

„[Effect of aging on P300 in normal subjects]“

Nō To Shinkei = Brain And Nerve, 1991. 43(10):945-50.

Zamrini et al., 2004 *Zamrini E, De Santi S, Tolar M:*

„Imaging is superior to cognitive testing for early diagnosis of Alzheimer's disease“

Neurobiology of Aging, 2004. 25(5):685-91.

Zschocke, 1995 *Zschocke S:*

„Klinische Elektroenzephalographie“

Berlin: Springer. 1995.

8. Anhang

8.1. Soziodemografischer Fragebogen

Klinikum der Universität München

Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und
Psychotherapie – Innenstadt
Abteilung für klinische Neurophysiologie und
Funktionelle Bildgebung

PD Dr. med. Oliver Pogarell

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

München, XX. XXXX 20XX

FRAGEBOGEN

Vp-Abkürzung: _____

Untersuchungsdatum: _____

Untersuchungsleiter: _____

Soziodemographische Daten

- Geburtsdatum: _____
- Geschlecht m w
- Muttersprache: _____
- Anzahl der Schul-, Ausbildungs- und Studienjahre: _____
- Höchster Schulabschluß:
 - Abitur / Fachabitur
 - Realschule / Mittlere Reife
 - Volks- / Hauptschule
 - Sonderschule
 - kein Schulabschluß
 - in der Schule: _____
- Berufsausbildung:
 - Hochschule / Fachhochschule
 - Meister / Fachschule
 - Lehre / Ausbildung
 - keine formale Berufsausbildung
 - in der Ausbildung
 - im Studium
- Berufsbezeichnung: _____
- Augenblickliche Tätigkeit: _____
- Berufsausbildung der Eltern:

Mutter:	Vater:
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hochschule / Fachhochschule
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Meister / Fachschule
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Lehre / Ausbildung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> keine formale Berufsausbildung
- Berufsbezeichnung der Mutter: _____
- Berufsbezeichnung des Vaters: _____



Medizinische Daten

- Hörbehinderungen / Hörgerät nein ja
- Frühere oder aktuelle neurologische Erkrankungen?
 - Schädel-Hirn-Traumata: nein ja Datum: _____
 - offen _____
 - gedeckt (commotio, contusio) _____
 - Mit Bewusstlosigkeit → Dauer [Min]: _____
 - Mit retrograder Gedächtnisstörung → Dauer [Std]: _____
 - Akute cerebrale Insulte: _____
 - Migräne mit neurol Symp. _____
 - Epilepsien: _____
 - Intracranielle Tumore: _____
 - Andere: _____
- Sonstige schwere / chronische körperliche Erkrankungen?

- Diagnostizierte Erkrankungen erstgradig Verwandter (Eltern, Geschwister, Kinder)
 - Psychiatrische
 - Schizophrenie: _____
 - Affektive Störung: _____
 - schwere depressive Episoden: _____
 - schwere manische Episoden: _____
 - Substanzmissbrauch / abhängigkeit: _____
 - Andere: _____
 - Neurologische: _____

Substanzgebrauch

- Aktuell eingenommene Medikamente (Art und Dosierung pro Tag)

Was ?	Tagesdosis	Seit [Datum]

- Tabak

	Was ?	Stück / Tag
Heute		
Letzte 7 Tage		

- Alkohol

	Was ?	An wie vielen Tagen ?	Trinkeinheiten / Tag
Heute			
Letzte 7 Tage			

- Sonstige Drogen während der letzten drei Monate: ja nein

Wenn ja:

	Was ?	Häufigkeit
Letzte 3 Monate		
Letzte 7 Tage		
Heute		

8.2. Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung (VAS)

Klinikum der Universität München
 Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und
 Psychotherapie – Innenstadt
 Abteilung für klinische Neurophysiologie und
 Funktionelle Bildgebung

PD Dr. med. Oliver Pogarell

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

München, XX. XXXX 20XX

Name: _____
 Vorname: _____

Datum: ____/____/____
 Studie: R/L Relevant

Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung

1. Der Versuch erscheint mir grundsätzlich als ...

— leicht schwierig
 (1) (2) (3) (4) (5)

2. Für mich persönlich war es heute ...

— nicht anstrengend sehr anstrengend
 (1) (2) (3) (4) (5)

3. Ich habe mir ...

— keine sehr viel
 (1) (2) (3) (4) (5)

Mühe gegeben schnell und korrekt zu reagieren.

