

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

Direktor: Prof. Dr. med. P. Falkai

**Untersuchung von ereigniskorrelierten
Potentialen und Frequenzbändern bei
Verhaltenskontrollprozessen**

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

vorgelegt von
Sandra Schwarz
aus München

2016

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

Berichterstatter:	Prof. Dr. med. Oliver Pogarell
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. med. Andrea Szelényi
	Prof. Dr. med. Inga Katharina Koerte
Mitbetreuung durch die promovierte Mitarbeiterin:	PD Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Psych. Susanne Karch
Dekan:	Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel
Tag der mündlichen Prüfung:	15.12.2016

Inhaltsverzeichnis

A. EINLEITUNG	1
1 VERHALTENSKONTROLLPROZESSE.....	1
2 ELEKTROPHYSIOLOGISCHE METHODEN BEI VERHALTENSKONTROLLPROZESSEN	4
2.1 Elektroenzephalographie (EEG)	4
2.2 Ereigniskorrelierte Potentiale (ERPs)	6
2.3 Frequenzbandanalyse	7
2.4 Test-Retest-Reliabilität von neurophysiologischen Korrelaten und Inhibitionsparadigmen ...	10
3 INHIBITION VON VERHALTEN	11
3.1 Paradigmen bei Verhaltensinhibition.....	12
3.1.1 Go/NoGo-Paradigma	12
3.1.2 Stop-Signal-Aufgabe	13
3.1.3 Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Stop-Signal-Aufgaben und Go/NoGo-Paradigmen	14
3.2 Ereigniskorrelierte Potentiale bei Verhaltensinhibition	15
3.3 Anatomische Korrelate von Verhaltensinhibition.....	18
3.4 Frequenzbandanalyse bei der Inhibition von Verhalten	21
4 ENTSCHEIDUNGSPROZESSE.....	22
4.1 Paradigmen bei Entscheidungsprozessen	24
4.1.1 Libet Experiment	24
4.1.2 Entscheidungsaufgabe.....	25
4.2 Ereigniskorrelierte Potentiale bei Entscheidungsprozessen	25
4.3 Anatomische Korrelate von Entscheidungsprozessen	26
4.4 Frequenzbandanalyse bei Entscheidungsprozessen	27
5 BEEINTRÄCHTIGUNG EXEKUTIVER PROZESSE BEI PSYCHIATRISCHEN ERKRANKUNGEN.....	28
5.1 Schizophrenie	28

5.2	Aufmerksamkeitsdefizit-/ Hyperaktivitäts-Störung (ADHS)	29
6	FRAGESTELLUNGEN UND HYPOTHESEN	32
B.	METHODEN	33
1	STICHPROBE	33
2	FRAGEBÖGEN	34
2.1	Soziodemographischer Fragebogen.....	34
2.2	Beck Depressions Inventar (BDI)	34
2.3	NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI).....	35
2.4	Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung.....	35
2.5	Händigkeit.....	36
2.6	Die Barratt Impulsivitätsskala (BIS-11).....	37
2.7	State-Trait-Ärgerausdrucks-Inventar (STAXI)	37
2.8	Wortschatztest (WST).....	37
3	AUFGABENSTELLUNG	39
3.1	Paradigma	39
3.2	Teilexperimente	40
3.3	Messung der Reaktionszeiten	41
4	EEG-DATEN-AQUIRIERUNG UND -AUSWERTUNG	41
4.1	Durchführung.....	41
4.2	Aufzeichnung und Analyse der EEG-Daten	43
4.3	Auswertung ereigniskorrelierter Potentiale	43
4.4	Wavelet-Analyse	44
5	STATISTISCHE AUSWERTUNG	45
C.	ERGEBNISSE	46

1	ERGEBNISSE VERHALTENS DATEN	46
1.1	Ergebnisse neurophysiologischer Korrelate bei der Entscheidung Reaktion ja/nein	47
1.1.1	Ergebnisse Ereigniskorrelierte Potentiale bei der Entscheidung Reaktion ja/nein.....	47
1.1.1.1	N2 bei Der Entscheidung Reaktion ja/nein	47
1.1.1.2	P3 bei Der Entscheidung Reaktion ja/nein	47
1.1.2	Ergebnisse Frequenzbandanalyse bei der Entscheidung Reaktion ja/nein	49
1.1.2.1	Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein	49
1.1.2.2	Alphaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein	50
1.1.2.3	Betaband bei Entscheidung Reaktion ja/nein	52
1.1.2.4	Gammaband bei Entscheidung Reaktion ja/nein	53
1.2	Ergebnisse neurophysiologischer Korrelate bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	55
1.2.1	Ergebnisse Ereigniskorrelierte Potentiale bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	55
1.2.1.1	N2 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	55
1.2.1.2	P3 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	55
1.2.2	Ergebnisse der Frequenzbandanalyse bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	57
1.2.2.1	Thetaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	57
1.2.2.2	Alphaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	58
1.2.2.3	Betaband bei Entscheidung Reaktion rechts/links	60
1.2.2.4	Gammaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links	61
1.3	Ergebnisse der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links	63
1.3.1	Ergebnisse Ereigniskorrelierte Potentiale bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links.....	63
1.3.1.1	N2 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links	63
1.3.1.2	P3 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links	63
1.3.2	Ergebnisse der Frequenzbandanalyse bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links.....	64
1.3.2.1	Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links	64
1.3.2.2	Alphaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links	65
1.3.2.3	Betaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links	66
1.3.2.4	Gammaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links.....	67
2	ERGEBNISSE DER RETEST-RELIABILITÄT NEUROPHYSIOLOGISCHER KORRELATE	71
2.1	Ergebnisse der Retest-Reliabilität bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin.....	71
2.1.1	Ergebnisse der Retest-Reliabilität ereigniskorrelierter Potentiale bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin	71
2.1.1.1	Retest-Reliabilität von N2 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin	71
2.1.1.2	Retest-Reliabilität von P3 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin	72

2.1.2	Ergebnisse der Retest-Reliabilität von Frequenzbändern bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus 2. Termin	73
2.1.2.1	Retest-Reliabilität vom Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus 2. Termin	73
2.1.2.2	Retest-Reliabilität vom Alphaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus 2. Termin	74
2.1.2.3	Retest-Reliabilität vom Betaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus 2. Termin	75
2.1.2.4	Retest-Reliabilität vom Gammaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus 2. Termin	76
2.2	Ergebnisse der Retest-Reliabilität bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	77
2.2.1	Ergebnisse der Retest-Reliabilität ereigniskorrelierter Potentiale bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	77
2.2.1.1	Retest-Reliabilität von N2 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	77
2.2.1.2	Retest-Reliabilität von P3 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	78
2.2.2	Ergebnisse der Retest-Reliabilität von Frequenzbändern bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	79
2.2.2.1	Retest-Reliabilität vom Thetaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	79
2.2.2.2	Retest-Reliabilität vom Alphaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	80
2.2.2.3	Retest-Reliabilität vom Betaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	81
2.2.2.4	Retest-Reliabilität vom Gammaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin	82
D.	DISKUSSION	87
E.	ZUSAMMENFASSUNG	93
	LITERATURVERZEICHNIS	97
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	117
	TABELLENVERZEICHNIS	121
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	122
	DANKSAGUNG	125

A. Einleitung

1 Verhaltenskontrollprozesse

Jeden Tag muss man – egal ob im Berufsleben oder im privaten Umfeld – unzählige Entscheidungen treffen, Probleme lösen und Termine planen. Die Fähigkeiten, die man anwendet, um auf neue Situationen adäquat zu reagieren, werden als sogenannte „exekutive Funktionen“ bezeichnet (Leh et al., 2010). Exekutive Funktionen werden in der Regel bei der Gestaltung und Durchführung neuer Handlungspläne benötigt d.h. wenn Abfolgen von Reaktionen erzeugt und geplant werden müssen (Owen, 2004). Leh und Kollegen (2010) gehen davon aus, dass exekutive Funktionen oftmals eingesetzt werden um Situationen zu regeln, für die das Anwenden routinierter Verhaltensmuster nicht genügt und übergeordnete Kontrollmechanismen für die Modifikation des Verhaltens nötig sind (Leh et al., 2010). Ein kennzeichnendes Merkmal kognitiver Kontrolle ist die Fähigkeit, automatische oder unangemessene Reaktionen zu unterdrücken und Antwortkonflikte – hervorgerufen durch irrelevante oder störende Stimuli – zu lösen (Miller & Cohen, 2001).

Für die kognitive Kontrolle spielen u.a. folgende zwei Konzepte eine wichtige Rolle: Inhibition und Volition.

Bei der Inhibition handelt es sich um die Hemmung eines ablaufenden Antwortmusters um Beeinträchtigungen durch irrelevante Handlungen zu vermeiden (Aron, 2007; Barkley, 1997) und schädliche Ereignisse von vornherein abzuwehren. Barkley (1997) beschrieb drei zusammenhängende Prozesse, die bei der Antwortinhibition beteiligt sind:

Antwortinhibition besteht aus der Hemmung der anfänglich vorherrschenden Antwort auf ein Ereignis. Mit vorherrschender Antwort ist eine erlernte Reaktion gemeint, welche routiniert in einer bestimmten Situation ausgeführt wird. Bei der Inhibition kommt es zum Abbruch des gerade ablaufenden Antwortmusters. Damit dieser Handlungsabbruch gelingt, ist eine dritte Komponente, die sogenannte „Interventionskontrolle“ nötig. Diese sorgt dafür, dass die Verzögerungsperiode kurz vor bzw. während des Handlungsabbruchs von keinerlei konkurrierenden Ereignissen gestört wird (Barkley, 1997).

Der Grund für die Inhibition kann eine innere Motivation, eine Absicht sein, oder ein Stimulus aus der Umwelt, d.h. ein Signal, welches einen Handlungsabbruch ankündigt. Filevich und Kollegen (2012) verwenden für ersteres den Begriff der „intentional inhibition“, welcher sich auf die Fähigkeit, freiwillig eine Handlung zu unterbrechen oder zu hemmen, bezieht. Laut Definition ist der Prozess bzw. das Signal, welches die Handlung abbricht oder hemmt, nicht das Ergebnis eines externen Signals oder Anleitung, sondern wird im Inneren der Person selbst generiert (Filevich et al., 2012). In diesem Punkt unterscheidet sich intentional inhibition klar von klassischen psychologischen Paradigmen, bei denen externe Stop-Signale (Verbruggen & Logan, 2008) oder NoGo-Aufgaben (Pfefferbaum et al., 1985) verwendet werden, um Inhibition zu untersuchen. Der Ursprung der Unterschiede zwischen intern und extern getriggerten Handlungen wird kontrovers diskutiert. Während einige Autoren argumentieren, dass intern erzeugte Handlungen von Bewertung und Überwachung innerer Zustände abhängen (Passingham et al., 2010), so lehnen andere diese Ansicht ab und gehen stattdessen davon aus, dass die innere Motivation mit der Bewertung einer komplexen Umwelt in Zusammenhang steht (Nachev & Husain, 2010). Filevich et al. beschreiben beide Formen als zwei Extreme der Inhibition (Filevich et al., 2012).

Des Weiteren kann intentional inhibition zwar eine motorische Handlung hemmen, aber nicht den Grund für eine Handlung beseitigen z.B. kann man sich selbst vom Äußern seines Ärgers abhalten, aber das Bedürfnis, seinen Ärger sichtbar zu machen, wird nicht gehemmt. Intentional inhibition wird folglich auch als ein Kernprozess der Selbstkontrolle angesehen (Baumeister, 2007). Für das alltägliche Leben ist es von enormer Bedeutung, die Fähigkeit zu besitzen, eine vorherrschende Handlung nach ihrer initialen Vorbereitung zurückzuhalten und eine Handlung anzupassen oder abzubrechen, um flexibel und strategisch handeln zu können (Filevich et al., 2012).

Der Prozess, eigene Absichten zu entwickeln und zu verwirklichen, also einen eigenen Willen mit einem Handlungsziel zu besitzen, bildet die Grundlage für freies Handeln und wird zusammenfassend mit dem Begriff der „Volition“ beschrieben. Volition umfasst auch die Fähigkeit, freie Entscheidungen zu treffen, was als entscheidende menschliche Eigenschaft gilt (Walsh et al., 2010). Es ist weitreichend anerkannt, dass intentionale Handlungen innerlich erzeugt und mehr von individuellen Entscheidungen und Absichten bestimmt werden als von externen Reizen (Walsh et al., 2010).

Innerlich gelenkte und extern angeleitete Entscheidungen wurden von Filevich und Kollegen (2012) im Rahmen der Untersuchung neurophysiologischer Korrelate inhibitorischer Funktionen miteinander verglichen (Filevich & Haggard, 2012): Probanden erhielten eine elektrische Stimulation, welche ein juckendes Gefühl am

Handgelenk verursachte. Wenn die Hand zurückgezogen wurde, stoppte die Stimulation und somit das Jucken. In dem Paradigma gab es folgende Aufgabenvariationen: Bei den jeweiligen externen Anweisungen sollte die Hand bei Verspüren des Juckens entweder zurückgezogen werden (Go-Bedingung) oder – wider dem natürlichen Drang – das Wegziehen der Hand unterdrückt und somit dem Jucken standgehalten werden (NoGo-Bedingung). In einer anderen Bedingung konnten die Probanden frei entscheiden, ob die Hand zurückgezogen wird oder nicht. Ereigniskorrelierte Potentiale, generiert durch die juckenden Stimuli, waren in der NoGo-Bedingung (Unterdrückung der natürlichen Fluchtreaktion) bei freien Entscheidungsaufgaben größer als in angeleiteten Aufgaben (Filevich & Haggard, 2012). Der gegenteilige Effekt konnte in der Go-Bedingung festgestellt werden. Die Autoren vermuten, dass frei getroffene Entscheidungen zu verschiedenen Verarbeitungsprozessen von Reaktions- und Inhibitionsfolgen führen. Merkmale von Entscheidungsprozessen können womöglich anhand ihrer Konsequenzen bestimmt werden (Filevich & Haggard, 2012). Schon Fleming war der Meinung, dass innerlich erzeugte Entscheidungen für Reaktionen weniger definitiv und leichter zu ändern seien als extern gesteuerte Handlungen (Fleming et al., 2009). In Zusammenschau mit ihren Ergebnissen vermuteten Filevich und Kollegen, dass die Folgen freier Entscheidungen womöglich intensiver verarbeitet werden aufgrund von Gefühlen des Bedauerns, die verfehlte Möglichkeit nicht gewählt zu haben.

Brass und Haggard veranschaulichten in ihrem „what-when-whether“-Modell drei Hauptaspekte, die bei volitionalem Handeln involviert sind und für diese Arbeit eine entscheidende Rolle spielen:

Erstens muss festgelegt werden, *welche* Handlung für eine bestimmte Situation in Frage kommt und zweitens, *ob* diese Handlung überhaupt ausgeführt wird. Drittens muss berücksichtigt werden, *wann* diese Handlung zum Tragen kommt (Brass & Haggard, 2008). Innerhalb dieser Entscheidungsserie kann man wiederum zwischen „frühen“ Entscheidungen, die jegliche Handlungsvorbereitung verhindern, und „späten“ Entscheidungen differenzieren. Letztere umfassen die bewusste Entscheidung für einen Handlungsabbruch in einem Zustand, in dem die neuronale Vorbereitung bereits begonnen hat (Haggard, 2008).

Hier lässt sich auch die Verbindung zur Verantwortlichkeit für unser Verhalten knüpfen. Wenn man jederzeit entscheiden kann, ob eine Handlung abgebrochen wird oder nicht, ist man letztendlich auch verantwortlich für sein Verhalten (Dennett, 1984). Von der Neurowissenschaft wird der Drang, also die bewusste Absicht, zu handeln, als Folge *unbewusster* vorbereitender Hirnaktivität beschrieben. Auf die Handlungsabsicht folgt ein bestimmtes Verhalten. Man muss sich bewusst werden, dass Verhalten v.a. das

Ergebnis einer Kausalkette neuronaler Aktivität in prämotorischen und motorischen Arealen des Gehirns ist (Haggard, 2011).

Dass dieses komplexe neuronale System der kognitiven Kontrolle und seiner Teilaspekte mit seinen vielen aufeinander abgestimmten Einzelschritten auch stör anfällig ist, zeigen z.B. psychiatrische Erkrankungen wie die Schizophrenie oder die Aufmerksamkeits-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS). Patienten mit diesen Diagnosen weisen exekutive Dysfunktionen im Rahmen gestörter kognitiver Kontrollprozesse auf, welche das alltägliche Handeln stark beeinträchtigen können.

2 Elektrophysiologische Methoden bei Verhaltenskontrollprozessen

Um Verhaltenskontrollprozesse „messbar“ zu machen, wurden in den letzten 30 Jahren einige experimentelle Methoden entwickelt, um Inhibitions- und Volitionsprozesse unter kontrollierten Bedingungen auszulösen. Durch die Unterdrückung von Reaktionen oder das Auswählen von Entscheidungsalternativen werden u.a. ereigniskorrelierte Potentiale (event related potentials, ERPs) ausgelöst, welche im Rahmen von elektrophysiologischen Studien eruiert werden.

Im Folgenden seien nun wichtige Methoden genannt, die sich in der neurophysiologischen Kognitionsforschung bewährt haben.

2.1 Elektroenzephalographie (EEG)

Die Elektroenzephalographie ist eine diagnostische Methode, mit welcher die elektrische Aktivität des Gehirns anhand von Spannungsschwankungen über Ableitungen von der Kopfoberfläche erfasst werden kann. Bereits in den 20er Jahren entwickelte Hans Berger die Elektroenzephalographie beim Menschen (Berger, 1929). Das EEG setzt sich aus Feldpotentialen, die aus dem Umfeld von Nervenzellen, also extrazellulär, abgeleitet werden können, zusammen. Diese Feldpotentiale entstehen an anatomischen Strukturen durch lokal begrenzte Änderungen des Membranpotentials (z.B. erregende oder inhibitorische synaptische Potentiale). Zwischen den Stellen der Membranpotentialänderung kommt es zu Potentialgefällen, welche wiederum zu extrazellulären Ausgleichsströmen führen. Die extrazellulären Ströme erzeugen am Widerstand des Extrazellulärraums die Feldpotentiale (Deetjen, 2005). Die EEG-

Potentialschwankungen, die auf dem Skalp über Elektroden gemessen werden, repräsentieren somit eine Summe an kortikalen Potentialen, welche durch die synchrone Feuerung einer großen Ansammlung von Neuronen zu Stande kommt (Loo & Makeig, 2012). Zur Beschreibung des Signals sind sieben Hauptparameter nötig (Zschocke, 2012): Zum einen die Frequenz (1/s), zweitens die Amplitude (meist kleiner als 100 μ V) und drittens, die topographische Verteilung der Potentialmuster anhand der Elektrodenpositionen. Außerdem sind die Häufigkeit besonderer Potentialformen, die zeitliche Abfolge von Potentialschwankungen sowie die zeitliche Beziehung zwischen den Potentialschwankungen in Bezug zur Lokalisation entscheidend für die Beurteilung eines EEGs (Zschocke, 2012). Das EEG bietet eine exzellente zeitliche Auflösung (1–10 ms) aber eine relativ schlechte räumliche Auflösung. Zudem mischen sich zu den Skalp-EEG-Signalen "Nicht-Gehirn-Signale" z.B. durch Augenbewegungen und Skalmuskulatur, sodass eine Computeranalyse zur Trennung der kortikalen Gehirnsignale von Störsignalen erforderlich ist (Loo & Makeig, 2012).



Abbildung 1: Physiologisches Spontan-EEG eines Patienten im Alpha-Rhythmus

2.2 Ereigniskorrelierte Potentiale (ERPs)

Seit den späten 1950ern etablierte sich die Messmethode der ereigniskorrelierten Potentiale (Kotchoubey, 2006). Doch was sind eigentlich ereigniskorrelierte Potentiale?

Ereigniskorrelierte Potentiale, auch evozierte Potentiale genannt, sind im Gegensatz zur hirnelektrischen Spontanaktivität Potentialverschiebungen, die als zusätzliche EEG-Wellen vor, während, oder nach einem sensorischen, motorischen oder psychischen Ereignis, d.h. durch Reizung eines Sinneskanals, entstehen (Deetjen, 2005; Rösler, 1982). Die ereigniskorrelierten Potentiale werden aufgrund ihrer erheblich kleineren Amplitude (ca. 10 μV) oft vom spontanen EEG (bis zu 100 μV) verdeckt. Deshalb ist es empfehlenswert, EEG-Intervalle, d.h. bestimmte Zeitabschnitte, auf einen Mittelwert zu bringen, wenn diese mit einem Reiz synchronisiert sind. Durch diese Mittelung werden die ERPs, die mit konstanter Latenz und konstanter Form auf den Reiz folgen, größer und somit besser beurteilbar (Deetjen, 2005).