4. In Bezug auf mein persönliches Leistungsvermögen schätze ich meine soeben erbrachte Leistung als ...

— sehr schlecht sehr gut
 (1) (2) (3) (4) (5)

ein.



9. Danksagung

„Keine Schuld ist dringender, als die, Dank zu sagen.“

Marcus Tullius Cicero (106-43 v. Chr.)

Wenn man –wie ich– an einer Dissertation –wie dieser– so lange arbeitet, dann haben zwangsläufig eine ganze Menge unterschiedlicher Personen ihren Teil daran –sowohl freiwillig als auch unfreiwillig– mitgetragen und werden mit aufrichtig gemeintem Dank in der Danksagung –wie in der vorliegenden– geehrt. Es erscheint unmöglich, mit einfachen Worten den Dank in eine angemessene Form zu bringen, die der Geduld, der Leidenschaft, der Beharrlichkeit, der Hilfestellung, der Anmut, der Unnachgiebigkeit, der Unterstützung, der Empathie, der Förderung, der Unterweisung sowie aller anderen Tätigkeiten und Eigenschaften der hier Genannten, die mich dem Ziel der Vollendung dieser Arbeit näher brachten, gerecht wird. Daher hoffe ich, dass jeder einzelne weiß, wie sehr ich es zu schätzen weiß, motiviert und unterstützt worden zu sein – von jedem auf seine ganz eigene Art und Weise.

Dafür: Vielen Dank!

Im Einzelnen gilt allen voran der Dank meinen Nächsten:

Meine **Frau** hat mit ihren lieben ermunternden und ermutigenden, gelegentlich aber auch strengen und aktivierenden Worten sowie einer nicht unerheblichen Prise Geduld und zahlreichen Momenten des vergebenen Wartens („Ich komme gleich, bin fast fertig“) einen erheblichen Beitrag zur Vollendung dieser Dissertation geleistet. Ihr Sonnenschein erhellt Tag auf Tag mein Leben und inspiriert mich dazu, nicht nur im Beruf sondern auch im Privaten ein besserer Mensch zu werden.

Mein **Sohn** vermochte es stets, mit seinem unschuldigen Lächeln binnen kürzester Augenblicke einen noch so schlechten Tag und eine noch so große Unzufriedenheit ob des Wieder-Nicht-Vorankommens vergessen zu machen und neue Kraft im verausgabenden Spiel mit ihm zu schöpfen [sic!]. Er ist nicht nur Quell sondern Füllhorn ewiger Freude.

Meine **Eltern** schließlich haben mein akademisches Treiben -nicht nur hinsichtlich dieses Œuvres- aufmerksam verfolgt und dabei hinsichtlich meiner Zielstrebigkeit und Ausdauer, die jedoch eher allem anderen galt, sehr viel Geduld und Verständnis aufbringen müssen. Dennoch waren sie immerzu bereit, davon noch mehr bereitzustellen. Ohne sie würde mir nicht nur der Abschluss dieser Dissertation fehlen.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch denjenigen, die diese Studie überhaupt erst ermöglicht haben und mich dabei begleitet haben:

Meinem Doktorvater **Prof. Dr. Christoph Mulert** bin ich für seine geduldigen und gelegentlich auch mehrstündigen Erklärungen und Antworten meiner Fragen sowie für seine stets herzliche und verständnisvolle Art mich zu begrüßen, wenn ich mich nach längerer Kontaktpause mit schlechtem Gewissen wieder meldete, zu tiefstem Dank verpflichtet. Die Kombination von Warmherzigkeit und profunder Fachkenntnis fand ich immer zutiefst beeindruckend, angenehm und inspirierend.