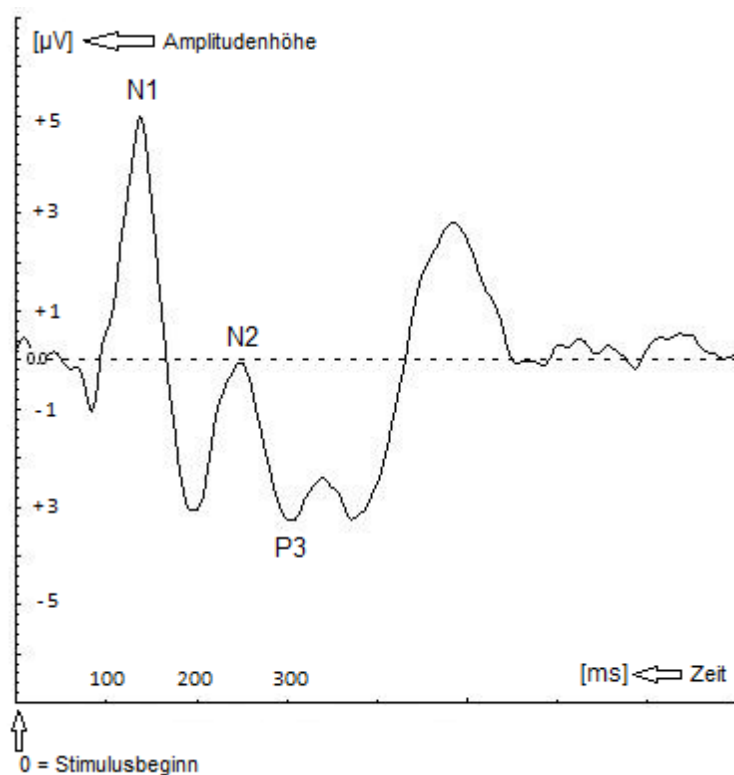


Abbildung 2: Schema der Komponenten N2 und P3 bei ereigniskorrelierten Potentialen

Die ereigniskorrelierten Potentiale reflektieren aber nicht nur die Wahrnehmung und Verarbeitung sensorischer Informationen sondern auch höhere kognitive Prozesse (Duncan, 2009). Zu diesen höheren kognitiven Prozessen werden auch

Verhaltenskontrollprozesse gezählt, welche sich hauptsächlich in den beiden ERP-Komponenten N2 und P3 widerspiegeln. Die N2 ist eine negative ERP-Welle mit einer frontozentralen Verteilung und einem Peak zwischen 200 und 300 ms nach Stimuluspräsentation. Es wird angenommen, dass die N2 unter anderem die Hemmung einer vorherrschenden Reaktion in NoGo-Aufgaben reflektiert (Lavric et al., 2004). Andere Autoren meinen, dass die N2 mit Konfliktverarbeitung in Zusammenhang steht (Donkers & van Boxtel, 2004; Nieuwenhuis et al., 2003).

Eine der am häufigsten untersuchten ERP-Komponenten, die P3, ist ein positives Potential, mit einem Peak um die 300 bis 600 ms nach einem sensorischen Stimulusbeginn (Bokura et al., 2001). Die P3 wird mit einer Menge an Aufmerksamkeitskomponenten, die auf den aufgabenrelevanten Stimulus gerichtet sind, assoziiert (Donchin, 1988). Die P3 spielt also eine große Rolle für diverse Aspekte von Zielverarbeitung, was von kortikalen Inhibitionsprozessen (Bruin & Wijers, 2002; Falkenstein et al., 1999; Kopp et al., 1996), über Wahrnehmungsbewertung bis zur Festlegung von Anfang und Ende reicht (Brandeis et al., 1998).

Die ERPs stellen eine sichere, nichtinvasive Untersuchungsmethode dar, weshalb sich diese als beliebtes Forschungsinstrument in der Forschung bewährt hat.

2.3 Frequenzbandanalyse

Das EEG präsentiert sich als wellenförmiges, rhythmisches Aktivitätsmuster (Spontan-EEG), welches man in verschiedene Frequenzbänder einteilen kann. Die Bestimmung der Frequenz erfolgt durch Auszählen der Wellenmaxima pro Sekunde. In dem von der Kopfoberfläche ableitbaren EEG lassen sich Potentialschwankungen bis ca. 30/s erfassen. Oberhalb 30/s schließt sich der Gamma-Frequenzbereich an (Zschocke, 2012), der zwar für das Routine-EEG keine, wohl aber für die Forschung und die aktuelle Studie eine Bedeutung besitzt. Die Oszillationen spiegeln auf Depolarisationsebene rhythmische Veränderungen von dendritischen und somatischen Membranpotentialen von Neuronenmassen. Es wird angenommen, dass oszillatorische Aktivität von inhibitorischen Zellen induziert wird und rhythmische Veränderungen zwischen Zeitabschnitten maximaler und minimaler Inhibition widergegeben werden (Wang, 2010).

Im Ruhe EEG sieht man beispielsweise bei gesunden, wachen Erwachsenen α -Wellen, wenn diese entspannt sind und die Augen geschlossen halten. Die Frequenz beträgt 8–13 Hz und man findet die größte Signalamplitude über okzipitalen Hirnregionen (Ebner,

2010). Wenn bei der EEG-Ableitung die Augen geöffnet werden, d.h. wenn eine visuelle Reizung erfolgt, dann kommt es zu einer sog. Alpha-Desynchronisation, auch Alpha-Block genannt, und es findet ein Wechsel in den β -Rhythmus statt. Dieser weist eine schnellere Oszillation von 14–30 Hz auf und ist gekennzeichnet durch kleinere Amplituden (Zschocke, 2012). Schläft der Proband, so verlangsamt sich das EEG auf ca. 4–7 Hz, was einem ϑ (Theta)-Rhythmus entspricht. Die Amplituden werden dafür wieder größer. Der langsamste Rhythmus wird im Tiefschlaf erreicht (δ -Wellen mit 1–4 Hz) (Nácher et al., 2013).

Der schnellste Rhythmus mit den niedrigsten Amplituden, auch γ -Band genannt, umfasst Frequenzen über 30 Hz und wurde in letzten Jahren aufgrund seiner Bedeutung für die Informationsverarbeitung im Gehirn, mit großem Interesse untersucht.

Analog zu ereigniskorrelierten Potentialen, gibt es auch ereigniskorrelierte EEG-Oszillationen in bestimmten Frequenzbereichen mit einem definierten zeitlichen Bezug zu einem sensorischen oder kognitiven Ereignis. In der Literatur finden sich hierfür unterschiedliche Begriffe wie event-related bandpower (ERBP) (Yamanaka & Yamamoto, 2010), event-related desynchronization (ERD), event-related synchronization (ERS) (Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999) sowie induced band-power (IBP) (Klimesch et al., 1998), die alle das gleiche elektrophysiologische Phänomen der ereigniskorelierten Oszillationen beschreiben.

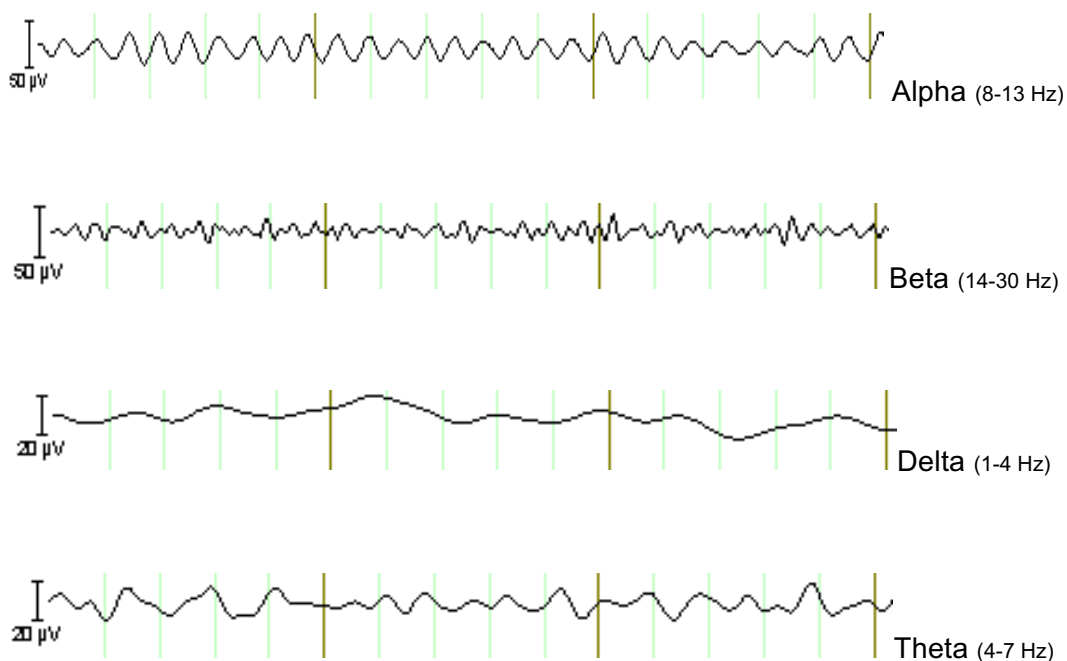


Abbildung 3: Einteilung und Bezeichnung der verschiedenen Frequenzbereiche eines EEGs (Alpha-, Beta-, Delta- und Thetaband)

Zur Beschreibung von Frequenzwerten gehören zwei Parameter, nämlich ein Amplituden- und ein Zeit- (= Phasen)-Wert. Einige Autoren beschreiben zwei Arten von Signalanteilen der ereigniskorrelierten Oszillationen: evozierte Signalanteile mit fester Phasen- und Latenzbeziehung sowie induzierte Signalanteile, die auf einen Stimulus variierende Phasen und Latenzen aufweisen (Galambos, 1992; Herrmann & Demiralp, 2005).

Da sowohl evozierte als auch induzierte Aktivitäten in der Regel kleinere Amplituden im Vergleich zum Spontan-EEG aufweisen, müssen für deren Darstellung die EEG-Messungen mit Darbietung desselben Sinnesreizes mehrmals wiederholt werden. Erst dann ist es möglich, eine digitale Mittelung der Signale durchzuführen und damit eine klare Darstellung evozierter Aktivitäten zu erzielen (Herrmann et al. 2004).

Die ereigniskorrelierten Oszillationen und ihre genaue Bedeutung für kognitive Informationsverarbeitung bei Verhaltenskontrollprozessen sind noch nicht ausreichend geklärt. In den letzten Jahren haben sich allerdings einige Autoren vermehrt mit dieser Thematik beschäftigt und neue Erkenntnisse gewonnen.

Alpha-Rhythmen werden hauptsächlich dem okzipitalen Kortex zugeordnet und somit mit visueller Wahrnehmung in Verbindung gebracht (Bengson et al., 2012). Die Feststellung, dass eine große Alpha-Band-Power Bezug zur okzipitalen N1 hat, bestätigt den soeben genannten topographischen Zusammenhang (Yamanaka & Yamamoto, 2010). Außerdem scheinen Alpha-Oszillationen eine entscheidende Rolle für das Arbeitsgedächtnis zu spielen (Basar, 2001; Oniz & Basar, 2009; Sauseng, 2008).

Im Gegensatz dazu präsentiert sich das Betaband, welches in somatosensorischen und motorischen kortikalen Regionen seinen Ursprung hat, als wichtige Komponente von Go-Antworten. Es scheint v.a. mit Bewegungsvorbereitung oder -unterdrückung in Zusammenhang zu stehen (Bengson et al., 2012).

Ein Aktivitätsanstieg im Thetaband-Bereich in frontalen Hirnregionen wird mit verschiedenen exekutiven Funktionen, wie selektiver Aufmerksamkeit, (Gevins et al., 1997; Ishii et al., 1999), Fehlerverarbeitung (Cavanagh et al., 2009; Cohen, 2011; Luu & Tucker, 2001; Trujillo & Allen, 2007) und Gedächtnisprozessen (Klimesch et al., 2001; Scheeringa et al., 2009) in Zusammenhang gebracht. Dass Thetaoszillationen möglicherweise zur Kommunikation zwischen verschiedenen Hirnregionen beitragen und mit anderen Frequenzbereichen verbunden sind, wurde in der Arbeit von Lisman und Kollegen (1995) bekräftigt, welche eine phasische Kopplung zwischen frontalen Theta- und posterioren Gammaoszillationen vermuten. Dahinter verstecken sich

möglicherweise Mechanismen, die für Arbeitsgedächtnisprozesse relevant sind (Lisman & Idiart, 1995).

Gammaoszillationen stehen ebenfalls mit Informationsverarbeitung, z.B. verbaler (Pulvermuller, 1996) und visueller Verarbeitung (Martinovic & Busch, 2011), in Zusammenhang (Bressler, 1990). Dennoch scheint es sinnvoll zu sein, "das Gammaband" nicht als eine große Einheit mit vielen Funktionen anzusehen, sondern eine Unterteilung in hohe und niedrige Frequenzen vorzunehmen, da diese wahrscheinlich unterschiedliche funktionale Rollen erfüllen (Tallon-Baudry et al., 1996).

Deltaoszillationen werden mit Zuständen unbewusster Prozesse assoziiert (Nácher et al. 2013). Nácher und Kollegen (2013) fanden heraus, dass Deltaoszillationen eine verknüpfende Funktion zwischen parietalem und frontalem Kortex während Entscheidungen erfüllen (Nácher et al. 2013).

2.4 Test-Retest-Reliabilität von neurophysiologischen Korrelaten und Inhibitionsparadigmen

Reliabilität ist ein psychometrisches Schlüsselkriterium für jeglichen psychologischen Test (Wostmann et al., 2013). Sie beschreibt die zeitliche Stabilität eines Tests, d.h. wie gut sich die Messergebnisse bei dem gleichen Probanden und dem gleichen Test bei mehrfachen Messungen decken (Wostmann et al., 2013). Der Verwendung ereigniskorrelierter Potentiale als Messinstrument für klinische Studien steht man mit wachsendem Optimismus gegenüber (Dockree & Robertson, 2011; Duncan, 2009; Folmer et al., 2011). Dennoch müssen ERPs auf individuellem Niveau valide und reliabel sein (Brunner et al., 2013b). Die Test-Retest-Reliabilität von ERPs ist von vielen Faktoren abhängig u.a. von Messfehlern und Fluktuationen hinsichtlich des Zustands des Probanden (Segalowitz & Barnes, 1993). Die Messfehler sind teilweise abhängig von der Methode, wie Latenzen und Amplituden von ERPs gemessen werden. Die am meisten angewandte Methode ist die, die ERP-Amplituden und -Latenzen anhand ihrer Maxima oder Minima misst (Spitzenwert-Messung). Auch in der aktuellen Studie wird dieses Messverfahren benutzt.

Die Studie von Hong und Kollegen (2013) zeigte, dass die P3-Latenz eine höhere Reliabilität aufweist als die P3-Amplitude wobei beide Komponenten der P3 als reliable Messinstrumente angesehen werden (Hong et al., 2013). Der N2-Amplitude konnte anhand einer Eriksen Flanker Aufgabe ebenfalls eine Test-Retest-Stabilität zugesprochen werden (Clayson et al., 2013). Brunner und Kollegen konnten in ihrer

Langzeitstudie anhand von visuellen Go/NoGo-Versuchen an gesunden Probanden zeigen, dass die P3-Welle große stabile neurophysiologische Indizes kognitiver Kontrolle aufweist. Die Latenz der P3-NoGo-Welle erreichte einen für die klinische Anwendbarkeit akzeptablen Wertebereich (Brunner et al., 2013b).

Die Studie von Wostmann und Kollegen (2013) untersuchte u.a. die interne Reliabilität und zeitliche Stabilität verschiedener Paradigmen, die zur Untersuchung von Inhibitionsprozessen eingesetzt werden. Stop-Signal-, Go/NoGo-, Antisakkaden-, Simon-, Eriksen Flanker-, Stroop- und Continuous Performance-Aufgaben wurden 23 gesunden Probanden zweimal über eine Zeit von 11 Wochen gestellt (Wostmann et al., 2013): Die meisten dieser Paradigmen zeigten gute Test-Retest-Reliabilität und interne Beständigkeit mit Ausnahme der Stop-Signal-Reaktionszeitmessung, die eine schlechte Reliabilität aufwies. Es wurden überwiegend stabile Ergebnisse innerhalb einer Testabschnitts für die meisten Messungen beobachtet (Wostmann et al., 2013).

Soreni und Kollegen (2009) untersuchten die Test-Retest-Reliabilität der Stop-Signal-Aufgabe anhand von 12 Kindern mit ADHS. Jeder Proband absolvierte drei morgendliche Messungen im Abstand von zwei 7-Tages-Intervallen. Bei der Stop-Signal-Aufgabe konnten reliable Messergebnisse bei Kindern mit ADHS erzielt werden, was die Verwendung dieses Paradigmas in ADHS-Studien sinnvoll erscheinen lässt (Soreni et al., 2009).

3 Inhibition von Verhalten

Inhibition von Verhalten stellt – neben der Volition – einen wichtigen Teilprozess kognitiver Kontrolle dar und wurde von Nigg als „the deliberate control of a primary motor response in compliance with changing context cues“ beschrieben (Nigg, 2000).

Mostofski und Simmonds (2008) schlugen vor, dass die Inhibition von Reaktion eine Art Antwortauswahl, einfacher gesagt, eine Entscheidung, sei. Die Hemmung einer Antwort sei sozusagen die Entscheidung für eine bewusst beabsichtigte Reaktion mit einer fehlenden Bewegung. Für das alltägliche Leben spielt Verhaltensinhibition eine entscheidende Rolle: Das Anhalten bei roten Verkehrsampeln, das Widerstehen von Versuchungen sowie das Anstehen in einer Warteschlange sind nur wenige Beispiele für die Notwendigkeit inhibitorischer Kontrolle (Mostofsky & Simmonds, 2008).

Die meisten experimentellen Studien über Inhibitionsprozesse kommen von der Untersuchung der Verarbeitungsmechanismen externer Stop-Signale. Dennoch ist ein

anderer wichtiger Aspekt der Inhibition die Willenskraft, z.B. mutwillige inhibitorische Kontrolle über eigene Handlungen, ohne externe widerrufende Signale (Filevich et al., 2012). Filevich und Kollegen zeigen, dass das menschliche Gehirn einen „neuronalen Bremsmechanismus“ beinhaltet, der spezifisch laufende motorische Aktivitäten hemmt, und dass dieser eine Schlüsselrolle in Handlungsentscheidungen spielt.

Inhibitionsmechanismen werden u.a. mit Go/NoGo-Paradigmen und Stop-Signal-Aufgaben provoziert. Es ist allerdings zu beachten, dass immer noch Unklarheit herrscht, inwieweit diese zwei Aufgaben identische neuronale Systeme beteiligen. Dies soll nun nicht Hauptgegenstand dieses Kapitels sein, doch bei der Beurteilung folgender Ergebnisse sind mögliche Aktivierungsunterschiede durchaus von Bedeutung.

3.1 Paradigmen bei Verhaltensinhibition

3.1.1 Go/NoGo-Paradigma

Das Go/NoGo-Paradigma stellt eine wichtige experimentelle Methode zur Untersuchung motorischer Reaktionsinhibition dar (Meere, 1995). Das Go/NoGo-Paradigma beinhaltet zwei Bedingungen: Im Rahmen der ersten Bedingung müssen Probanden auf einen vorgegebenen akustischen oder visuellen Signalstimulus (z.B. einen Ton oder einen Buchstaben) reagieren (Go-Bedingung). Die Reaktion bezeichnet in der Regel eine definierte motorische Handlung wie z.B. einen Tastendruck. In einer zweiten Bedingung, d.h. sobald ein anderer akustischer oder visueller Stimulus präsentiert wird, muss die Antwort zurückgehalten werden (NoGo-Bedingung). Menon und Kollegen (2001) präsentierten z.B. in ihrer Studie den Probanden eine Reihe an Buchstaben, auf welchen jeweils ein Tastendruck erfolgen musste (Go-Bedingung). Nur bei dem Buchstaben „X“, welcher als NoGo-Signal fungierte, musste der Tastendruck zurückgehalten werden (Menon et al., 2001). Kritisch ist bei dem Go/NoGo-Paradigma zu betrachten, dass bei erfolgreichen NoGo-Versuchen die Reaktion komplett ausgelassen statt zurückgehalten wird. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Inhibition von Reaktionen möglicherweise mit selektiver Aufmerksamkeit (die benötigt wird um zwischen Go- und NoGo-Stimuli zu unterscheiden) verwechselt wird (Rubia et al., 2003). Ein wohl unverfälschterer Test von Reaktionshemmung scheint die Stop-Signal-Aufgabe zu sein (Logan, 1984).

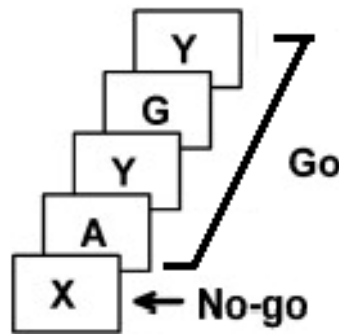


Abbildung 4: Visuelles Go/NoGo-Paradigma: Sämtliche Buchstaben fungieren als Go-Signal, außer der Buchstabe „X“, der als NoGo-Stimulus das Zurückhalten einer Reaktion verlangt (modifiziert nach Chambers, 2009, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©).

3.1.2 Stop-Signal-Aufgabe

Neben der Go/NoGo-Aufgabe ist die Stop-Signal-Aufgabe eine beliebte Untersuchungsmethode in der Inhibitionsforschung. Dabei wird immer dann reagiert, wenn kein akustisches oder visuelles Stop-Signal (z.B. ein Ton mit unterschiedlicher Frequenz oder ein anderer Buchstabe) dargeboten wird, welches darauf hinweist, dass die Antwort zurückgehalten werden muss (De Jong et al., 1990). Dabei werden individuelle Go-Versuche gelegentlich durch ein Stop-Signal unterbrochen (Dillon & Pizzagalli, 2007). Das Intervall zwischen Go- und Stop-Stimulus kann verändert werden (Verbruggen & Logan, 2008). Wenn diese Zeitspanne kurz ist, ist es leichter, eine Reaktion zu stoppen, wenn diese lang ist, umso schwieriger. Daraus kann unter Berücksichtigung von Stop-Erfolgen und -Fehlern sowie der Reaktionszeit bei Go-Bedingungen die sog. Stop-Signal-Reaktionszeit berechnet werden (Logan, 1984). Die Stop-Signal-Reaktionszeit kann als Maß für inhibitorische Kontrolle angesehen werden. Es wird angenommen, dass Stop-Signal-Experimente ein höheres Inhibitionslevel aufweisen als NoGo-Versuche da bereits der Impuls zur Ausführung einer motorische Reaktion in Stop-Aufgaben gegeben ist, ehe eine gegensätzliche Anweisung auftritt (Johnstone et al., 2007). Inhibitorische Schwierigkeiten können durch die Modulation des Intervalls zwischen Präsentation der Go- und Stop-Stimuli auftreten. Wenn man dieses Intervall analysiert, dann kann man die Latenz des inhibitorischen Prozesses, die Stop-Signal-Reaktionszeit, berechnen (Logan, 1984). Kürzere Stop-Signal-Reaktionszeiten sind mit effizienterer Inhibition assoziiert.