Meiner Betreuerin **Dr. Dipl.-Psych. Susanne Karch** habe ich nicht nur, aber im Besonderen für ihre geduldsamen Erläuterungen, stete Motivierung und Rekordzeit-Korrekturen zu danken. Ihre auf den Punkt gebrachten und ergebnis-orientierten Hinweise und Ratschläge haben erhebliches Momentum in die Fertigstellung dieser Arbeit gebracht. Und dann blieb immer noch ausreichend Zeit für nette und erfrischende Gespräche, wo sich nicht immer alles nur um Elektroden und Potenziale drehte.

PD Dr. Oliver Pogarell, dem Leiter der Abteilung „Neurophysiologie und Funktionelle Bildgebung“, gilt mein Dank für die Gelegenheit, in seiner Abteilung forschen zu dürfen, und den vielen ermunternden Worten, die er bei jeder unserer Begegnungen für mich fand.

Dr. Gregor Leicht gebührt in seiner Rolle als Wegbereiter und treibende Kraft dieser Studie mein tiefster Dank. Da ohne sie diese Studie niemals hätte umgesetzt werden können, gebührt auch den Mitarbeiterinnen der EEG-Abteilung (Frau Hantschk, Frau Fischer, Frau Beimler, Frau Dornheim, Frau Loeser, Frau Obermüller) ganz besonderer Dank.

Den Wegbereitern meiner beruflichen Karriere **PD Dr. Matthias Angstwurm**, **Prof. Dr. Martin Fischer** und **Prof. Dr. Martin Reincke** habe ich nicht nur mein berufliches Weiterkommen zu verdanken. Als Förderer und Mentoren haben sie wesentlich zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen.

Meinen Freunden **Philip Hepp**, **Michel Dang** und **Volker Regnery** gebührt der besondere Dank für die innige und lang anhaltende Freundschaft, die uns verbindet. Zusammen haben wir nicht nur das Studium mitsamt seinen Tücken bezwungen, sondern auch weit darüber hinaus in nur allen erdenklichen Lebenslagen unsere Freundschaft gestärkt.

In **Philip** hatte ich bereits im ersten Semester einen Wesensverwandten gefunden, der nicht nur die genussvollen Momente sondern auch die schwierigen Lebenslagen in sehr ähnlicher Weise sah und damit umzugehen wusste. Schnell fasste ich ein tiefes Vertrauen in Philip, das über die Jahre stets wuchs. Dass wir

gemeinsam den Sprung in die Doktorarbeit wagten und dabei die gleiche Arbeitsgruppe wählten und auch nahezu gleichzeitig fertig wurden ist nur eine winzige Anekdote im reichen Schatz an gemeinsamen Erfahrungen, die wir mittlerweile teilen.

Michel hat mit seiner ruhigen und differenzierten Art und seiner mittlerweile auch beruflich stark genutzten Fähigkeit, gut zuzuhören, auch sehr schnell mein Vertrauen gewonnen. Auch wenn wir von außen betrachtet recht unterschiedlich wirken, teilen wir bestimmte Vorlieben, die ich mich nicht scheue als eine spezielle Form der Wesensverwandtschaft zu bezeichnen und die uns über die Jahre immer näher gebracht hat

Mit Volker verbindet mich nicht nur die geografische Herkunft, sondern eine nochmal ganz andere Form der Wesensverwandtschaft, die sich wieder auf einer ganz anderen Ebene als bei Philip und Michel abspielt. Von der Anatomie- und Histologie-Vorlesung im ersten Semester, in der wir uns kennen lernten und sehr rasch zahlreiche Gemeinsamkeiten feststellten, bis heute haben wir diese zelebriert und kultiviert.

Für all diese unvergesslichen gemeinsamen Momente, die da waren und die da noch kommen werden, bin ich ihnen unendlich dankbar. Ich freue mich schon!

Den Mitdoktoranden **Dr. Tobias Thalmeier** und **Dr. Vlad Popescu** danke ich für ihre Unterstützung und Hilfestellung bei der Vollendung dieser Dissertation. Sie war mir von unschätzbarem Wert und hat die Vollendung dieser Arbeit in wesentlichem Maße beschleunigt.