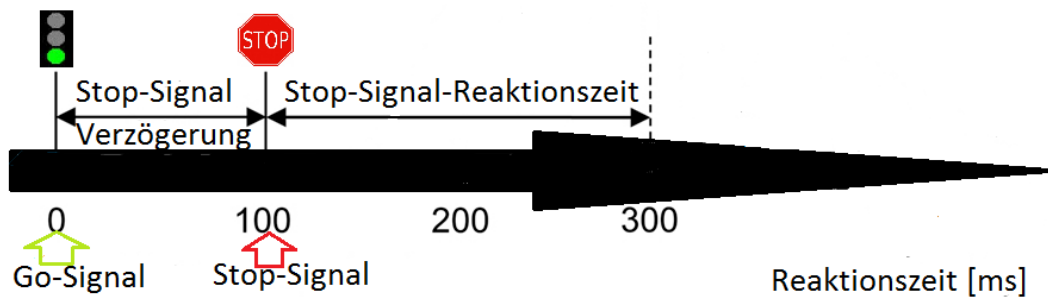


Abbildung 5: Stop-Signal-Aufgabe: Auf ein Go-Signal folgt gelegentlich ein Stop-Signal. Die Stop-Signal-Reaktionszeit dient als Maß für die inhibitorische Kontrolle

3.1.3 Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Stop-Signal-Aufgaben und Go/NoGo-Paradigmen

Bei beiden Paradigmen müssen Probanden auf einen Stimulus reagieren und auf einen anderen die Reaktion zurückhalten. Stop-Signal-Aufgaben unterscheiden sich von Go/NoGo-Aufgaben anhand der Stimuli-Anzahl innerhalb eines Einzelversuchs: Beim Go/NoGo-Paradigma wird nur ein Stimulus in jedem Versuch dargeboten, entweder das Go- oder das NoGo-Signal. Im Gegensatz dazu wird in einem Stop-Versuch das Stop-Signal immer nach einem Go-Signal präsentiert. Beide Paradigmen verlangen eine aktive Unterdrückung motorischer Reaktionen (Enriquez-Geppert et al., 2010). Unterschiede entstehen sowohl bei dem Inhibitionsgrad, der benötigt wird, die beabsichtigte Bewegung zu unterdrücken (Johnstone et al., 2007; Rubia et al., 2001) als auch bei der Lokalisation involvierter neuronaler Netzwerke: Auch wenn Go/NoGo- und Stop-Signal-Paradigma oft als auswechselbar angesehen werden, so ist unklar, ob sie dieselben kognitiven Prozesse und neuronalen Netzwerke abgreifen (Aron et al., 2004; Lenartowicz, 2010). Aus diesem Grund verglichen in letzter Zeit viele Arbeitsgruppen beide Paradigmen miteinander. Swick und Kollegen (2011) konnten in ihrer Metaanalyse feststellen, dass Stop-Signal-Aufgaben das cingulo-operculare Netzwerk mit verstärkten Aktivierungen in der linken anterioren Insel und bilateralen Thalamus in größerem Ausmaß involvieren als Go/NoGo-Aufgaben (Swick et al., 2011).

Das cingulo-operculare Netzwerk (CON) wird von Tu und Kollegen (2012) als ein neu definiertes Kontrollnetzwerk beschrieben, welches verantwortlich ist für verschiedene kognitive Prozesse, die einheitlich bei Patienten mit Schizophrenie beeinträchtigt sind. Das CON umfasst folgende anatomische Strukturen: das dorsale anteriore Cingulum

(dACC), den bilateralen anterioren Präfrontalkortex, den inferioren Parietalkortex und die anteriore Inselrinde, das Putamen, den Thalamus und das Kleinhirn (Tu et al., 2012).

Go/NoGo-Aufgaben waren in der Studie von Swick und Kollegen (2011) deutlicher mit Aktivierungen im fronto-parietalem Kontrollnetzwerk mit ausgeprägten Foci im rechten Gyrus frontalis medius und rechten Lobus parietalis inferior assoziiert. Die Autoren folgerten daraus, dass Stop-Signal- und Go/NoGo-Aufgaben nicht komplett identische Messinstrumente von Reaktionsinhibition darstellen, da sie zwar überlappende, aber dennoch unterschiedliche neuronale Schaltkreise beteiligen (Swick et al., 2011).

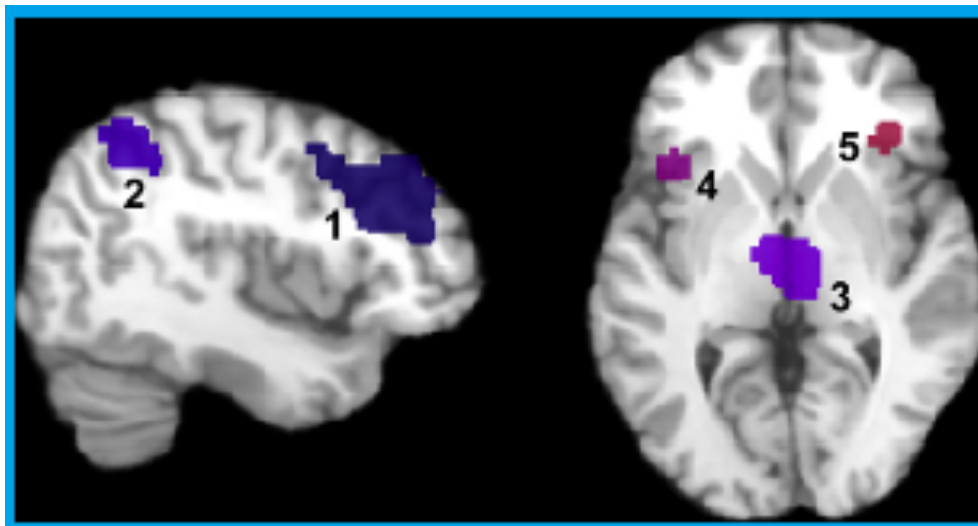


Abbildung 6: Regionen maximaler Unterschiede zwischen Go/NoGo-Paradigma (GNG) und Stop-Signal-Aufgabe (SST) durch die Subtraktion GNG minus SST: Das GNG zeigt stärkere Aktivierungen als die SST im frontoparietalen Netzwerk: Areal 1 (rechter Gyrus frontalis medius) und Areal 2 (rechter Lobus parietalis inferior) sowie Areal 5 (BA 47, rechter Gyrus frontalis inferior). Die SST zeigt stärkere Aktivierungen als das GNG im cingulo-opercularen Netzwerk: Areal 3 (Thalamus) und Areal 4 (linke anteriore Insel) (Swick et al., 2011, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©)

3.2 Ereigniskorrelierte Potentiale bei Verhaltensinhibition

Die Inhibition von Verhalten steht vor allem mit zwei Komponenten in Zusammenhang: Die erste Komponente, die N2, tritt zum Beispiel bei Go/NoGo-Aufgaben auf und beschreibt ein negatives Potential zwischen 200 und 300 ms (Eimer, 1993; Jodo & Kayama, 1992). Die vorangehenden Abschnitte behandelten bereits die N2 und ihre Beteiligung an Konfliktentstehung (Donkers & van Boxtel, 2004; Nieuwenhuis et al., 2003), Aufmerksamkeit oder Stimulusbewertung. Falkenstein und Kollegen (1999) berichten, dass die NoGo-N2 kleiner und später bei Probanden mit hohen Fehlerraten

auftritt, im Vergleich zu Probanden, die niedrige Fehlerraten aufweisen konnten. Die Autoren vermuten auch, dass die N2-Komponente ein Korrelat eines modalitätsspezifischen, nicht-motorischen Inhibitionsprozesses ist, da die Frontallappen-N2 mit Art des Stimulus variiert (Falkenstein et al., 1999). Geczy und Kollegen (1999) gingen davon aus, dass auf Go-Signale größere N2-Amplituden bei NoGo-Stimuli folgen, da dabei womöglich größerer Aufwand betrieben werden muss, um das Inhibitionssystem zu aktivieren und Vorbereitungen für die Ausführung von Reaktionen zu unterbrechen (Geczy et al., 1999).

Die zweite ERP-Komponente ist die P3. Deren Existenz wird u.a. mit inhibitorischen Abläufen assoziiert (Bekker et al., 2005a; Dimoska et al., 2006; Kok, 1986; Kok et al., 2004; Ramautar et al., 2004; Smith et al., 2006, 2007; van Boxtel et al., 2001). Die frontale P3-Amplitude ist größer bei NoGo- als bei Go-Aufgaben (Eimer, 1993; Kopp et al., 1996). Es ist bekannt, dass sich während eines Go/NoGo-Experiments eine große frontale N2 und fronto-zentrale P3 zeigt, sobald Inhibition nötig ist (Bekker et al., 2004; Bokura et al., 2001; Jodo & Inoue, 1990; Jodo & Kayama, 1992; Kok, 1986; Smith et al., 2006; van Boxtel et al., 2001). Bei erfolgreichen Stops sind auch große N2-Potentiale beobachtet worden (Schmajuk et al., 2006). Daraus kann man schließen, dass sowohl die N2 als auch die P3 – in welchem Ausmaß auch immer – eng mit Inhibitionsprozessen verknüpft zu sein scheinen.

Experten diskutieren darüber, welchen kognitiven Prozess die N2 letztendlich repräsentiert. Es gibt viele unterschiedliche Erklärungsversuche, aber vor allem drei Hauptaspekte, die mit der N2 in Verbindung gebracht werden: Inhibition, Konfliktentstehung oder Signalbewertung. Die Hypothese, dass die N2 mit Inhibition in Zusammenhang steht, wird durch folgende Ergebnisse unterstützt:

Die N2-Amplitude ist nicht nur größer bei gelungener Inhibition im Vergleich zur nicht erfolgreichen Inhibition (van Boxtel et al., 2001), sondern auch größer bei Personen mit niedrigen Fehlerraten als bei denjenigen, die viele Fehler machten (Falkenstein et al., 1999). Dies deutet darauf hin, dass es eine Assoziation zwischen Amplitude und erfolgreicher Antwortinhibition gibt (Falkenstein et al., 1999). Zudem konnte man Unterschiede zwischen offenen und verdeckten Reaktionen, d.h. zwischen von außen beobachtbaren motorischen Handlungen und nicht sichtbaren, rein kognitiven Antworten, feststellen: Zum einen ist die N2-Amplitude größer bei offenen im Vergleich zu verdeckten Inhibitionsaufgaben (Bruin & Wijers, 2002; Pfefferbaum et al., 1985). Zum anderen ist die N2 erhöht bei zeitlichem Druck, d.h. wenn schnell reagiert werden muss (Jodo & Kayama, 1992). Die Sensitivität hinsichtlich der Geschwindigkeit unterscheidet sich zwischen Aufgaben mit offenen motorischen Antworten und verdeckten Reaktionen

vermutlich deshalb, weil es schwieriger ist, die Reaktionszeit einer verdeckten Antwort festzustellen. Zusammengefasst kann man sagen dass frontozentrale N2-Amplituden größer sind, wenn ein Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Fehlerfreiheit eingegangen werden muss (Band et al., 2003).

Die N2 und ihre Bedeutung für die Inhibition wurden soeben angedeutet aber es gibt durchaus Beobachtungen, die für eine weitere Funktion der N2 sprechen. Damit ist die Repräsentation eines Konflikts, der durch den Wettbewerb zwischen mehreren Reaktionsalternativen zum gleichen Zeitpunkt entsteht, gemeint (Eimer, 1993; Nieuwenhuis et al., 2003). Wenn NoGo-Stimuli einige Eigenschaften mit Go-Stimuli teilen und somit eine Reaktionsvorbereitung auf eine eigentlich zu unterdrückende Antwort auslösen, zeigt sich eine größere N2-Amplitude. Diese Ergebnisse wurden kürzlich durch eine ERP-Studie einer kombinierten Go/NoGo- und Stop-Signal-Aufgabe unterstützt (Enriquez-Geppert et al., 2010). Die N2-Amplitude ist außerdem erhöht, wenn es eine Tendenz gibt, eine vorherrschende, aber falsche Antwort zu geben. Dies ist der Fall sowohl für Go/NoGo-Aufgaben als auch den Continuous-Performance-Test (Kopp et al., 1996; Nieuwenhuis et al., 2004). Letzterer dient als Instrument zur Untersuchung von Daueraufmerksamkeit bzw. Wachsamkeit (Chen et al., 1998)

Allerdings sind einige Forscher davon überzeugt, dass die Stop-Signal-N2 nicht ausschließlich Inhibition von Verhalten oder Konfliktenstehung, sondern auch die Bewertung des Stimulus wiedergibt (Ramautar et al., 2004, 2006). Genauer gesagt, wird behauptet, dass bei nicht erfolgreich ausgeführten Inhibitionsaufgaben, den Probanden bereits zur Zeit des Stop-Signals, dessen Ineffektivität bewusst sei (Kropotov et al., 2011). Folstein und seine Kollegen (2008) vereinen in einem Review die Inhibitions- und Bewertungstheorie, indem davon ausgegangen wird, dass die Stop-Signal-N2 vermutlich mehrere Subkomponenten enthält: Eine anteriore, bezogen auf Inhibition, und eine posteriore Komponente, die mit der Bewertung des Stop-Signals assoziiert ist (Folstein & Van Petten, 2008).

Dass die N2 – im Gegensatz zur P3 – womöglich eine zusätzliche oder gar ausschließliche Komponente wie z.B. die Konfliktbewertung beinhaltet, wurde bereits mehrfach erwähnt. Um darzustellen, dass nur die Konfliktbewertung ohne Inhibition für die ERP-Komponente N2 eine Rolle spielt, führten Randall und seine Kollegen (2001) in ihrer Studie ein modifiziertes Go/NoGo-Paradigma mit sog. Hinweisstimuli durch (Randall & Smith, 2011): Die Verwendung von sog. Hinweisstimuli erlaubte eine differenzierte Vorbereitung für Go- und NoGo-Reaktionen. Es gab „korrekte“ Hinweisstimuli, denen das passende Go- oder NoGo-Signal (Zielsignal) folgte sowie „falsche“ Hinweisstimuli, die das anschließende Signal nicht richtig vorhersagten und

dadurch einen Konflikt zwischen Zielsignal und geplanter Antwort erzeugten. Die N2-Amplitude war immer erhöht, sobald die durch den Hinweisstimulus geplante Antwort mit der durch das Zielsignal geforderten Antwort in Konflikt geriet. Im Gegensatz dazu war die P3 nur erhöht, wenn die geplante Bewegung abgebrochen wurde. Mit diesen Beobachtungen wird die Idee unterstützt, dass separate Prozesse für die N2- und P3-Komponente in Aufgaben, die sowohl Konflikt als auch Inhibition erfordern, zuständig sind (Randall & Smith, 2011).

Pfefferbaum und seine Kollegen (1985) fanden in einem semantischen Go/NoGo-Paradigma eine P3 mit einem Maximum in der Pz-Ableitung bei der Go-Bedingung, und eine P3 mit einem zentro-parietalen Maximum in der NoGo-Bedingung (Pfefferbaum et al., 1985). Häufig wird das sogenannte „Oddball-Paradigma“ zur Testung von Aufmerksamkeitsprozessen angewandt, welches aus einer Serie gleichbleibender Reize besteht und zwischen denen gelegentlich ein abweichender, unerwarteter Reiz in zufälliger Folge mit geringer Wahrscheinlichkeit dargeboten wird. Da man feststellen konnte, dass die Go-P3 dieselben Charakteristika wie die Oddball-P3 involviert, aber die NoGo-P3 eine andere Topographie aufweist, ließ sich daraus schließen, dass die NoGo-P3 einem unterschiedlichen neuronalen Prozess zuzuordnen ist. In einigen Experimenten ist man davon überzeugt, dass die P3 neuronale Inhibitionsmechanismen in sich vereint (Polich, 2007). Doch wie sollte man eigentlich Abweichungen der P3-Amplitude interpretieren? Es ist wichtig zu wissen, dass eine veränderte P3 nicht spezifisch für eine bestimmte neuropsychiatrische Störung ist, sondern lediglich sensitiv eine verminderte Aufmerksamkeit widerspiegelt. Die P3 wurde somit nicht nur im Rahmen von Studien über grundlegende Informationsverarbeitung untersucht, sondern auch für die Erforschung psychiatrischer und neurologischer Störungen genutzt (Duncan, 2009).

3.3 Anatomische Korrelate von Verhaltensinhibition

Dass die neuronale Grundlage inhibitorischer Prozesse ein großes neuronales Netzwerk umfasst, kann man anhand folgender Beobachtungen sehen: Die meisten Studien konnten bei Inhibitionsaufgaben bilaterale Aktivierungen sowohl im ventrolateralen und dorsolateralen präfrontalen Cortex als auch im anterioren cingulären Cortex und dem prä-supplementär motorischen Areal (pre-SMA) im medialen präfrontalen Cortex (PFC) finden (Liddle et al., 2001; Menon et al., 2001; Rubia et al., 2001; Wager et al., 2005; Watanabe et al., 2002). Weitere Aktivierungen zeigten sich im Gyrus parietalis inferior und in den Basalganglien. Einige Autoren berichten von gesteigerter Aktivität im rechten

Gyrus frontalis inferior (IFG) (Aron et al., 2007; Aron & Poldrack, 2006; Matthews et al., 2005), während andere bilaterale Aktivierungen im IFG darstellen konnten (Cai & Leung, 2009; Leung & Cai, 2007; Li, 2006). Als weitere erwähnenswerte Regionen für Inhibition seien das Striatum (Vink et al., 2005) und eine Region im Areal des subthalamischen Nucleus (Aron & Poldrack, 2006) genannt.

Go/NoGo-Aufgaben involvieren das fronto-parietale Netzwerk in größerem Umfang als Stop-Signal-Experimente (SST), u.a. mit prominenten Foci im rechten Gyrus frontalis medialis und im rechten Lobus parietalis inferior. Umgekehrt beteiligt die Stop-Signal-Aufgabe das cingulo-operculare System in größerem Ausmaß und zwar mit ausgeprägteren Aktivierungen in der linken anterioren Insula bilateral im Thalamus. Folglich sind GNG- und SST-Aufgaben keine identischen Messungen von Inhibition, weil sie zwar überlappende, aber dennoch unterschiedliche neuronale Schaltkreise beteiligen. In beiden Aufgaben wurden die größten und signifikantesten Aktivierungsfoci in der anterioren Insula beobachtet. Die maximale Überlappung neuronaler Aktivität beider Paradigmen wurde im rechten Inselkortex und im medialen Brodmann Areal (BA) 6 beobachtet. Unterschiede zwischen den Bedingungen zeigten sich im rechten Gyrus frontalis medius und superior (BA 9).

Die aktuellen Ergebnisse bestätigen die Bedeutung der anterioren Insula sowie des prä-supplementär motorischen Areals (pre-SMA) für Inhibitionsmechanismen (Swick et al., 2011).

Viele Experten haben eine rechtshemisphärische Dominanz für Antworthemmung festgestellt. V.a. für Go/NoGo- Aufgaben konnte im Vergleich zu Stop-Signal-Paradigmen im Hinblick auf motorische Antwortinhibition eine verstärkte Lateralisation auf die rechte Hemisphäre beobachtet werden (de Zubicaray et al., 2000; Garavan et al., 1999; Kawashima et al., 1996; Konishi et al., 1999; Konishi et al., 1998; Swick et al., 2011). Letztendlich und im Konsens mit vorangehenden Studienergebnissen, wird das pre-SMA, mehr als der IFG, als die entscheidende Region für den Abbruch einer Handlung angesehen (Chao et al., 2009).