Zuletzt möchte ich den zahlreichen **Probanden** danken, die sich für diese Studie zur Verfügung gestellt haben und mit viel Geduld, Motivation und Eifer das Experiment über sich haben ergehen lassen.

München im Mai 2012

10. Curriculum vitae

Persönliche Daten

Name: Sylvère Störmann
Geboren: 13.02.1981 in Köln
Familienstand: verheiratet, 1 Kind
Staatsangehörigkeit: deutsch & französisch

Ausbildung

Hochschulbildung

2008 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
2003 Ärztliche Vorprüfung
2001 - 2008 Studium der Humanmedizin an der Ludwig-Maximilians-Universität München

Schulbildung

1991 - 2000 Gymnasium Thusneldastraße, Köln
mit Abschluss „Allgemeine Hochschulreife“
1997 - 1998 Lorain Catholic High School, Lorain, Ohio, U.S.A.
1987 - 1991 Montessori-Grundschule Lustheider Straße, Köln

Berufliche Tätigkeiten

Ärztliche Tätigkeit

seit 2011 Assistenzarzt in der Medizinischen Klinik Innenstadt der LMU München
(Direktor: Prof. Dr. M. Reincke)
2008 - 2010 wissenschaftlicher Angestellter des LMU-Staatsexamens-Repetitorium und
McCuM-Mentor (Studiendekan: Prof. Dr. M. Reincke)

Studienbegleitende Tätigkeiten

ab 2006 Lektor für die Agentur für Öffentlichkeitsarbeit Karoline Becker, Bonn

- 2006 - 2008 Vorstandsmitglied der Bundesvertretung der Medizinstudierenden in Deutschland e.V. (bvmd), Referent für Öffentlichkeitsarbeit
- 2005 - 2007 Autorentätigkeit für Elsevier, Springer, Gondrom, Ärzteblatt studieren.de
- 2004 - 2005 wissenschaftliche Hilfskraft zur Systemadministration, Abteilung für Klinische Neurophysiologie, Prof. Dr. med. Ulrich Hegerl, Psychiatrische Klinik der LMU München
- 2003 - 2005 freier Redakteur für life+science (Wissenschaftsmagazin für Jugendliche)
- 2002 - 2006 Entwicklung von Datenbank-Anwendungen und Prozess-Analyse für die Arbeitsgruppe „Suizidforschung“ der Abteilung für Molekulare Neurobiologie, PD Dr. med. Dan Rujescu, Psychiatrische Klinik der LMU München
- 2001 - 2003 wissenschaftliche Hilfskraft zur Betreuung der anatomischen Schausammlung, Anatomische Anstalt der LMU München, Prof. Dr. med. Dr. h.c. Reinhard Putz
- 2003 - 2006 gewählter Sprecher der Studenten und Mitglied des Fachbereichsrats
- 2001 - 2008 Mitglied der Fachschaft Medizin der LMU München
- 2001 - 2004 [ab 2002 stellvertretender Chef-]Redakteur des dreisprachigen Online-Jugendmagazins „eunity“

Zivildienst

- 2000 - 2001 Zivildienst im Kuratorium für Dialyse und Nierentransplantation e.V., Köln

Mitgliedschaften

- seit 2008 Fördermitglied der Studiosi Candidatique Medicinae e.V. (SCQM)
- seit 2007 Mitglied des Deutschen Fachjournalisten-Verbands (DFJV)
- seit 2006 Mitglied der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung (GMA)

Wissenschaftliche Bei- und Vorträge

- ▶ *Mulert C, Jäger L, Propp S, Karch S, Störmann S, Pogarell O, Möller HJ, Juckel G, Hegerl U.*, „Sound level dependence of the primary auditory cortex: Simultaneous measurement with 61-channel EEG and fMRI“; *Neuroimage*. 2005 Oct 15;28(1):49-58. Epub 2005 Jul 11.