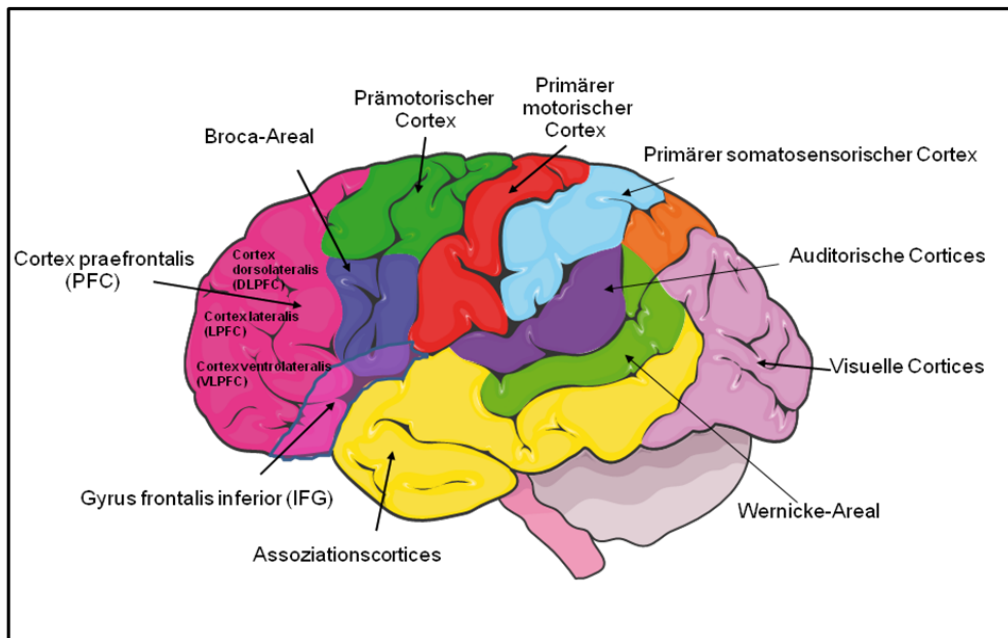


Abbildung 7: Gliederung des menschlichen Neokortex (www.servier.de/medical-art/die-nerven, Folie 10, bearbeitet, mit freundlicher Genehmigung von Les Laboratoires Servier, Copyright © 2006)

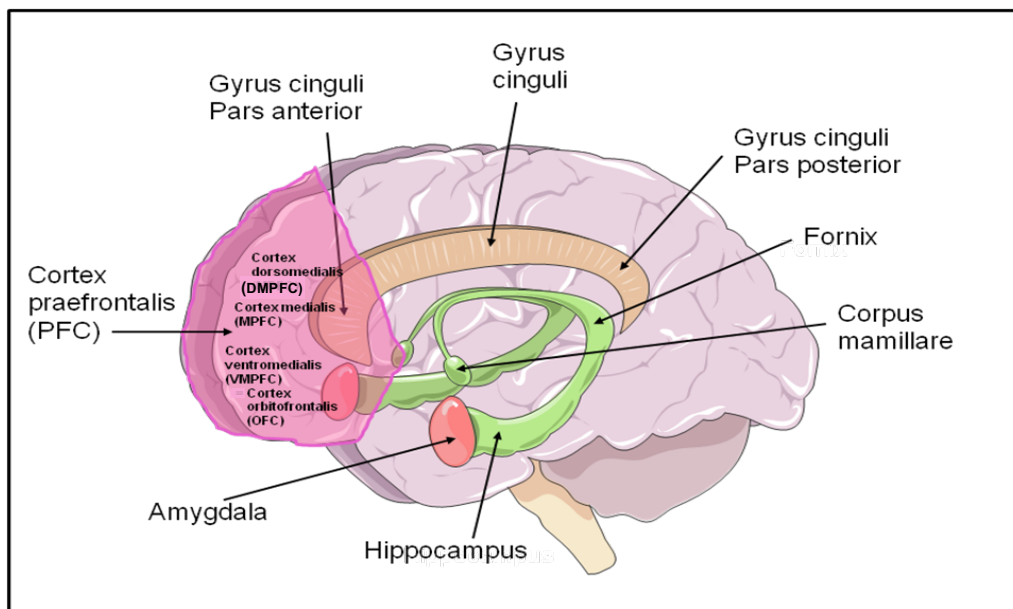


Abbildung 8: Sagittalschnitt des Gehirns: Cortex praefrontalis (www.servier.de/medical-art/die-nerven, Folie 6, bearbeitet, mit freundlicher Genehmigung von Les Laboratoires Servier, Copyright © 2006)

Um elektrophysiologische Korrelate einzelner Teilschritte besser verstehen zu können, werden ereigniskorrelierte Potentiale mithilfe von EEG-Untersuchungen aufgezeichnet. Wie so oft herrscht auch auf diesem Gebiet keine vollkommene Einigkeit bezüglich der

neuronalen Quellen von N2 und P3. Aber es wirkt überzeugend, dass die N2 im Bereich des präfrontalen Cortex (PFC) generiert wird: Der N2 wurden Aktivierungen im Gyrus präfrontalis lateralis (Kiefer et al., 1998), präfrontalis orbitalis und präfrontalis medialis, inklusive dem anterioren cingulären Cortex zugeordnet (Bekker et al., 2005b; Nieuwenhuis et al., 2003) Auch eine temporal-parietale Verbindung scheint von Bedeutung zu sein (Helenius et al., 2010).

Die P3 wird unter anderem durch motorische Inhibition (Gemba & Sasaki, 1989; Kok, 1986) und Konflikt-Überwachung moduliert (Smith et al., 2010). Eine Quellenlokalisierung mit einer low-resolution electromagnetic tomography (LORETA) zeigte, dass es eine signifikant stärkere neuronale Aktivität im rechten Frontallappen während NoGo-Versuchen als in Go-Versuchen gibt (Strik et al., 1998).

Um den selektiven Einfluss von Handlungsunterdrückung bezüglich der N2 und P3 im Go/NoGo-Paradigma zu berechnen, wurde in der Studie von Mostofsky und Kollegen eine sog. independent component analysis (ICA) verwendet. Die ICA ermöglichte es, unabhängige elektrophysiologische Prozesse sensorischer und motorischer Domäne, selektiv zu trennen. Unabhängige Komponenten (ICs), die mit visuellen Prozessen verbunden waren, wurden in linken und rechten temporalen Arealen generiert und trugen zur N2 in der Go/NoGo-Aufgabe bei (Mostofsky, 2003). Die IC, die mit Handlungsinhibition verbunden war, wurde im supplementären Motorkortex generiert und hatte Einfluss sowohl auf die N2 als auch auf die P3. Die IC, die mit Konfliktmonitoring assoziiert ist, wurde im anterioren cingulären Kortex generiert und zeigte ebenfalls Auswirkungen auf beide Komponenten, die N2 und die P3. Daraus folgerte man, dass N2 und P3 an Konflikt und Inhibition beteiligt sind. Der „Konflikt“ entspricht dem Mismatch des Input-Signals mit dem vorherrschenden Stimulusmodell. Mostofsky und Kollegen (2003) sind davon überzeugt, dass dieses sensorische Mismatch im Gyrus temporalis inferior stattfindet und sich auf die N2 auswirkt. Daraufhin folgt die Inhibition einer ablaufenden Handlung, welche sich im supplementären Motorkortex abspielt und sowohl die N2 als auch die P3 beeinflusst. Zuletzt findet erneut eine Konfliktdetektion zwischen aktuellem Handlungsmuster und dem vorherrschenden Verhaltensmodell statt, wofür der anteriore cinguläre Cortex eine entscheidende Rolle spielt und wo wieder die N2 sowie die P3 miteinbezogen werden (Mostofsky et al., 2003).

3.4 Frequenzbandanalyse bei der Inhibition von Verhalten

Sowohl bei Go- als auch bei NoGo-Aufgaben konnte eine Zunahme der Alpha-Aktivität über den Stimulusbeginn hinweg gezeigt werden (Barry, 2009). Ereigniskorrelierte

Alpha-Oszillationen wiesen aber v.a. eine gesteigerte Aktivität ab dem NoGo-N2-Peak auf (Yamanaka & Yamamoto, 2010), sodass vermutet wird, dass diese NoGo-spezifischen Alphabandwellen kurz vor und während der NoGo-N2, am initialen Teil des Inhibitionsprozesses beteiligt sind (Yamanaka & Yamamoto, 2010). Das Alphaband spielt womöglich hauptsächlich eine Rolle für NoGo-Reaktionen.

Bei Go-Reaktionen zeigte sich eine Abnahme der Betaoszillationen von prä- zu post-Stimulus-Intervallen (Barry, 2009). Brittain und Kollegen (2012) führten Frequenzbanduntersuchungen mithilfe eines sog. Stroop-Tests durch. Grundlage dieses Paradigmas ist die Annahme, dass gewohnte Reaktionen fast automatisch ablaufen, während unbekannte Situationen, z.B. das gelbgefärbte Farbwort „Blau“, einen Konflikt auslösen, welcher eine größere Aufmerksamkeit und somit eine längere Reaktionszeit erfordert als das der Druckfarbe entsprechende Farbwort. Bei inkongruenten Aufgaben wurde vor der Reaktion eine Resynchronisierung im Betaband beobachtet. Die Autoren gehen davon aus, dass die Betabandresynchronisierung so lange gestoppt wird, bis der Konflikt gelöst ist (Brittain et al., 2012).

Bei Go/NoGo-Versuchen wurde eine frontale Theta-Aktivitätssteigerung für Go-Stimuli beobachtet (Barry, 2009).

Shibata und Kollegen (1999) folgerten aus ihrer Go/NoGo-Studie, dass hohe Gammaband-Oszillationen mit dem Aufmerksamkeits- sowie Go/NoGo-Diskriminationsprozess assoziiert sind und frontale sowie links parieto-okzipitale Areale involvieren. In der Go-Bedingung waren diese hochfrequenten Oszillationen mit motorischen Arealen und somit mit motorischem Verhalten assoziiert, während in der NoGo-Bedingung niedrigere Gammaband-Frequenzen im zentralen Areal beobachtet wurden. Letztere spielen wahrscheinlich eine Rolle für den Inhibitionsprozess (Shibata et al., 1999).

4 Entscheidungsprozesse

Gibt es eine Wahl zwischen verschiedenen Handlungsplänen, so resultiert daraus ein Konflikt. Dieser Konflikt ist wohl am größten, wenn keine der Antwortmöglichkeiten präferiert wird d.h. wenn der eine Handlungsplan nicht besser ist als der andere. Dies ist notwendigerweise der Fall bei Aufgaben mit freier Wahl (Nachev et al., 2005). Daraus folgerten Nachev und Kollegen (2005), dass sich hinter dem volitionalen Prozess der Wahl ein neuronales System verbirgt, welches vielmehr für die Auflösung von Konflikten zuständig ist als für die reine Entscheidung zwischen unvereinbaren Handlungsplänen.

Genau dies stellt auch die Schwierigkeit bei Experimenten dar, die Entscheidungen untersuchen sollen: Es gibt Paradigmen, die traditionell für die Untersuchung von Entscheidungsprozessen eingesetzt wurden. Da es dabei auch zur Entstehung von Konflikten kommt, ist eine eindeutige Abgrenzung zwischen Entscheidung und Konflikt kaum möglich. Um diese beiden Prozesse, die Volition und den Konflikt, klarer trennen zu können, fertigten Nachev und Kollegen (2005) eine okulomotorische Planänderungsaufgabe mit freiwilligen Bewegungen an:

Es wurde ein Paradigma angewandt, welches die Probanden vor die Entscheidung stellte, einem spezifischen Bewegungsplan zu folgen oder zwischen Alternativen frei zu wählen. Eine Konfliktsituation konnte erzeugt werden, indem den Probanden die Wahl gelassen wurde, ihren Plan fortzuführen oder diesen schnell zu wechseln (Nachev et al., 2005).

Ein neueres Entscheidungsmodell beschreibt die Entscheidung, ob man überhaupt handelt oder nicht, als wichtige Komponente der Volition (Brass & Haggard, 2008). Fried und Kollegen (2011) machen bestimmte Neurone dafür verantwortlich, eine tonische Inhibition hervorzurufen und somit Handlungen solange zurückzuhalten, bis diese angemessen erscheinen. Andere Neurone sollen dazu beitragen, freiwillige Handlungen zu triggern, indem sie nach und nach diese tonische Inhibition aufheben. Diese konkurrierende Interaktion zwischen verschiedenen Neuronen könnte dafür verantwortlich sein, ob man handelt oder nicht (Fried et al., 2011). Dass Inhibitionsmechanismen beim Treffen von Entscheidungen durchaus eine Rolle spielen, zeigen auch folgende Beobachtungen: Das Unterdrücken von Handlungen und freiwilliger Initiierung ist mit dem medialen Frontalkortex verbunden. Läsionen in dieser Region können anarchische Handbewegungen und ungewollte zwanghafte Handlungen als Antwort auf Umweltreize hervorrufen (Boccardi et al., 2002). Dies zeigt, dass eine normale Funktion dieser Bereiche vermutlich darin besteht, ungewollte Handlungen tonisch zu hemmen. Das Bewusstwerden der Handlungsabsicht korrespondiert womöglich mit dem Zeitpunkt, zu dem das Gehirn einen erstellten Handlungsplan in eine motorische Handlung umwandelt, was sich durch eine veränderte Aktivität im eigentlichen SMA äußert (Haggard, 2011).

4.1 Paradigmen bei Entscheidungsprozessen

4.1.1 Libet Experiment

In der Volitionsforschung dominierte lange Zeit das „Libet Experiment“ (Libet et al., 1983). Bei diesem Experiment dürfen Teilnehmer immer dann eine einfache (freiwillige) Handlung z.B. einen Tastendruck ausführen, wenn sie das Bedürfnis verspüren. Währenddessen wird die Hirnaktivität mittels Elektroenzephalographie (EEG) oder mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) gemessen (Lau et al., 2004a). Während der Aufgabe sollen die Probanden den Sekundenzeiger einer Uhr beobachten und sie werden aufgefordert, sich die Position der Uhr zu notieren, wenn sie die bewusste Absicht oder den Drang verspüren, die Taste zu drücken. Dieser Zeitpunkt wird als Willensurteil bezeichnet. Das Willensurteil tritt einige hundert Millisekunden vor der Bewegung selbst auf. Dies ließ die Frage aufkommen, welche neuronalen Prozesse im Gehirn für die Initiierung freiwilliger Handlungen und deren Bezug zum Bewusstsein, verantwortlich sind. Obwohl Libets Experiment vor fast 30 Jahren veröffentlicht wurde, gilt es noch immer als geschätzte Methode zur Untersuchung von Entscheidungsprozessen (Haggard, 2011).

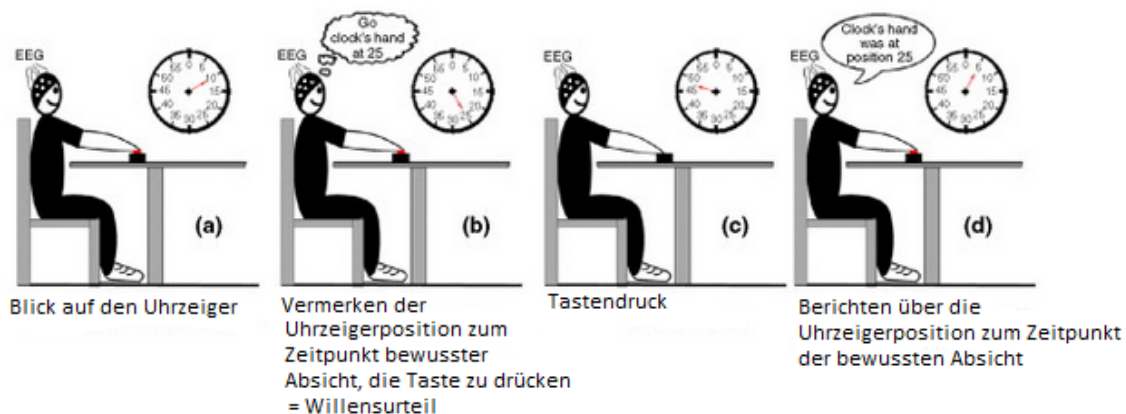


Abbildung 9: Illustration des Libet-Experiments, modifiziert nach Desmurget und Sirigu, 2009: Die Aufgabe besteht darin, eine Taste mit dem rechten Zeigefinger zu drücken. (a) Probanden beobachten einen Uhrzeiger, der auf einem Bildschirm rotiert. (b) Die Probanden müssen den Augenblick herausfinden, wann sie die Absicht verspüren, sich zu bewegen. (c) Sie drücken die Taste. (d) Nach einer beliebigen Verzögerung stoppt die Uhr und die Probanden müssen die Uhrzeigerposition von (b) berichten (Desmurget & Sirigu, 2009, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©)

4.1.2 Entscheidungsaufgabe

Eine wichtige Eigenschaft menschlichen Verhaltens ist die Fähigkeit, sich zwischen mehreren Alternativen für eine Sache zu entscheiden (Demanet et al., 2013). In den letzten 60 Jahren wurde dieses Paradigma u.a. zur Untersuchung entscheidungsbedingter Präferenzänderung genutzt, was das Interesse von Psychologen, Ökonomen und Neurowissenschaftlern auf sich zog (Ariely & Norton, 2008). Entscheidungsbedingte Präferenzänderung beschreibt die Tatsache, dass die Präferenz eines Individuums die Entscheidung beeinflusst („Ich mag das, also wähle ich das“), aber umgekehrt die Entscheidung ebenso die Präferenz („Ich wähle das, also mag ich das“) und somit das Verhalten beeinflusst (Izuma & Murayama, 2013). Neben der komplexen Präferenzanalyse, die hier nicht näher erläutert werden soll, eignen sich Entscheidungsaufgaben auch zur Untersuchung der „what“-Komponente volitionalen Handelns (Demanet et al., 2013). Hierbei können in Zusammenhang mit kognitiver Kontrolle v.a. innere Beweggründe oder Erfahrungen (z.B. mit Schlüsselreizen) eine Rolle spielen. Fleming und Kollegen verwendeten in ihrer Studie ein Paradigma, welches sowohl freie Entscheidungen als auch angeleitete Aufgaben beinhaltet (Fleming et al., 2009).

4.2 Ereigniskorrelierte Potentiale bei Entscheidungsprozessen

Im Alltag ist es notwendig, das Verhalten selektiv an verschiedene Situationen und Aufgaben anzupassen. In der kognitiven Psychologie kann dieses Anpassungsverhalten mit verschiedenen Paradigmen untersucht werden. Im Gegensatz zum Alltag gibt es unter experimentellen Bedingungen jedoch immer Anleitungen, die den Probanden in unterschiedlichem Maße deren Reaktionshandlungen vorgeben. Die neuronalen Mechanismen, die der Wahl und Initiierung freiwilliger Handlungen ohne externe Anleitung unterliegen, sind kaum verstanden. Diese Mechanismen werden gewöhnlich unter Verwendung eines Paradigmas untersucht, während dem unterschiedliche Entscheidungen von einem Probanden bei jedem Versuch selbst getroffen werden. Um neuronale Korrelate, die durch Aufgabenanleitungen bestimmt werden, von neuronalen Korrelaten, die durch das freie Treffen von Entscheidungen geprägt werden, zu trennen, verwendeten Karch und Kollegen ein adaptiertes Go/NoGo-Paradigma in einer kombinierten EEG/fMRT-Studie. Dabei konnte die N2-Amplitude v.a. in frontalen und frontozentralen Arealen sowohl während der Entscheidungsbedingung als auch in der NoGo-Bedingung dargestellt werden. Höhere P3-Amplituden konnten bei der Entscheidungsbedingung im Vergleich zur Go- und Kontrollbedingung, v.a. in

frontozentralen Arealen gemessen werden. Die P3-Amplituden unterschieden sich nicht zwischen Entscheidungs- und NoGo-Bedingung (Karch et al., 2010a).

4.3 Anatomische Korrelate von Entscheidungsprozessen

Es gibt die Hypothese, dass freiwillige Handlungen unbewusst beginnen und nur in unsere bewusste Erfahrung münden, wenn mediale Frontalaktivität eine gegebene Aktivitätsschwelle erreicht hat (Matsushashi & Hallett, 2008). Vor einigen Jahren wurde das supplementär motorische Areal (SMA), welches sich unmittelbar anterior vom medialen Teil des primären Motorkortex befindet, in das rostrale präsupplementär motorische Areal (pre-SMA) und das weiter kaudal gelegene SMA, unterteilt. Das SMA wurde als Ausführungsareal bezeichnet, da sie über Axone Kontakt zum Rückenmark hat, während das pre-SMA als das Areal angesehen wurde, welches primär in die Bewegungsplanung involviert ist (Picard & Strick, 1996). Diese Befunde führen zu der Vermutung, das pre-SMA sowohl mit freiwilliger Handlung als auch mit Entscheidungen selbst in Verbindung zu bringen.

Auch Einzelzell-Ableitungen bei Affen, die eine verzögerte Reaktionsaufgabe durchführen mussten, zeigten einen Unterschied zwischen dem rostralen Anteil des SMAs (pre-SMA) und dem kaudalen Anteil des SMAs: Neuronale Aktivität wurde im kaudalen Anteil des SMAs nur während der Antwort selbst gesehen; Aktivität im pre-SMA allerdings scheint sowohl mit der Verzögerungsperiode als auch mit der Antwort selbst assoziiert zu sein, was vermuten lässt, dass das pre-SMA bei der Vorbereitung und bei der Auswahl einer Antwort involviert ist (Hoshi & Tanji, 2004; Matsuzaka et al., 1992).

Es entsteht der Eindruck, dass die beiden funktionell verschiedenen Komponenten des Volitionsprozesses, der Konflikt und die eigentliche freie Entscheidung, voneinander unabhängige Systeme innerhalb des Gyrus frontalis medialis involvieren. Eine rostrale Region, die durch Konflikt aktiviert wird und eine Region, die mit Volition assoziiert ist (Nachev et al., 2005).