- ▶ *Johannink J (speaker), Hilgers J, Shiozawa T, Özgür O, Störmann S, Müller S, Scheble V, Wennekes V,* „Die Umsetzung der neuen Ärztlichen Approbationsordnung aus Sicht der Studierenden“; Vortrag Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2005. GMS-document-ID 05gma012.
- ▶ *Störmann S, Mulert C, Karch S, Propp S, Jäger L, Hepp P, Pogarell O, Hegerl U,* „Measuring reliability of loudness-dependent auditory evoked potentials connected to central serotonergic neurotransmission in functional MRI“; Poster session EEG & Clinical Neuroscience Society and International Society for Neuroimaging in Psychiatry 2nd joint meeting, 2005 Sep 09.
- ▶ *Berger M, Störmann S (speaker),* „Studierende informieren Studierende: Eine webbasierte, Fakultäts-spezifische Open-Source Bibliothek des Medizinischen Curriculums München (MeCuM)“; Vortrag Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2006. GMS-document-ID 06gma019.
- ▶ *Kulike K, Hilgers J, Störmann S, Hornung T, Dudziak J, Weinmann P, Johannink J,* „Kerncurriculum für die Medizinische Ausbildung in Deutschland: Ein Vorschlag der Medizinstudierenden Deutschlands“; GMS Z Med Ausbild 2006; 23(4):Doc58
- ▶ *Berger M, Störmann S (speaker), Fischer MR.,* „A student-driven wiki-library for educative materials: concept, implementation, and evaluation for the Medical Curriculum Munich“; Vortrag auf dem Meeting der Federation of European Physiological Societies in Bratislava. Abstract ST16-77.
- ▶ *Berger M, Störmann S, Fischer MR.,* „Eine studentische Wiki-Bibliothek für unterrichtsbegleitende Materialien: Konzeption, Implementierung und Evaluation für das Medizinische Curriculum München (MeCuM)“; GMS Z Med Ausbild 2007; 24(4):Doc185
- ▶ *Störmann S (speaker), von der Borch P (speaker), Dimitriadis K, Meinel F, Reincke M, Fischer MR,* „Mentoring relationships: An innovative approach to finding the perfect match“; Vortrag „Research in Medical Education – Chances and Challenges International Conference“, Heidelberg, Mai 2009.
- ▶ *Dimitriadis K (speaker), von der Borch P (speaker), Störmann S, Meinel F, Reincke M, Fischer MR,* „Mentoring medical students: A novel student-centered program yields promising evaluation results“; Vortrag „Research in Medical Education – Chances and Challenges International Conference“, Heidelberg, Mai 2009.

- ▶ *Dimitriadis K (speaker), von der Borch P (speaker), Störmann S, Meinel F, Bartl M, Moder S, Reincke M, Fischer MR*, „Die Doktorarbeitstage Medizin der Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) – ein neues Konzept für die Orientierung von Medizinstudenten zum Thema Promotion“; Vortrag Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2009. GMS-document-ID 09gma018.
- ▶ *Störmann S, von der Borch P, Dimitriadis K*, „Online matchmaking enables large-scale individual mentoring“; Medical Education. 2010 May;44(5):492-493. Epub 2010 Mar 30.
- ▶ *Kern AB, Störmann S, op den Winkel M, Chiapponi C, Gebhardt C, Bender J, Angstwurm MWA*, „LMU-StaR – Konzept und Umsetzung eines Staatsexamens- Repetitoriums an der LMU München - Struktur des Repetitoriums, Teilnehmerzahlen und Fazit nach einem Jahr“; Poster Medizinstudium 2.0, 27.04.2010, Universitätsklinikum Tübingen.
- ▶ *Störmann S (speaker), Chiapponi C, op den Winkel M, Wöck M, Bender J, Kern AB, Gebhardt C, Angstwurm MWA*, „Online-Vorbereitung auf das Staatsexamen - Konzept und erste Erfahrungen mit dem virtuellen Staatsexamens-Repetitorium der LMU München“; Vortrag Medizinstudium 2.0, 27.04.2010, Universitätsklinikum Tübingen.
- ▶ *von der Borch P, Störmann S, Dimitriadis K, Meinel F, Reincke M, Fischer MR*, „How to easily find a suitable mentor: Matchmaking online“; Poster AMEE Conference 2010, 08.09.2010, Glasgow.
- ▶ *Meinel F, Dimitriadis K, von der Borch P, Störmann S, Niedermaier S, Fischer MR*, „Formal mentoring programs for medical students in Germany – a cross-sectional study“; Poster AMEE Conference 2010, 08.09.2010, Glasgow.
- ▶ *op den Winkel M, Störmann S, Chiapponi C, Gebhardt C, Bender J, Kern A, Wöck M, Angstwurm MWA*, „Kontinuierliche Vorbereitung auf das Zweite Staatsexamen - Konzept und Erfahrungen nach Abschluss des Pilotjahres des longitudinalen, PJ-begleitenden Staatsexamens-Repetitoriums der LMU München (L-StaR)“; Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2010. GMS-document-ID 10gma1360.
- ▶ *Störmann S, Chiapponi C, op den Winkel M, Wöck M, Bender J, Kern A, Gebhardt C, Angstwurm MWA*, „Mit dem Internet zum Examen - Prüfungsvorbereitung mit dem virtuellen Staatsexamens-

- Repetitorium der LMU München“**; Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2010. GMS-document-ID 10gma1438.
- ▶ *Brand V, Störmann S, Hege I*, „**Digitale Lernkarten - von Studenten für Studenten“**; Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2010. GMS-document-ID 10gma2239.
 - ▶ *Loose P, Störmann S, Holzer M, op den Winkel M, Angstwurm MWA*, „**Körperliche Untersuchungstechniken - Was bleibt hängen, was geht verloren?**“; Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2010. GMS-document-ID 10gma1408.
 - ▶ *Störmann S (speaker), von der Borch P (speaker), Dimitriadis K, Meinel F, Reincke M, Fischer MR*, „**Die Mentoren-Maschine: Kann eine Formel haltbare Mentorenbeziehungen bahnen? - Eine Charakterisierung der online entstandenen Mentorenbeziehungen nach zwei Jahren MeCuM-Mentor“**; Vortrag Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2010. GMS-document-ID 10gma0738.
 - ▶ *Meinel F, von der Borch P (speaker), Dimitriadis K (speaker), Niedermaier S, Störmann S, Reincke M, Fischer MR*, „**Mentoring in Deutschland: ein Status quo**“; Vortrag Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2010. GMS-document-ID 10gma0738.
 - ▶ *von der Borch P, Dimitriadis K, Störmann S, Meinel FG, Moder S, Reincke M, Tekian A, Fischer MR*, „**A Novel Large-scale Mentoring Program for Medical Students based on a Quantitative and Qualitative Needs Analysis**“; GMS Z Med Ausbild 2011; 28(2):Doc26
 - ▶ *Meinel FG, Dimitriadis K, von der Borch P, Störmann S, Niedermaier S, Fischer MR*, „**More Mentoring Needed? A Cross-sectional Study of Mentoring Programs for Medical Students in Germany**“; BMC Medical Education. 2011;11:68. Epub 2011 Sep 24.
 - ▶ *Störmann S, Wöck M, Kern AB, Chiapponi C, op den Winkel M, Gebhardt C, Krug C, Bolzer M, Müller T, Angstwurm MWA*, „**Fallbearbeitung online oder offline? Leistungsunterschiede im Vergleich.**“; Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2011.
 - ▶ *Wöck M, Kern AB, Bolzer M, Störmann S, Müller T, Angstwurm MWA*, „**Evaluation des Kompaktkurses Gynäkologie und Pädiatrie im Rahmen des Staatsexamens-Repetitoriums der LMU**

München anhand einer Online Klausur“; Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2011. GMS-document-ID 11gma119.

- ▶ *Loose P, Störmann S, Angstwurm M*, „**Verbesserung der Qualität des Basic Life Support bei Studierenden im Praktischen Jahr“;** Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2011. GMS-document-ID 11gma136.
- ▶ *Brand V, Tiedt S, Kuhm C, Woidy M, Klingbeil J, Störmann S, Fischer MR*, „**MeCuMMemo, eine harmonische Symbiose: community-based-learning und moderne Lerntechnik für die neue Generation der Studierenden“;** Poster Jahrestagung der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung 2011. GMS-document-ID 11gma237.