Karch und Kollegen konnten anhand ihrer fMRI-Daten feststellen, dass mediale und laterale Frontalhirnregionen (Gyrus frontalis superior, Gyrus frontalis medius und Gyrus frontalis medialis) ebenso wie der Gyrus parietalis inferior und die Insel mit freien Entscheidungen assoziiert sind (Karch et al., 2010a):

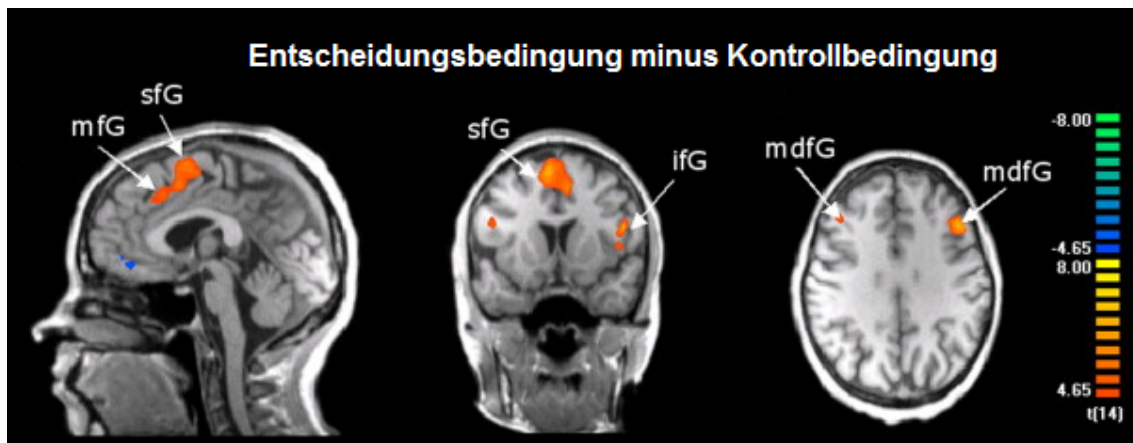


Abbildung 10: fMRT-Antworten beim Vergleich der Entscheidungsbedingung mit der Kontrollbedingung nach Karch et al., 2010. Abkürzungen: sfG, Gyrus frontalis superior; mdfG, Gyrus frontalis medius; mfG, Gyrus frontalis medialis; ifG, Gyrus frontalis inferior (Karch et al., 2010a, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©)

4.4 Frequenzbandanalyse bei Entscheidungsprozessen

Siegel und Kollegen (2011) fanden heraus, dass Teilprozesse der Entscheidungsfindung durch neuronale Oszillationen innerhalb spezifischer Frequenzbereiche vermittelt werden. Die Aktivität im Betafrequenzbereich ist assoziiert mit einer Art voraussagenden Funktion hinsichtlich der Ausführung einer Handlung. Gamma-Oszillationen in sensorischen und motorischen Kortexarealen spiegeln u.a. die Kodierung sensorischer Signale und des Handlungsplans wider (Siegel et al., 2011). Walsh und Kollegen (2010) ließen Probanden eine freiwillige Handlung vorbereiten und anschließend abbrechen. Hierbei diente ein rotierendes Uhrzeiger als Orientierungshilfe: Die Probanden sollten berichten, wann die Absicht verspürt wurde, eine Taste mit der rechten Hand zu drücken. Zudem bestand die Möglichkeit, frei entscheiden zu können, ob die Bewegung im letzten Moment abgebrochen werden soll. Bei den Reaktionsversuchen wurde eine reduzierte Power im Betafrequenzbereich vor der Bewegung beobachtet, gefolgt von einem Anstieg der Betaaktivität nach der Bewegung (Walsh et al., 2010). Schon Pfurtscheller und Kollegen (1999) konnten feststellen, dass einer freiwilligen Bewegung eine Abschwächung von Betaaktivität über sensorimotorischen Arealen kontralateral vorangeht (Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999). Bezüglich Gamma-Oszillationen konnte in einem Experiment, an dem schizophrene Patienten und gesunde Probanden teilnahmen, folgendes festgestellt werden: Bei Gesunden war vor einem freiwilligen Tastendruck die neuronale Gammaband-Synchronität maximal über dem kontralateralen sensorimotorischen Kortex, was mit der ipsilateralen

somatosensorischen ERP-Amplitude, die durch den Tastendruck evoziert wurde, korrelierte. Bei Patienten wurden reduzierte neuronale Synchronitäten vor dem Tastendruck sowohl für Gamma- als auch Betaoszillationen gemessen. V.a. Patienten mit Apathie wiesen diese reduzierte Betabandsynchronität auf (Ford et al., 2008).

Für Entscheidungsprozesse spielen also möglicherweise v.a. Beta- und Gammaoszillationen eine größere Rolle.

5 Beeinträchtigung exekutiver Prozesse bei psychiatrischen Erkrankungen

5.1 Schizophrenie

Bei Schizophrenie handelt es sich nicht um eine einzige Krankheitsentität, sondern um eine heterogene Gruppe schizophrener Störungen, die u.a. mit Wahn, Halluzinationen, formalen Denkstörungen, Ich-Störungen, Affektstörungen und psychomotorischen Defiziten einhergehen (Möller, 2009). Schon Anfang des 20. Jahrhunderts erkannten Kraepelin und Bleuler, dass kognitive Veränderungen eng mit der Schizophrenie in Zusammenhang stehen (Bleuler, 1911; Kraepelin, 1913). Kraepelin fasste 1898 die Erscheinungsbilder der Schizophrenie unter dem Krankheitsbegriff „Dementia praecox“ zusammen, was den ungünstigen Verlauf der Erkrankung im Sinne einer schweren Persönlichkeitsveränderung deutlich machte (Bleuler, 1911; Möller, 2009). Bleuler prägte erstmals 1911 den Begriff der „Schizophrenie“ um eine Spaltung des psychischen Erlebens zu beschreiben (Kraepelin, 1913; Möller, 2009).

Bei schizophrenen Patienten können kognitive Defizite vor allem in den Bereichen Aufmerksamkeit und exekutive Funktionen auftreten. (Weisbrod et al., 2000). Auch bei der Inhibition von Reaktionen können Defizite beobachtet werden (Frith, 1979).

Situationen, die flexible Antworten erfordern wie z.B. der Wisconsin Card Sorting Test, der die Anpassung von Verhalten an neue Anforderungen prüft (Franke et al., 1992) oder der Stroop Test, welcher die Nichtbeachtung störender Stimuli bzw. Konfliktbewältigung abverlangt (Hepp et al., 1996), bereiten schizophrenen Patienten Probleme. Schon lange bevor überhaupt die Diagnose Schizophrenie anhand klinischer Symptome gestellt werden kann, kann die Leistung der Patienten im Alltag durch kognitive Defizite beeinträchtigt sein (Weisbrod et al., 2000). Kognitive Dysfunktionen werden als wichtige Prädiktoren für den Langzeiterfolg der Therapie angesehen. Sie können auch bei

remittierten Patienten auftreten (Randolph C, 1993). Defizite können auch bei Störungen aus dem schizophrenen Formenkreises und bei nichtschizophrenen Geschwistern von schizophrenen Patienten beobachtet werden (Cornblatt & Keilp, 1994).

Weisbrod und Kollegen (2000) untersuchten in ihrer Studie ERPs bei schizophrenen Patienten und gesunden Probanden während Go/NoGo-Aufgaben. Die N2 war bei beiden Gruppen in der NoGo-Aufgabe stärker ausgeprägt in bilateralen inferioren frontotemporalen Bereichen als in der Go-Aufgabe. Im Gegensatz dazu gab es zwischen den Gruppen Unterschiede bezüglich der P3: Während von gesunden Probanden Potentiale an frontozentralen Elektroden, v.a. in der linken Hemisphäre abgeleitet wurden, war bei schizophrenen Versuchsteilnehmer keine Asymmetrie feststellbar. Die Autoren folgerten daraus, dass exekutive Dysfunktionen bei schizophrenen Patienten vermutlich in späteren Stadien kognitiver Verarbeitung (ca. 300—500 ms im P3-Zeitfenster) ihren Ursprung haben und womöglich mit einer Fehlaktivierung neuronaler Netzwerke in linken Frontalhirnbereichen in Zusammenhang stehen (Weisbrod et al., 2000). Störungen innerhalb und zwischen den neuronalen Netzwerken des frontoparietalen Systems bei schizophrenen Patienten wurden aktuell von Tu und Kollegen festgestellt (Tu et al., 2013).

Bezüglich der Lateralisation wurde schon vor mehr als 130 Jahren die Hypothese aufgestellt, dass schizophrene Patienten öfters auf der linken Hemisphäre organische Hirnveränderungen aufweisen als auf der rechten (Crichton-Browne, 1879; Luys, 1881). Auch moderne bildgebende Verfahren zeigen, dass bei schizophrenen Patienten sowohl morphologische Abweichungen (Friston et al., 1992; Shenton et al., 1992) als auch ERP-Veränderungen (Morstyn et al., 1983; Weisbrod et al., 1997) öfters auf der linken als auf der rechten Hemisphäre zu finden sind.

5.2 Aufmerksamkeitsdefizit-/ Hyperaktivitäts-Störung (ADHS)

ADHS ist eine Entwicklungsstörung, welche durch Unaufmerksamkeit, Hyperaktivität und Impulsivität gekennzeichnet ist (Fisher et al., 2011). Symptome können bis ins Erwachsenenalter persistieren. Impulsivität ist assoziiert mit einem Defizit des hemmenden Verhaltens bei situativen Anforderungen (Bekker et al., 2005c). Eingeschränkte Hemmung von Verhalten wird als ein Hauptdefizit bei ADHS-Patienten, insbesondere bei Erwachsenen, angesehen (Aron & Poldrack, 2005). Bekker und Kollegen (2005) gehen davon aus, dass ein primäres Inhibitionsdefizit eine Kaskade an sekundären Defiziten hinsichtlich anderer exekutiven Funktionen wie z.B. Aufmerksamkeit mit sich bringen kann (Bekker et al., 2005d).

Im Vergleich zu Kontrollgruppen zeigten sich bei Kindern mit ADHS signifikante Veränderungen sowohl bei der N2 als auch bei der P3 (Karayanidis et al., 2000; Pliszka et al., 2000; Smith et al., 2004). Die meisten Studien berichten von einer verkleinerten N2-Amplitude bei ADHS im Kindes- (Bokura et al., 2001; Casey et al., 1997; Tamm et al., 2004) und Jugendalter (Wild-Wall et al., 2009). Andere Autoren beobachteten einen gegenteiligen Trend (Rubia et al., 2005). Jonkman und Kollegen (1997 und 2004) fanden heraus, dass die auditorische P3 signifikant kleiner ist bei ADHS-Kindern als in einer Kontrollgruppe (Jonkman et al., 1997; Jonkman et al., 2004). Prox und Kollegen (2007) konnten vergrößerte N2-Amplituden bei erwachsenen ADHS-Patienten im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen (Prox et al., 2007) beobachten.

Fisher und Kollegen (2011) schlussfolgerten aus ihrer Studie, dass neuronale Netzwerke, die der Inhibition von Reaktionen dienen, bei ADHS-Patienten beeinträchtigt sind. Bei NoGo-Aufgaben machten die ADHS-Patienten signifikant mehr Aktionsfehler, da anscheinend die eingesetzten Mittel für das Zurückhalten einer vorherrschenden Reaktion nicht ausreichend waren. Außerdem zeigten ADHS Probanden eine unerwartete, signifikant erhöhte Hemmung von Reaktionen bei Go-Versuchen mit überhöhten Versäumnisfehlern in Verbindung mit wesentlich größeren N2 Amplituden (Fisher et al., 2011).

Versäumnisfehler werden mit Aufmerksamkeitsdefiziten assoziiert, wohingegen Ausführungsfehler auf eine beeinträchtigte inhibitorische Kontrolle zurückgeführt werden (Kenemans et al., 2005). Die Ergebnisse von Fisher und Kollegen unterstützen die Annahme, dass bei ADHS eine allgemeine Dysregulation von Verhaltensinhibition auftritt, welche sich nicht nur auf die Hemmung von Reaktionen beschränkt, sondern zusätzliche Defizite hinsichtlich Aufmerksamkeits- und Regulationsfunktionen umfasst (Fisher et al., 2011).

Mulligan et al. (2011) untersuchten die neuronalen Grundlagen bei Inhibition von Reaktionen in einer Gruppe Erwachsener. Funktionelle Magnetresonanztomographie wurde angewandt, um Hirnaktivitätsmuster zu identifizieren und zu vergleichen während korrekt ausgeführten Go/NoGo-Aufgaben. Die Kontrollgruppe rekrutierte ein ausgedehnteres Netzwerk von Hirnregionen als die ADHS-Gruppe während korrekter Inhibitionsaufgaben. Erwachsene mit ADHS zeigten reduzierte Hirnaktivität im rechten frontalen Augenfeld, dem präsupplementären motorischen Areal, dem linken Gyrus praecentralis und dem bilateralen Gyrus parietalis inferior (Mulligan et al., 2011). Ähnliche Veränderungen beobachteten Fisher und Kollegen (2011): Bei erfolgreich durchgeführten NoGo-Aufgaben wurde bei erwachsenen ADHS-Patienten eine

reduzierte Aktivität im rechten dorsolateralen präfrontalen Cortex und im posterioren Cingulum festgestellt (Fisher et al., 2011).

Inhibitionsaufgaben und ihre Netzwerkmodelle haben nicht nur klinische Bedeutung für die Identifizierung neuronaler Korrelate von impulsivem Verhalten bei ADHS, sondern spielen auch für die Borderline Persönlichkeitsstörung, Substanzabusus und manischen Phasen von Bipolaren Störungen eine entscheidende Rolle (Swick et al., 2011).

6 Fragestellungen und Hypothesen

In diesem Experiment wurden Inhibitions- und Entscheidungsprozesse in einem adaptierten Go/NoGo-Paradigma mithilfe von ereigniskorrelierten Potentialen und einer Frequenzbandanalyse bei gesunden Probanden genauer untersucht. Dabei ergaben sich folgende Fragen und Hypothesen:

- Wie verhalten sich die ereigniskorrelierten Potentiale N2 und P3 bei den Go- und NoGo-assoziierten Reaktionen sowie bei den Entscheidungsaufgaben? Gibt es Inhibitions- oder entscheidungsspezifische Veränderungen? Wenn ja, wo sind diese lokalisiert?
 - ⇒ Inhibitionsprozesse und Entscheidungen sind mit frontozentral betonten N2- und P3-Amplituden assoziiert (Bekker, 2004; Donchin, 1988).
 - ⇒ Die frontale P3-Amplitude ist größer in der NoGo- als in der Go-Aufgabe (Eimer, 1993; Kopp et al., 1996).
- Unterscheiden sich die verschiedenen Frequenzbereiche zwischen den Bedingungen (Go-, NoGo-, Entscheidungsaufgabe)? Wenn ja, gibt es Inhibitions- oder entscheidungsspezifische Veränderungen?
 - ⇒ Die oszillatorische Aktivität ist bei Entscheidungen ausgeprägter als in Go-Aufgaben.
- Beeinflusst die Art der Entscheidung (rechte oder linke Taste drücken bzw. Tastendruck ja oder nein?) die elektrophysiologischen Korrelate?
 - ⇒ Es gibt keinen wesentlichen Unterschied zwischen den Arten der Entscheidung hinsichtlich ihrer elektrophysiologischen Korrelate.
- Beeinflusst der Messzeitpunkt bzw. die Messwiederholung die elektrophysiologischen Korrelate?
 - ⇒ Die Messergebnisse von 1. und 2. Termin unterscheiden sich nicht wesentlich.

B. Methoden

Die Studie wurde von der Ethik-Kommission der Ludwig-Maximilians-Universität München geprüft und bewilligt und in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Im Vorfeld wurden die Versuchsteilnehmer schriftlich und mündlich über die Freiwilligkeit der Untersuchung und die Möglichkeit, die Teilnahme jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile abubrechen, aufgeklärt. Die Versuchsteilnehmer erhielten für ihre Mitarbeit eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 20 Euro.

1 Stichprobe

Es wurden insgesamt 28 gesunde männliche Probanden zwischen 20 und 35 Jahren (Durchschnittsalter: $24,04 \pm 2,71$ Jahre) aus dem Bekanntenkreis rekrutiert. Ausschlusskriterien waren neurologische oder psychiatrische Erkrankungen; dies wurde mithilfe eines standardisierten Fragebogens erfasst. Unter den Probanden befanden sich 25 Studenten, ein Medienberater, ein Diplom-Soziologe und ein Diplominformatiker. Die geschätzte verbale Intelligenz, erfasst durch den Wortschatztest, erwies sich als überdurchschnittlich ($118,4 \pm 8,55$). Die Summe der Ausbildungsjahre betrug im Mittelwert $16,44 \pm 1,79$ Jahre. Um die aktuelle Befindlichkeit festzustellen, mussten die Probanden Screeningfragebögen wie z.B. das Beck Depressions Inventar (BDI) ausfüllen. Da ein Versuchsteilnehmer einen erhöhten Depressionswert aufwies, wurde dieser von der Studie ausgeschlossen. Die EEG-Aufzeichnungen während den Versuchsbedingungen wurden somit an insgesamt 27 gesunden männlichen Probanden durchgeführt, die in zwei Versuchsgruppen eingeteilt wurden. Die Gruppen hatten jeweils eine unterschiedliche Version derselben Aufgabe auszuführen: Die Probanden mussten sich in einer Entscheidungsaufgabe entschließen, auf einen akustischen Stimulus hin eine Reaktionstaste zu drücken oder nicht bzw. sich bei der 2. Version für die linke oder rechte Reaktionstaste zu entscheiden. Daraus ergaben sich die beiden Versionen der Entscheidungsaufgabe: Entscheidung Reaktion ja/nein und Entscheidung Reaktion rechts/links (genaueres siehe Tabelle 2). Abgesehen vom Paradigma unterschieden sich die Gruppen weder bezüglich des Alters, noch der Ausbildung, noch der verbalen Intelligenz. Jeder Proband nahm zweimal am Experiment teil: am Vormittag (1. Termin) und am Nachmittag (2. Termin).

	Teilnehmeranzahl	Alter [Jahre]	Anzahl Ausbildungsjahre	Verbale Intelligenz
Entscheidung Reaktion ja/nein	14	24,8 ± 3,31	16,6 ± 1,96	117,5 ± 9,21
Entscheidung Reaktion rechts/ links	13	23,2 ± 1,64	16,3 ± 1,64	119,3 ± 8,1
p-Wert		p = 0,139	p = 0,631	p = 0,593

Tabelle 1: Soziodemographische Daten der beiden Versuchsgruppen

2 Fragebögen

2.1 Soziodemographischer Fragebogen

Die Probanden mussten die Anzahl ihrer Schul-/Studien-/Ausbildungs-/Berufsjahre sowie ihren erlernten und ausgeübten Beruf angeben. Außerdem wurde der Schul- und Ausbildungsstand der Eltern erfragt. Orientierende Informationen bezüglich der bisherigen Krankheitsgeschichte wurden mithilfe von Fragen zu früheren oder aktuellen neurologischen Erkrankungen, sonstigen schweren/chronischen körperlichen Erkrankungen, Geburtskomplikationen, Entwicklungsproblemen, Hörbehinderung und diagnostizierten Erkrankungen erst- und zweitgradiger Verwandter erhoben. Zusätzlich wurde nach Substanzgebrauch (Alkohol, Tabak, Drogen) gefragt.

2.2 Beck Depressions Inventar (BDI)

Es handelt sich hierbei um ein psychologisches Testverfahren zur Beurteilung der Schwere einer depressiven Symptomatik. Der Selbstbeurteilungs-Fragebogen beinhaltet 21 Fragen (z.B. zu Traurigkeit, Pessimismus, Appetitlosigkeit, Schlaflosigkeit etc.) mit jeweils 4 Antwortmöglichkeiten (0 = nicht vorhanden, 1 = leicht vorhanden, 2 = mäßige Ausprägung, 3 = starke Ausprägung). Der Summenwert ermöglicht eine Einschätzung der Ausprägung der Depression (0–13 Punkte = minimal; 14–19 Punkte = leicht; 20–28 Punkte = mittelschwer; 29–63 Punkte = schwere Depression (Beck, 1961).

Die Versuchsteilnehmer erreichten beim BDI einen durchschnittlichen Gesamtscore von $2,70 \pm 2,49$ Punkten.

2.3 NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI)

Dieses multidimensionale Persönlichkeitsinventar erfasst mittels 60 Fragen und einer fünfstufigen Skala individuelle Merkmalsausprägungen in den fünf Dimensionen Neurotizismus, Extraversion, Offenheit für Erfahrung, Verträglichkeit und Gewissenhaftigkeit (= „Big Five“). Für jede der Dimensionen werden Punktskoren errechnet, welche mit Normwerten verglichen werden (Costa, 1989).

Die fünf Dimensionen ergaben für die Probanden jeweils folgende Mittelwerte: Neurotizismus $1,22 \pm 0,48$, Extraversion $2,37 \pm 0,56$, Offenheit für Erfahrung $2,59 \pm 0,56$, Verträglichkeit $2,55 \pm 0,42$, Gewissenhaftigkeit $2,72 \pm 0,45$.

2.4 Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung

Nach Beendigung der EEG-Aufzeichnungen bewerteten die Probanden selbst ihre eigene Leistung, Mühe und Anstrengung anhand einer 5-stufigen Skala (1 = nicht ausgeprägt bis 5 = sehr stark ausgeprägt). Es konnte gezeigt werden, dass die Werte mit den Reaktionszeiten und Amplitudenhöhen der N1 korrelieren und dass es sinnvoll ist, die Motivation und Anstrengung der Probanden zu erfassen (Mulert et al., 2005).

Auf der 5-stufigen Skala bewerteten die Probanden ihre eigene Leistung mit durchschnittlich $3,41 \pm 0,75$. Die hierfür aufgewendete Mühe wurde mit $4,30 \pm 0,72$, die erforderliche Anstrengung mit $2,63 \pm 0,84$ und die Schwierigkeit der Aufgabe mit $1,89 \pm 0,75$ bemessen.

Bei den durch den Fragebogen ermittelten Werten konnten weder signifikante Unterschiede zwischen den beiden Entscheidungsparadigmen ja/nein vs. rechts/links (Schwierigkeit: $T = -0,224$, $p = 0,825$; Mühe: $T = 0,985$, $p = 0,334$; Anstrengung: $T = -0,368$, $p = 0,716$ und eigene Leistung: $T = 1,767$, $p = 0,089$) noch zwischen den beiden Versuchsterminen (z.B. Entscheidung ja/nein: Mühe: $T = -0,563$, $p = 0,583$; eigene Leistung $T = 1,295$, $p = 0,218$) festgestellt werden (siehe Tabelle 2).

Visuelle Analogskala	Schwierigkeit		Mühe		Anstrengung		Leistung	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Entscheidung ja/nein 1. Termin	1,86	± 0,86	4,43	± 0,65	2,57	± 0,85	3,64	±0,63
Entscheidung ja/nein 2. Termin	2,00	± 0,96	4,50	± 0,86	2,86	± 0,95	3,36	±0,63
p-Wert	0,336		0,583		0,263		0,218	
Entscheidung rechts/links 1. Termin	1,92	± 0,64	4,15	± 0,80	2,69	± 0,86	3,15	± 0,80
Entscheidung rechts/links 2. Termin	2,00	± 1,00	4,31	± 0,75	3,00	± 1,08	3,00	± 0,91
p-Wert	0,673		0,337		0,392		0,549	
Entscheidung rechts/links v.s. Entscheidung ja/nein p-Wert	0,825		0,334		0,716		0,089	

Tabelle 2: Ergebnisse der Visuellen Analogskala für die Kriterien Schwierigkeit, Mühe, Anstrengung sowie Leistung; Vergleich der beiden Entscheidungsparadigmen ja/nein bzw. rechts/links 1. Termin vs. 2. Termin und Vergleich Entscheidung ja/nein v.s. rechts/links; M: Mittelwert, SD: Standardabweichung

2.5 Händigkeit

Die Händigkeit wurde mit dem Edinburgh Handedness Inventory erfasst. Es handelt sich hierbei um eine einfache quantitative Methode zur Erfassung der Händigkeit anhand eines Fragebogens (Oldfield 1971). Die Testperson wird aufgefordert, bei 10 Items die Präferenz für die linke oder rechte Hand anzugeben. Eine eindeutige Präferenz wird mit ++ markiert, während bei Unschlüssigkeit sowohl in der Spalte für die linke Hand als auch in der Spalte für die rechte Hand ein + eingetragen wird (Oldfield, 1971). Der

Gesamtwert aller Items wird in einem sog. Lateralitätsquotienten berechnet. Unter den Probanden befanden sich 26 Rechtshänder und ein Linkshänder.

2.6 Die Barratt Impulsivitätsskala (BIS-11)

Die Barratt Impulsivitätsskala ist ein Fragebogen, welcher das Persönlichkeits- und Verhaltenskonstrukt von Impulsivität anhand 30 Verhaltensbeschreibungen bewertet (Patton et al., 1995). Impulsivität wird in drei Komponenten (Aufmerksamkeit, motorische Impulsivität und Voraussicht) aufgeteilt. Es gibt zu jeder Verhaltensbeschreibung jeweils vier Antwortmöglichkeiten, welche die Häufigkeit der Verhaltensweise angeben.

In der Kategorie Aufmerksamkeit erzielten die Probanden durchschnittlich $14,55 \pm 2,30$ Punkte. Bei motorischer Impulsivität konnten $20,09 \pm 2,59$ Punkte und bei Voraussicht $25,27 \pm 4,43$ Punkte gezählt werden.

Ein Vergleich zwischen den beiden Versuchsgruppen (wie bei der visuellen Analogskala zur Motivation und Anstrengung erfolgt) wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt aber könnte einen interessanten Aspekt im Rahmen von weiteren Untersuchungen darstellen.

2.7 State-Trait-Ärgerausdrucks-Inventar (STAXI)

Dieses Verfahren misst die Intensität von situationsbedingtem Ärger (Zustandsärger) und vier dispositionellen Ärgerdimensionen (Eigenschaftsärger, nach innen gerichteter Ärger, nach außen gerichteter Ärger, Ärgerkontrolle). Bei jeder der insgesamt 24 Fragen steht eine vierstufige Antwortskala („fast nie“ bis „fast immer“) zur Verfügung (Schwenkmezger, 1992). Situationsbedingter Ärger wurde von den Versuchsteilnehmern vormittags mit $10,70 \pm 1,27$ Punkten und nachmittags mit $10,60 \pm 1,086$ Punkten bewertet. Durchschnittlich erreichten die Probanden bei Eigenschaftsärger $15,67 \pm 3,77$ Punkte, bei nach innen gerichtetem Ärger $14,93 \pm 4,22$ Punkte, bei nach außen gerichtetem Ärger $11,37 \pm 3,07$ und in der Kategorie Ärgerkontrolle $23,26 \pm 3,19$ Punkte.

2.8 Wortschatztest (WST)

Der WST wird zur Schätzung der verbalen Intelligenz und des Sprachverständnisses eingesetzt. Bei den 40 Aufgaben müssen Wörter wiedererkannt werden. Pro Aufgabe werden jeweils ein Zielwort und fünf Distraktoren angegeben. Der Schwierigkeitsgrad steigt dabei von Aufgabe zu Aufgabe. Die Anzahl der richtigen Antworten ergibt einen Rohwert, der mittels Normwert-Tabelle in einen Standard-Skalenwert transformiert werden kann (Schmidt & Metzler, 1992).

Die Probanden erzielten einen durchschnittlichen Rohwert von $36,07 \pm 2,17$, welcher einen Standard-Skalenwert (IQ) im Mittel von $118,37 \pm 8,55$ ergab

Fragebogen	Einzelaspekte	Mittelwert	Standardabweichung	
Soziodemographischer Fragebogen	Alter in Jahren	24,04	2,71	
	Anzahl der Ausbildungsjahre	16,44	1,79	
	Anzahl der Berufsjahre	0,63	2,37	
Beck Depressionsinventar (BDI)		2,70	2,49	
NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI)	Neurotizismus	1,22	0,48	
	Extraversion	2,37	0,56	
	Offenheit für Erfahrung	2,59	0,56	
	Verträglichkeit	2,55	0,42	
	Gewissenhaftigkeit	2,72	0,45	
Visuelle Analogskala zur Motivation und Anstrengung	Schwierigkeit der Aufgabe	1,89	0,75	
	Mühe	4,30	0,72	
	Anstrengung	2,63	0,84	
	Eigene Leistung	3,41	0,75	
Barratt Impulsivitätsskala (BIS-11)	Aufmerksamkeit	14,55	2,30	
	Motorische Impulsivität	20,09	2,59	
	Voraussicht	25,27	4,43	
State-Trait-Ärgerausdrucks-Inventar (STAXI)	Situationsbedingter Ärger	1. Termin	10,70	1,27
		2. Termin	10,60	1,09
	Eigenschaftsärger	15,67	3,77	
	Nach innen gerichteter Ärger	14,93	4,22	
	Nach aussen gerichteter Ärger	11,37	3,07	
Ärgerkontrolle	23,26	3,19		
Wortschatztest (WST)	Rohwert	36,07	2,17	
	Standard-Skalenwert (IQ)	118,37	8,55	

Tabelle 3: Ergebnisse der Screeningfragebögen aller Probanden (n = 27)

3 Aufgabenstellung

3.1 Paradigma

Den Probanden wurden zwei Versionen eines Go/NoGo/Entscheidungs-Paradigmas mit vier verschiedenen Bedingungen (Go, NoGo, Volition Reaktion ja/nein bzw. Volition Reaktion rechts/links) vorgegeben. Als auditorische Stimuli dienten drei Sinus-Töne (Dauer 50 ms, Schalldruckpegel 100 dB) unterschiedlicher Höhe, welche paarweise präsentiert wurden. Jeder Proband absolvierte im Voraus einen ca. zehnmütigen Probelauf, der die Versuchspersonen mit den Bedingungen vertraut machen sollte und gleichzeitig das Verständnis der Anweisungen testete.

Die auditorischen Stimuli wurden mithilfe der Präsentations-Software (Version 14.2) erzeugt und den Probanden über Kopfhörern dargeboten. Die Versuchsteilnehmer legten ihren rechten Zeigefinger auf der Taste der Antwortbox ab. Während dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links musste auch der linke Zeigefinger den zweiten Antwortknopf berühren.

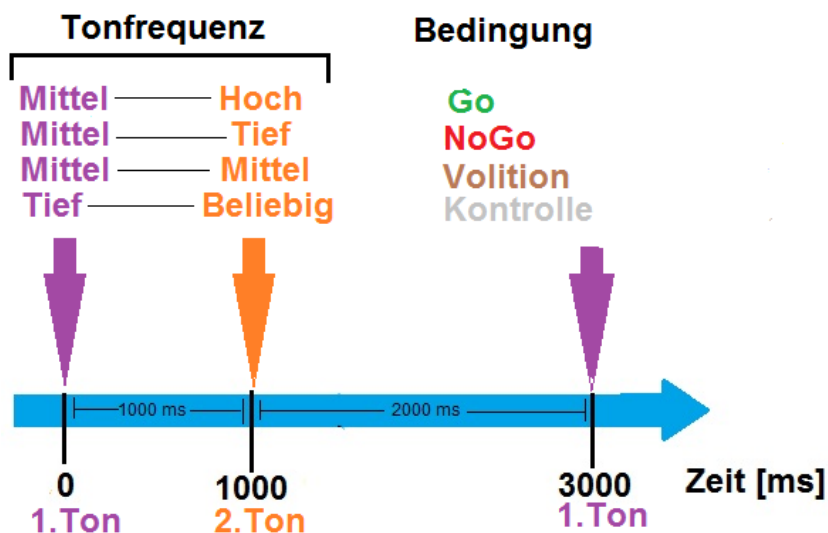


Abbildung 11: Adaptiertes, akustisches Go/NoGo-Paradigma

Auf den ersten Ton folgte nach 1000 ms der zweite Ton. Zwischen dem zweiten Ton und dem ersten Ton der nachfolgenden Sequenz wurde ein zeitlicher Abstand von 2000 ms

eingehalten, sodass sich insgesamt ein 3000 ms langes Intervall zwischen den jeweils ersten Stimuli ergab.

Der Ton mit der mittleren Frequenz (1000 Hz) stellte den Signal-Ton dar, welcher die Probanden aufforderte, die rechte Reaktionstaste zu drücken, falls auf diesen Ton ein hochfrequenter Ton (1300 Hz) folgte (= Go-Bedingung). Die Probanden mussten reagieren, indem sie mit ihrem rechten Zeigefinger so schnell wie möglich eine Taste drücken, ohne dabei einen Fehler zu begehen.

Es durfte keine motorische Handlung ausgeführt werden, wenn nach dem mittelfrequenten Ton ein Ton tiefer Frequenz wahrgenommen wurde (=NoGo-Bedingung, Inhibition).

Beide Entscheidungsparadigmen, sowohl Reaktion ja/nein als auch Reaktion links/rechts, beinhalteten passive Höraufgaben, welche als Kontrollbedingung dienten. In dieser Kontrollbedingung wurde der niedrigfrequente Ton zuerst präsentiert, was dem Probanden signalisierte, dass keine motorische Reaktion ausgeführt werden muss, unabhängig von der Frequenz des zweiten Tones (Kontrollbedingung: 800–1000 Hz). Die Bedingungen wurden in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten und die Probanden wurden angewiesen, unmittelbar nach dem zweiten Ton zu reagieren und Fehler zu vermeiden. Die Go-Bedingung wurde insgesamt 160-mal präsentiert, die anderen Tonpaare jeweils 80-mal. Das Interstimulusintervall betrug 3 Sekunden.

3.2 Teilerperimente

Sobald auf den ersten Ton ein zweiter Ton mittlerer Frequenz folgte, bestand die Möglichkeit, frei zu entscheiden, ob bzw. wie reagiert wird (= Entscheidungsbedingung). Bezüglich dieser Entscheidungsbedingung unterscheiden sich die zwei Versuchsgruppen:

Die erste Versuchsgruppe sollte sich für oder gegen einen Tastendruck entscheiden (= Entscheidungsbedingung Reaktion ja/nein). Die andere Hälfte der Probanden hatte die Wahl, entweder die rechte oder die linke Reaktionstaste zu drücken (= Entscheidungsbedingung Reaktion rechts/links).

Bei beiden Varianten wurden die Probanden gebeten, sich bei jedem Tonpaar neu zu entscheiden. Außerdem sollte darauf geachtet werden, die verschiedenen Antworten insgesamt ungefähr gleich oft gewählt werden ohne jedoch mitzuzählen.

Bedingung	1. Ton (Frequenz)	2. Ton (Frequenz)	Gewünschte Reaktion
Go	Mittel	Hoch	Rechte Taste drücken
NoGo	Mittel	Tief	Nicht drücken
Volition	Mittel	Mittel	Gruppe 1: rechte Taste drücken oder nicht Gruppe 2: rechte oder linke Taste drücken
Kontrolle	Tief	beliebig	Nicht drücken

Tabelle 4: Teilexperimente des adaptierten Go/NoGo-Paradigmas

3.3 Messung der Reaktionszeiten

Die Präsentations-Software registrierte Reaktionszeiten, Versäumnisfehler bei Go-Signalen sowie Fehler bei NoGo-Bedingungen und passiven Höraufgaben. Als Fehler wurde jede Reaktion, die mit mehr als 1500 ms Verzögerung in der Go-Bedingung ausgeführt wurde, angesehen. Die Reaktionszeiten wurden für die Go- und die Entscheidungs-Bedingung getrennt analysiert. Sowohl die Fehlerraten als auch die Reaktionszeiten wurden zwischen den Bedingungen mittels ANOVA verglichen. T-Tests wurden verwendet, um Unterschiede bezüglich Reaktionszeiten, Fehlerquoten und den Anteil an richtigen Reaktionen zwischen den Paradigmen Entscheidung Reaktion ja/nein und Entscheidung Reaktion rechts/links zu vergleichen.

4 EEG-Daten-Aquirierung und -Auswertung

4.1 Durchführung

Die EEG-Aufzeichnungen fanden in der neurophysiologischen Abteilung der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Ludwig-Maximilians-Universität München statt. Am jeweiligen Untersuchungstag sollten die Probanden zunächst die Fragebögen bearbeiten. Um Hörfehler auszuschließen, wurde vor der EEG-Ableitung bei jedem Probanden ein Hörtest (Audiogramm von 0,1 kHz bis 8 kHz, Audiometer: Philips HP 8745/10) durchgeführt. Die Probanden mussten bei einer Frequenz von 1000 Hz mindestens ein Hörvermögen von 30 dB aufweisen, um an der Studie teilnehmen zu dürfen.

Vor dem ersten Untersuchungstermin wurden die Probanden ausführlich über die Untersuchung aufgeklärt. Für die Ableitung nahmen die Probanden in einem elektromagnetisch abgeschirmten, schalldichten Raum Platz. Durch eine Glasscheibe konnten die Probanden vom Nebenraum aus während der gesamten Untersuchung beobachtet werden. Den Probanden wurden EEG-Hauben der Firma Easycap GmbH (Herrsching-Breitbrunn, Deutschland) unter Verwendung eines elektrisch leitenden Elektrodengels (Abralyt 2000, Easycap, Herrsching-Breitbrunn, Deutschland) aufgesetzt. Die 32 Silber/Silberchlorid-Elektroden wurden entsprechend dem internationalen 10/20 System auf dem Skalp platziert, und um die Zusatzelektroden Fc1, Fc2, Fc5, Fc6, T1, T2, Cp5, Cp6, P9 und P10 ergänzt. Als gemeinsame Referenzelektrode diente die Cz-Elektrode. Horizontale Augenbewegungen wurden von der EOG-Elektrode (neben dem rechten Auge) erfasst. Der Widerstand zwischen den Elektroden und der Kopfhaut wurde im Vorfeld geprüft und betrug weniger als 5 k Ω . Während der Untersuchungen sollten die Probanden die Gesichtsmuskulatur entspannen und die Augen ruhig und geschlossen halten.

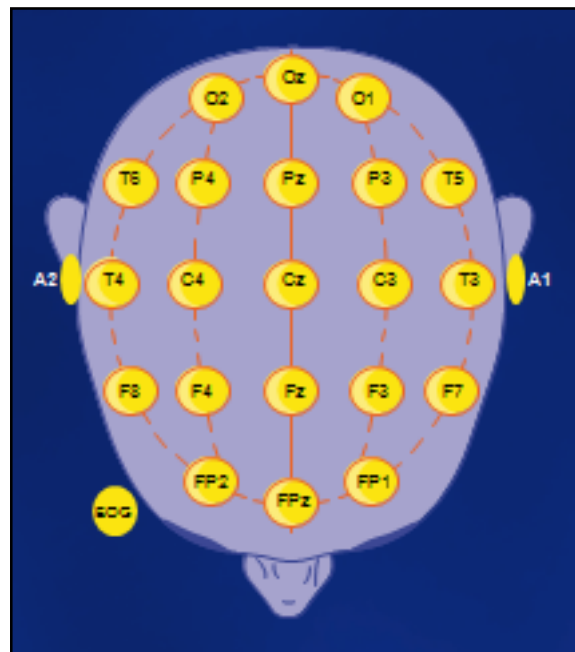


Abbildung 12: Schematische Darstellung des internationalen 10-20-Systems der Elektrodenanordnung, ohne Zusatzelektroden (<http://www.servier.de/medical-art/vorklinische-untersuchung>, Folie 7, bearbeitet, mit freundlicher Genehmigung von Les Laboratoires Servier, Copyright © 2006)

4.2 Aufzeichnung und Analyse der EEG-Daten

Für die EEG-Aufzeichnung wurde ein 32-Kanal-EEG-Gerät der Marke Neuroscan verwendet. Das EEG wurde mit einer Aufnahme­rate von 1000 Hz ohne Filterung aufgezeichnet. Mithilfe des BrainVision Analyzers (Brain Products GmbH, Gilching, Deutschland) wurden die Daten ausgewertet. Dafür wurden die EEG-Kurven auf eine gemeinsame, durchschnittliche Aktivität referenziert. Es wurden ein 1 Hz high-pass-Filter (slope 24 B/oct) sowie ein 100 Hz low-pass-Filter (slope 24 B/oct) verwendet. Anschließend erfolgte eine automatische Augenbewegungsartefakt-Korrektur nach Gratton & Coles. Für jede der vier Aufgabenbedingungen (Go, NoGo, Entscheidung, Kontrolle) erfolgte eine Unterteilung in 2000 ms lange Segmente, zeitlich gebunden an den Beginn des ersten Stimulus jeden Tonpaares. Das Aufnahmeintervall begann 1000 ms vor der Präsentation des zweiten Tones, welcher ausschlaggebend dafür war, welche Aufgabe ausgeführt werden musste.

Dann erfolgte eine sog. Baseline-Korrektur, bei der die Grundaktivität jeden Segmentes justiert wurde. Hierbei wurde ein neues Intervall (-350 ms bis 1050 ms) innerhalb eines Segments bestimmt, dessen mittlerer Spannungswert dem neuen Nullpunkt der Segmentwerte entsprach. Bei der Artefakt-Korrektur wurden folgende Kanäle berücksichtigt: C3, C4, Cz, F3, F4, Fz, P3, P4 und Pz. Die automatische Artefaktelimination erfolgte unter der Berücksichtigung des Amplitudenkriteriums von +/- 70 μ V. Probanden, bei denen nach der Korrektur weniger als 25 Segmente übrigblieben, konnten nicht in die Auswertung einbezogen werden. Daraufhin konnten die EEG-Wellen gemittelt werden. Die gemittelten ERP-Wellen wurden für die Bedingungen Go, NoGo und Entscheidung separat berechnet. Versuche mit falschen Antworten wurden bereits vor der Mittelung verworfen.

4.3 Auswertung ereigniskorrelierter Potentiale

Für die drei Aufgabenbedingungen (Go, NoGo, Entscheidung) wurde die Höhe der N2 und P3 in den Elektroden Fz, Cz und Pz bestimmt. Die N2-Komponente wurde als das größte relative Minimum in einem Zeitfenster von 160–230 ms definiert und die P300 als das Maximum im Bereich von 230–550 ms nach der Aufgabenpräsentation festgelegt.

4.4 Wavelet-Analyse

Die Wavelet-Transformation erlaubt eine Darstellung der zeitlichen Dynamik von oszillatorischen Antworten. Die Wavelet-Transformation berechnet die Übereinstimmung des EEG-Signals mit dem verwendeten Wavelet über den gesamten zeitlichen Verlauf des EEG-Signals und für verschiedene Frequenzbereiche. So liefert sie zu jedem Zeitpunkt der EEG-Aufzeichnung Informationen über die spektrale Zusammensetzung des Signals (Leicht, 2007). Um evozierte Theta-/Alpha-/Beta- und Gamma-Aktivität zu berechnen, verwendete man in dieser Studie eine komplexe Morlet Wavelet Transformation (kontinuierliche Wavelet Transformation, Morlet Complex Wavelet, Morlet Parameter $c = 5$), welche auf die gemittelten ERPs angewandt wurde. Mit Hilfe des Morlet-Parameters c kann das von den einzelnen Wavelets abgedeckte Frequenzspektrum definiert werden um die Frequenz-Auflösung einer Morlet-Wavelet-Analyse festzulegen. Die Frequenz-Verteilung eines Morlet-Wavelets entspricht annähernd einer Gauss-förmigen Funktion. Die Standardabweichung dieser Funktion errechnet sich als $1/c$ (Leicht, 2007).

Der zu untersuchende Frequenzbereich umfasste die Frequenzen von 1 bis 60 Hz, welcher in 40 lineare Frequenzschritte unterteilt wurde. Für die Frequenzbandanalyse wurden insgesamt 4 verschiedene Frequenzbereiche bestimmt. Für jeden Probanden wurden individuelle Parameter berechnet: Der Thetabandbereich umfasste die Frequenzen 4 bis 7 Hz und der Alphabandbereich die Frequenzen 8,06 bis 12,09 Hz (durchschn.: 10,08 Hz). Den Betafrequenzbereich repräsentierten Frequenzen von 20,16 bis 30,25 Hz (durchschnittlich: 25,21 Hz) und für die Gammabandaktivität wurde im Frequenzbereich von 32,27 bis 48,40 Hz (durchschn.: 38,82 Hz) untersucht.

Im Zeitintervall von 0–500 ms nach der Präsentation des 2. Signaltons jeden Tonpaares wurde Theta-/ Alpha-/ Beta-/ Gamma-Power anhand der Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz untersucht.

5 Statistische Auswertung

Die Daten wurden mit SPSS Statistics Version 19 ausgewertet. Das Signifikanzniveau betrug 0,05 und p-Werte zwischen 0,05 und 0,1 wurden als Trend interpretiert.

Um Unterschiede zwischen Elektrodenposition und Aufgabenbedingung sowie zwischen den beiden Entscheidungsvarianten (Entscheidung Reaktion ja/nein bzw. rechts/links) festzustellen, wurden ANOVAs berechnet.

Zur Bestimmung der N2- und P3-Amplitudenhöhe wurden ANOVAs mit den Intrasubjekt-Faktoren Bedingung (Go, NoGo, Entscheidung) sowie Elektrodenposition (Fz, Cz, Pz) ermittelt. Ergab der Mauchly-Test auf Sphärizität ein signifikantes Ergebnis, so wurde die Anzahl der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt. Bei signifikanten Ergebnissen wurden in einem Post-hoc-Test Unterschiede zwischen den Bedingungen bzw. den Elektroden auf Signifikanz geprüft. Es erfolgte eine Bonferroni-Korrektur.

C. Ergebnisse

1 Ergebnisse Verhaltensdaten

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten waren signifikant länger in Entscheidungsversuchen als in Go-Aufgaben im Entscheidungsparadigma Reaktion ja/nein [$F(1; 13) = 101,553$; $p < 0,001$] und im Entscheidungsparadigma Reaktion rechts/links [$F(1; 12) = 31,321$; $p < 0,001$]. Der Anteil an Antworten war signifikant erhöht in Go- im Vergleich zu den Voluntary-Selection Bedingungen: Volition Reaktion ja/nein [$F(1; 13) = 200,96$; $p < 0,001$] und Volition Reaktion rechts/links [$F(1; 12) = 16,78$; $p = 0,001$].

Reaktionszeit [ms]					
	Paradigma Reaktion ja/nein		Paradigma Reaktion rechts/links		p-Wert
	M	SD	M	SD	
Go	515,97	116,93	568,65	127,49	$p = 0,273$
Entscheidung	810,97	178,95	850,21	242,42	$p = 0,635$
p-Wert Reaktionszeit	$p < 0,001$		$p < 0,001$		
Prozentualer Anteil an Antworten [%]					
	Paradigma Reaktion ja/nein		Paradigma Reaktion rechts/links		p-Wert
	M	SD	M	SD	
Go	97,95	1,81	97,31	3,34	$p = 0,543$
Entscheidung	56,34	10,63	94,38	3,18	$p < 0,001$
p-Wert Prozentualer Anteil an Antworten	$p < 0,001$		$p = 0,001$		
Fehlerrate [%]					
	Paradigma Reaktion ja/nein		Paradigma Reaktion rechts/links		p-Wert
	M	SD	M	SD	
Reaktionen während NoGo- oder Kontrollbedingungen	3,74	2,41	2,23	2,50	$p = 0,122$

Tabelle 5: Ergebnisse Verhaltensdaten; Abkürzung: M: Mittelwert; SD: Standardabweichung; ms: Millisekunden; %: Prozentsatz

Die Fehlerrate unterschied sich nicht signifikant zwischen den Aufgaben. Der Vergleich der Reaktionszeiten zwischen den Entscheidungsvarianten Reaktion ja/nein und Reaktion rechts/links zeigte vergleichbare Werte ($p = 0,273$) und einen vergleichbaren Anteil richtiger Antworten ($p = 0,543$) während der Go-Bedingungen. Auch bei der Entscheidungs-Aufgabe unterschieden sich die Reaktionszeiten nicht signifikant ($p = 0,635$). Der Anteil an Antworten war signifikant größer im Entscheidungsparadigma Reaktion rechts/links im Vergleich zu Reaktion ja/nein ($p < 0,001$). Probanden drückten die linke Taste bei 53,7 % aller Entscheidungs-Aufgaben (Reaktionszeit: $M = 861,6$ ms) und die rechte Taste bei 45,4 % der Aufgaben (Reaktionszeit: $M = 840,3$ ms). Beide Gruppen wiesen vergleichbare Fehlerraten auf ($p = 0,122$).

1.1 Ergebnisse neurophysiologischer Korrelate bei der Entscheidung Reaktion ja/nein

1.1.1 Ergebnisse Ereigniskorrelierte Potentiale bei der Entscheidung Reaktion ja/nein

1.1.1.1 N2 bei Der Entscheidung Reaktion ja/nein

Hinsichtlich der N2-Amplitude konnte zwischen den Bedingungen (Go, NoGo, Entscheidung) [$F(2; 26) = 6,376$; $p = 0,006$] sowie zwischen den Elektrodenpositionen (Fz, Cz, Pz) [$F(2; 26) = 4,922$; $p = 0,034$] ein signifikanter Unterschied gezeigt werden. Die Interaktion zwischen Elektrodenposition und experimenteller Bedingung war nicht signifikant [$F(4; 52) = 1,918$; $p = 0,162$]. Desweiteren wurden kleinere Amplituden in der Go-Bedingung im Vergleich zur Entscheidungs- ($p = 0,015$) oder zur NoGo-Bedingung ($p = 0,032$) gemessen. Die N2-Amplitude war in der Fz größer als in der Cz ($p = 0,010$). Siehe Abbildungen 13 a) bis c).

1.1.1.2 P3 bei Der Entscheidung Reaktion ja/nein

Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen [$F(2; 26) = 23,267$; $p < 0,001$] und zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 26) = 3,437$; $p = 0,047$], sowie ein signifikanter Interaktionseffekt (Bedingung x Elektrodenposition) [$F(4; 52) = 9,392$; $p < 0,001$]. Im Vergleich zu Go-Aufgaben ($p < 0,001$) und zur Entscheidungs-Bedingung ($p = 0,008$) war die P3-Amplitude in NoGo-Aufgaben erhöht. Die mit Entscheidung assoziierte P3-Amplitude zeigte höhere Werte als in der Go-Bedingung ($p = 0,005$). Zudem erwiesen sich in der Cz signifikant höhere P3-Amplituden als in der Fz ($p = 0,020$). Siehe Abbildungen 13 a) bis c).

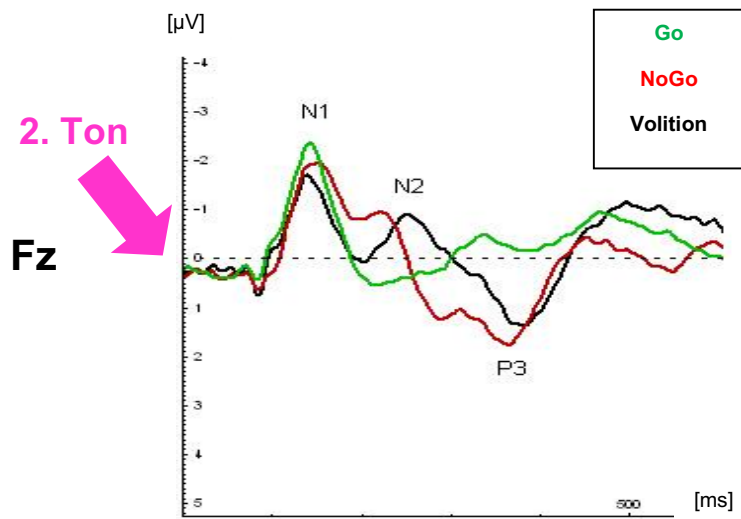


Abbildung 13 a)

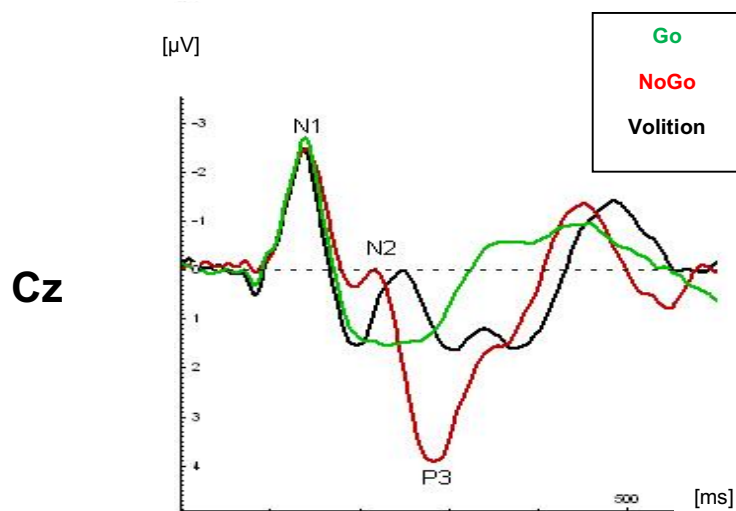


Abbildung 13 b)

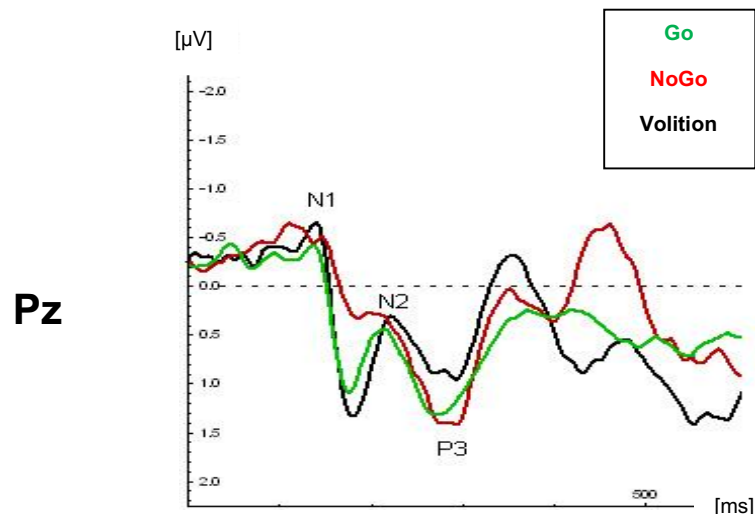


Abbildung 13 c)

Abbildungen 13 a) - c): ERPs bei der Entscheidung Reaktion ja/nein (schwarz) sowie bei der Go- (grün) und NoGo-Bedingung (rot) in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.1.2 Ergebnisse Frequenzbandanalyse bei der Entscheidung Reaktion ja/nein

1.1.2.1 Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein

Theta-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 5,083; p = 0,010$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 52) = 81,956; p < 0,001$]. Der Interaktionseffekt zwischen Bedingung und Elektrodenposition war ebenfalls signifikant [$F(4; 104) = 0,835; p = 0,031$]. Thetaaktivität war signifikant ausgeprägter in der Entscheidungs-Bedingung im Vergleich zu Go-Aufgaben ($p = 0,049$). Die Thetaaktivität von Entscheidungsaufgaben und NoGo-Aufgaben unterschied sich nicht ($p = 1,000$). NoGo-Aufgaben zeigten höhere Theta-Aktivität als Go-Aufgaben ($p = 0,016$). Theta-Aktivität war v.a. in zentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Cz und Fz ($p < 0,001$) sowie zwischen Cz und Pz ($p < 0,001$) waren signifikant. Siehe Abbildungen 14 a) bis c).

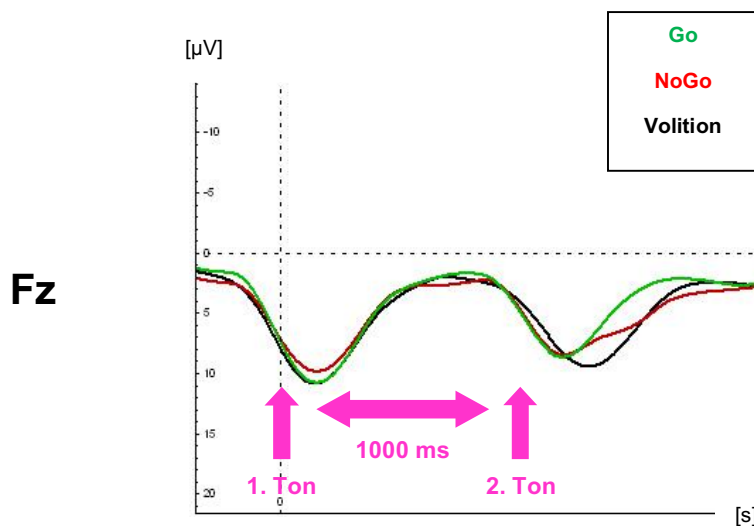


Abbildung 14 a)

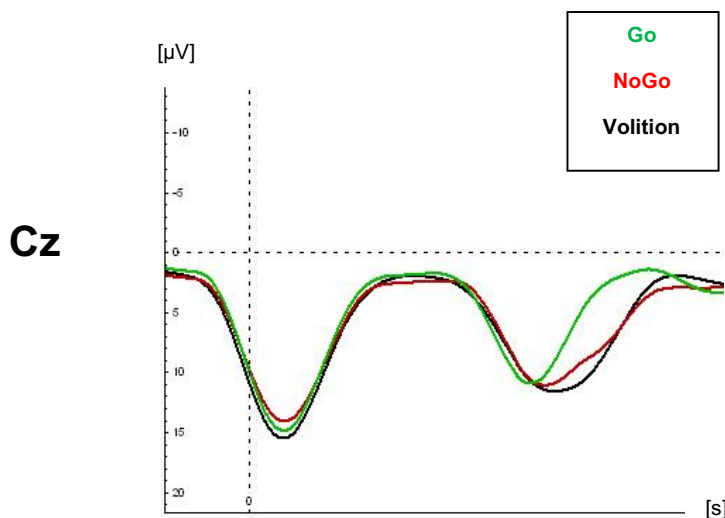


Abbildung 14 b)

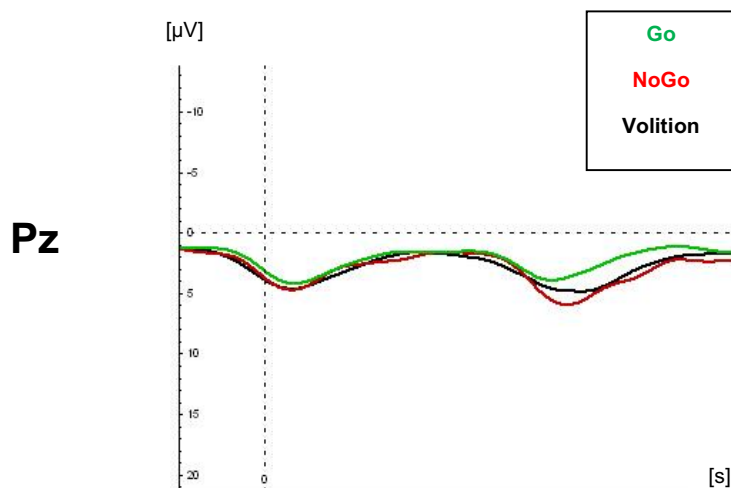


Abbildung 14 c)

Abbildung 14 a) - c): Thetaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.1.2.2 Alfaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein

Hinsichtlich der Alpha-Aktivität zeigte sich im Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 19,332$; $p < 0,001$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 52) = 31,964$; $p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 104) = 4,147$; $p = 0,004$] war ebenfalls signifikant. Alphaaktivität war ausgeprägter in Entscheidungs- im Vergleich zu Go-Aufgaben ($p < 0,001$). Bei NoGo-Aufgaben war die Alphaaktivität signifikant höher als bei Go- ($p < 0,001$) und nicht signifikant höher als bei Entscheidungs-Aufgaben ($p = 1,000$). Alpha-Aktivität war v.a. in zentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Fz und Cz ($p = 0,007$) sowie zwischen Fz und Pz ($p < 0,001$) waren signifikant. Siehe Abbildungen 15 a) bis c).

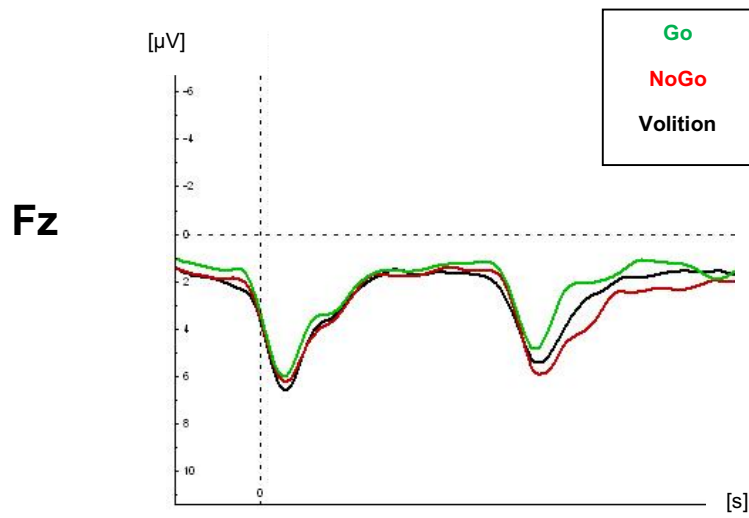


Abbildung 15 a)

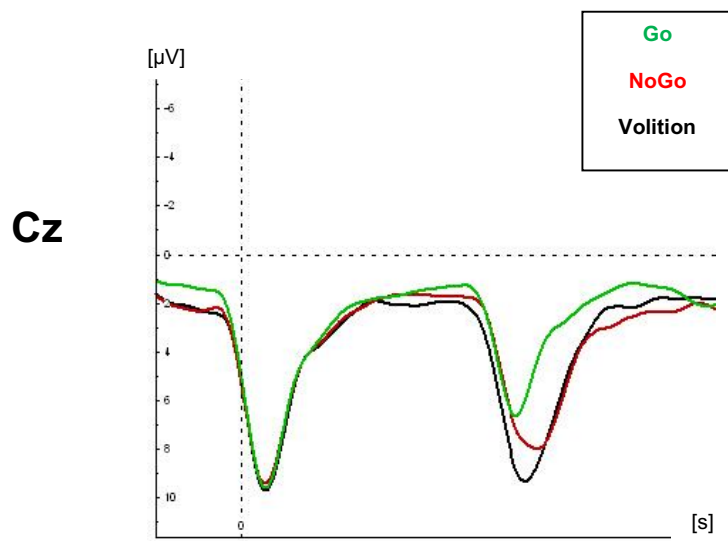


Abbildung 15 b)

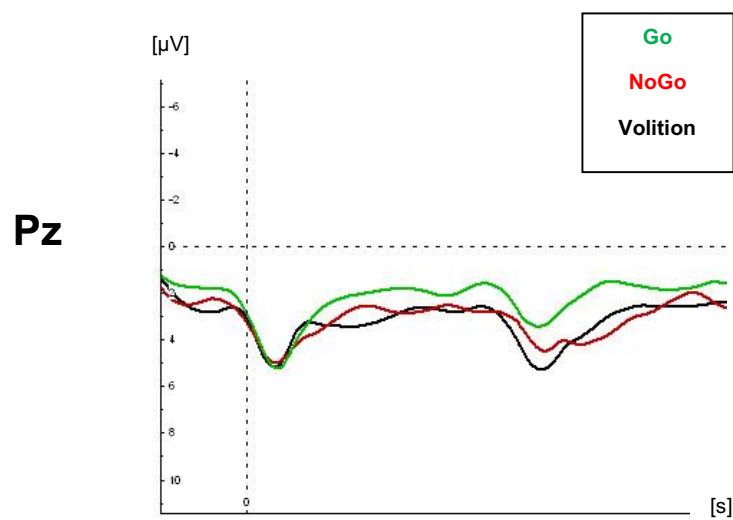


Abbildung 15 c)

Abbildung 15 a) - c): Alphaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.1.2.3 Betaband bei Entscheidung Reaktion ja/nein

Betrachtet man die Beta-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein, so unterschied sich diese signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 9,143$; $p < 0,001$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 52) = 15,961$; $p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 104) = 1,015$; $p = 0,403$] war nicht signifikant. Betaaktivität war ausgeprägter in Entscheidungs- im Vergleich zu Go- ($p < 0,001$) und NoGo-Aufgaben ($p = 0,001$). Beta-Aktivität war v.a. in zentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Cz und Fz ($p = 0,070$) waren nicht signifikant, aber es konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Cz und Pz ($p = 0,010$) sowie zwischen Fz und Pz gefunden werden ($p = 0,007$). Siehe Abbildungen 16 a) bis c).

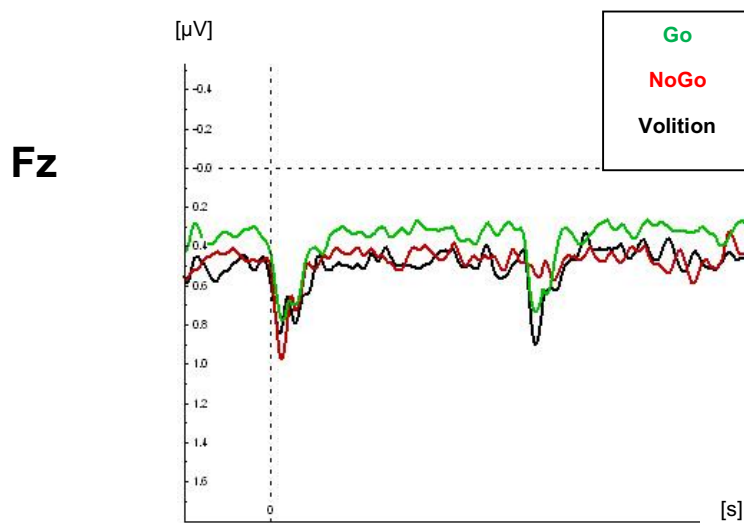


Abbildung 16 a)

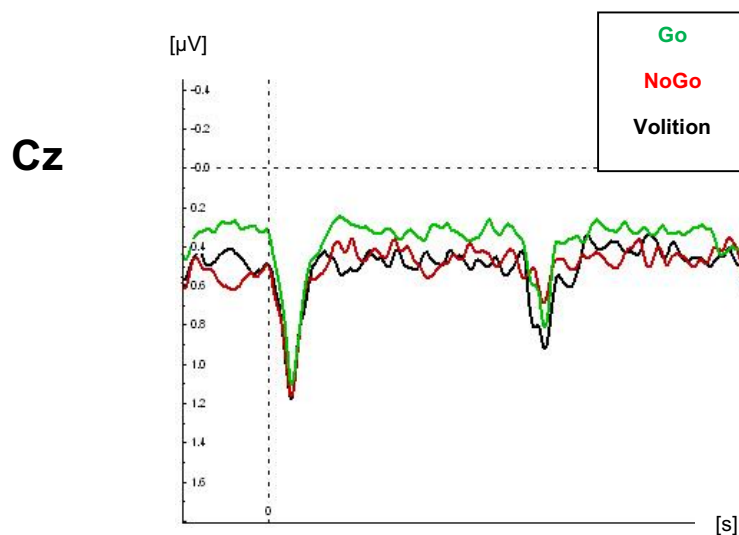


Abbildung 16 b)

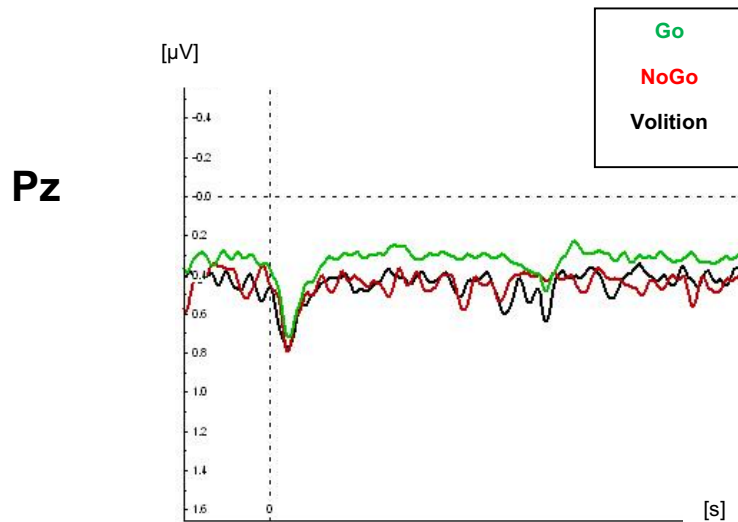


Abbildung 16 c)

Abbildung 16 a) - c): Betaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.1.2.4 Gammaband bei Entscheidung Reaktion ja/nein

Gamma-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein unterschied sich signifikant sowohl zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 9,143; p < 0,001$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 52) = 15,961; p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 104) = 1,031; p < 0,001$] war ebenfalls signifikant. Gammaaktivität war ausgeprägter in Entscheidungs- im Vergleich zu Go- ($p < 0,001$) und NoGo-Aufgaben ($p = 0,003$). Gamma-Aktivität war v.a. in frontalen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Fz und Cz ($p = 0,007$) sowie zwischen Fz und Pz ($p < 0,001$) waren signifikant. Siehe Abbildungen 17 a) bis c).

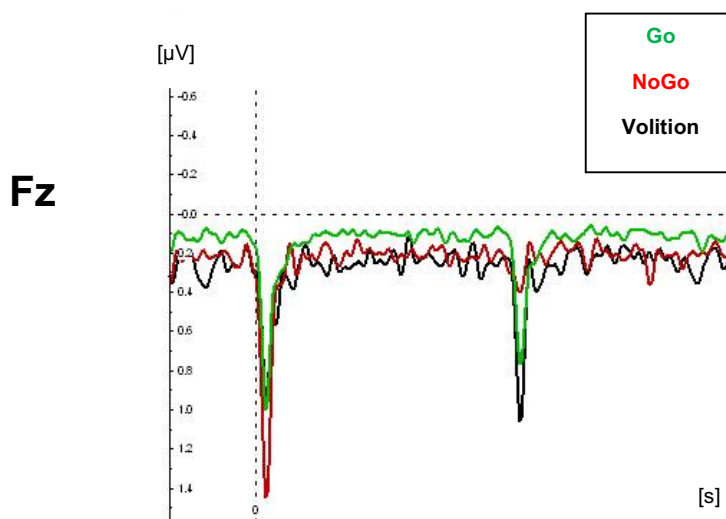


Abbildung 17 a)

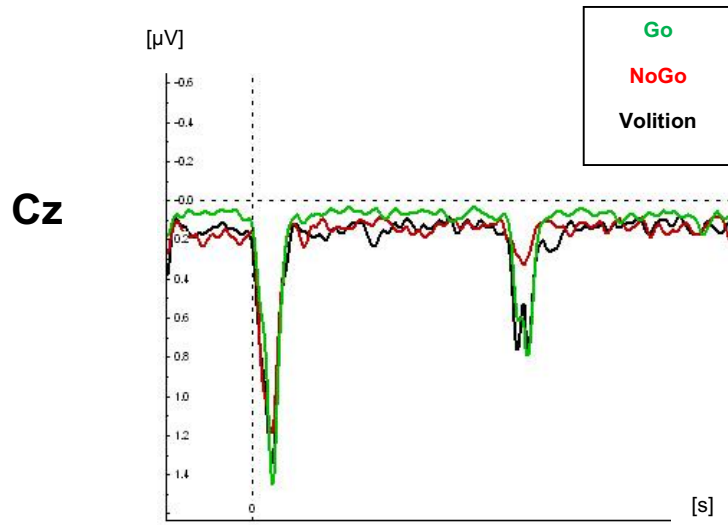


Abbildung 17 b)

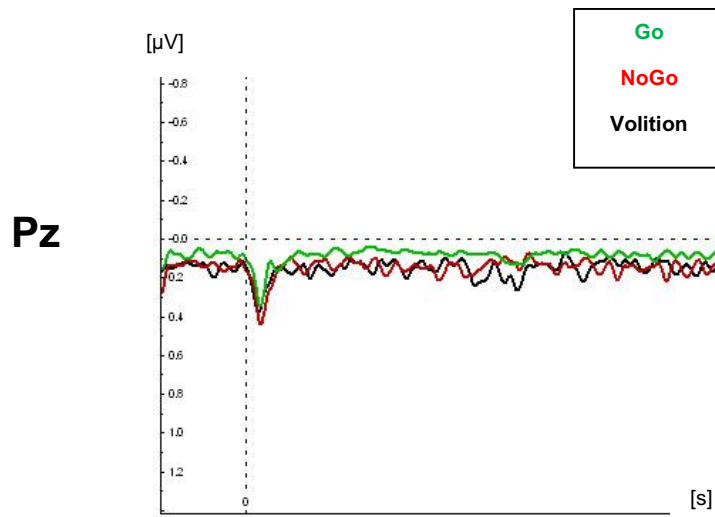


Abbildung 17 c)

Abbildung 17 a) - c): Gammaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.2 Ergebnisse neurophysiologischer Korrelate bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

1.2.1 Ergebnisse Ereigniskorrelierte Potentiale bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

1.2.1.1 N2 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

s zeigten sich bezüglich der N2-Amplitude signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen [$F(2; 24) = 7,163$; $p = 0,004$] und bei der Elektrodenposition [$F(2; 24) = 12,230$; $p < 0,001$]; dies war nicht der Fall beim Interaktionseffekt (Bedingung \times Elektrodenposition) [$F(4; 48) = 0,866$; $p = 0,491$]. Die N2-Amplituden waren negativer in der Fz im Vergleich zur Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p = 0,008$). Außerdem war die N2 kleiner bei Go-Aufgaben als in NoGo- ($p = 0,041$) und Entscheidungs-Aufgaben ($p = 0,041$). Siehe Abbildungen 18 a) bis c).

1.2.1.2 P3 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

Die P3-Amplituden unterschieden sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 24) = 11,218$; $p < 0,001$] und Elektrodenpositionen [$F(2; 24) = 8,574$; $p = 0,007$]. Auch der Interaktionseffekt (Bedingung \times Elektrodenposition) war signifikant [$F(4; 48) = 6,001$; $p = 0,004$]. Go-Bedingungen wiesen kleinere P3-Amplituden im Vergleich zu NoGo- ($p = 0,008$) und Entscheidungs-Bedingungen ($p = 0,008$) auf. Bezüglich der Lokalisation war die P3 in der Fz im Vergleich zur Cz ($p = 0,005$) und Pz ($p = 0,003$) erniedrigt. Siehe Abbildungen 18 a) bis c).

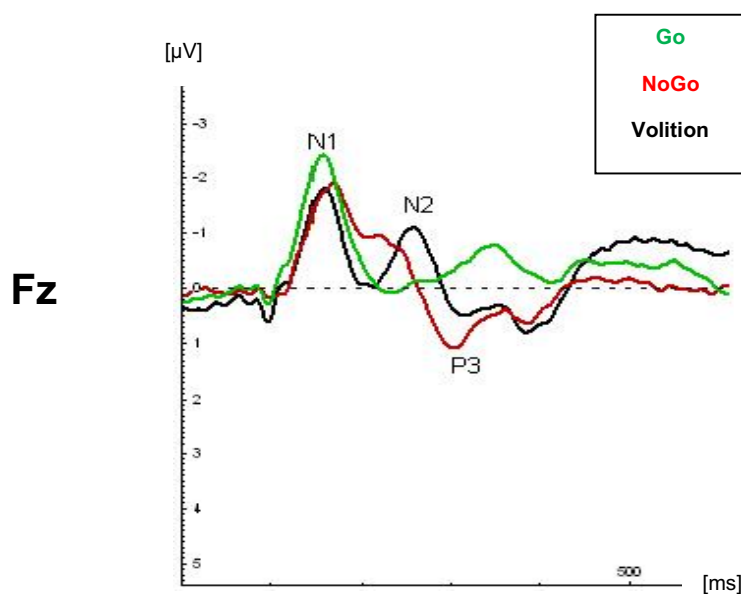


Abbildung 18 a)

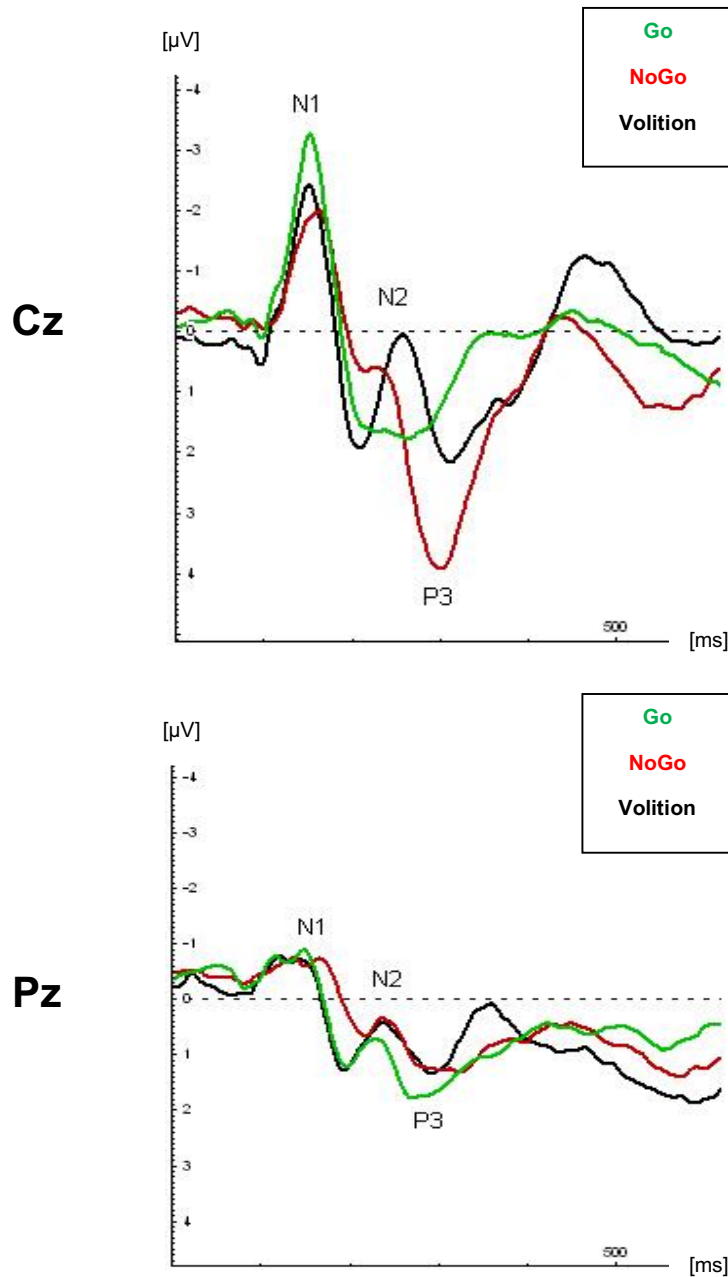


Abbildung 18 a) - c): ERPs bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.2.2 Ergebnisse der Frequenzbandanalyse bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

1.2.2.1 Thetaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

Theta-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links unterschied sich nicht signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 48) = 2,549$; $p = 0,089$] aber signifikant zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 48) = 36,469$; $p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 96) = 14,762$; $p = 0,329$] war nicht signifikant. Thetaaktivität war nicht signifikant ausgeprägter in Entscheidungs- im Vergleich zu Go- ($p = 0,416$) und NoGo-Aufgaben ($p = 0,051$). Thetaaktivität war v.a. in zentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Cz und Fz ($p < 0,001$) sowie zwischen Cz und Pz ($p < 0,001$) waren signifikant. Siehe Abbildungen 19 a) bis c).

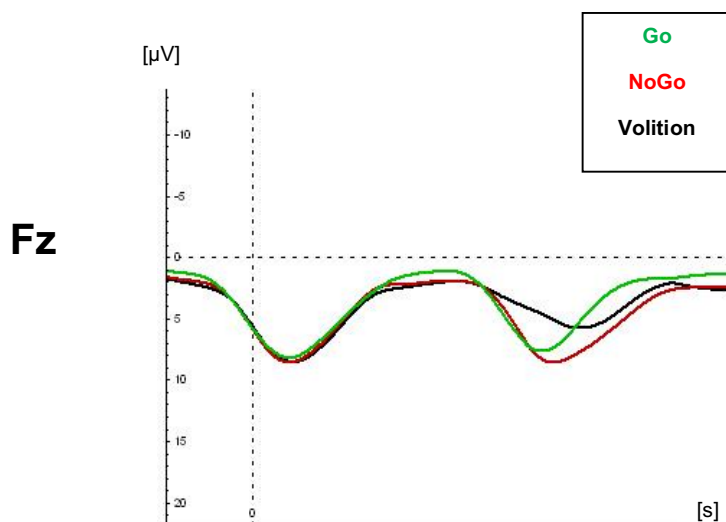


Abbildung 19 a)

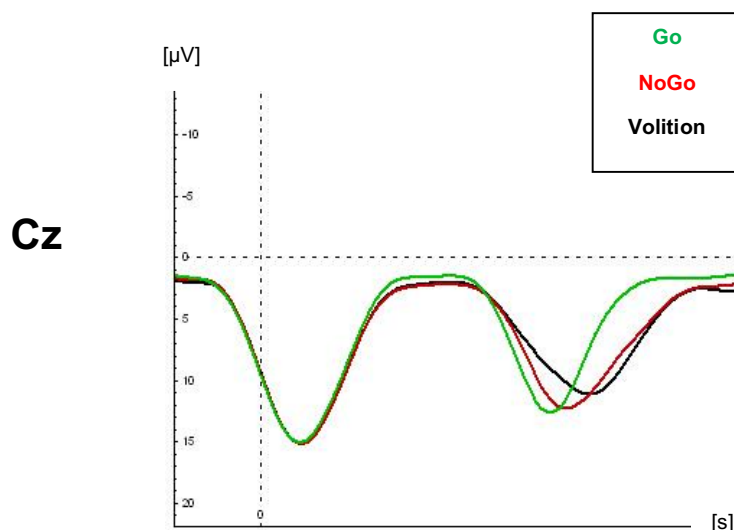


Abbildung 19 b)

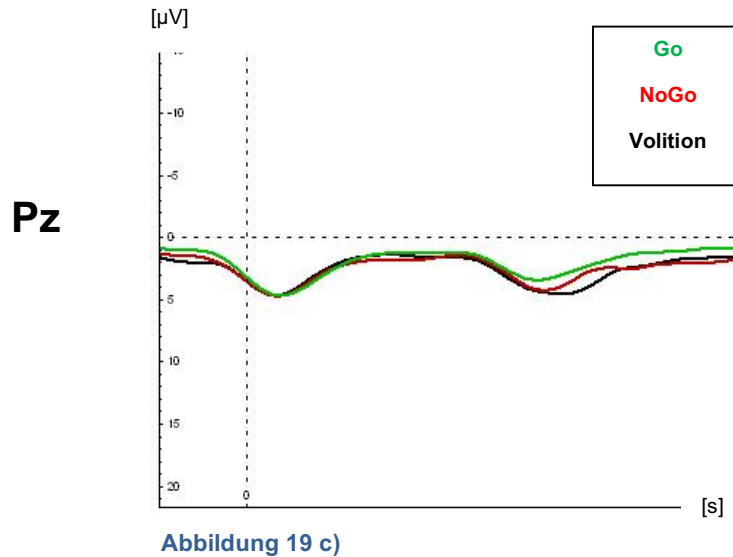
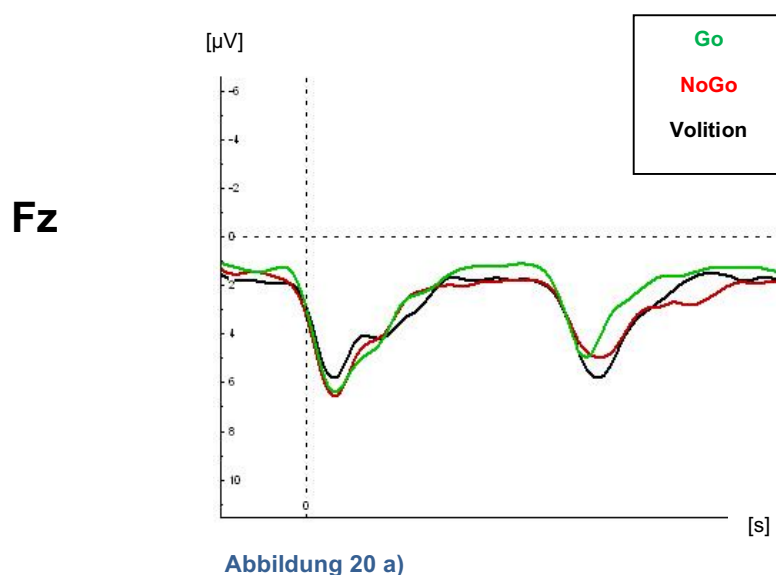


Abbildung 19 a) - c): Thetaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.2.2.2 Alphanband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

Alpha-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 48) = 3,417; p = 0,041$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 48) = 27,966; p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 96) = 1,058; p < 0,382$] war nicht signifikant. Alphaaktivität war signifikant ausgeprägter in Entscheidungs-Aufgaben im Vergleich zu Go- ($p = 0,030$) aber nicht signifikant zu NoGo-Aufgaben ($p = 1,000$). Alpha-Aktivität war v.a. in zentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Cz und Fz ($p < 0,001$) sowie zwischen Cz und Pz ($p < 0,001$) waren signifikant. Siehe Abbildungen 20 a) bis c).



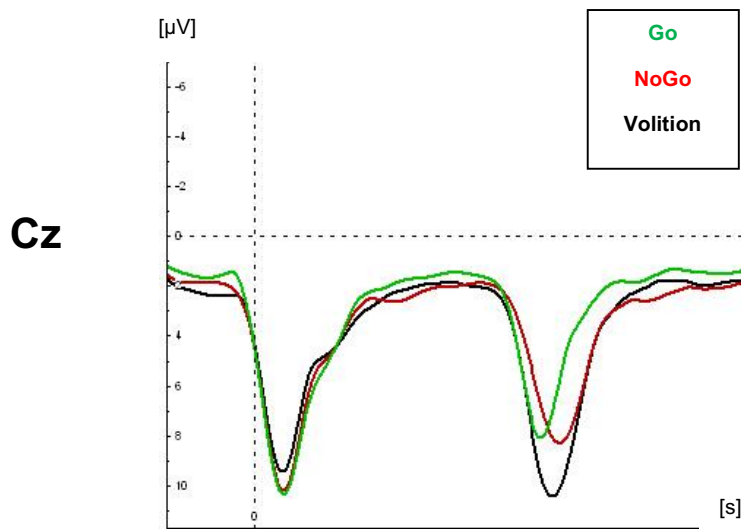


Abbildung 20 b)

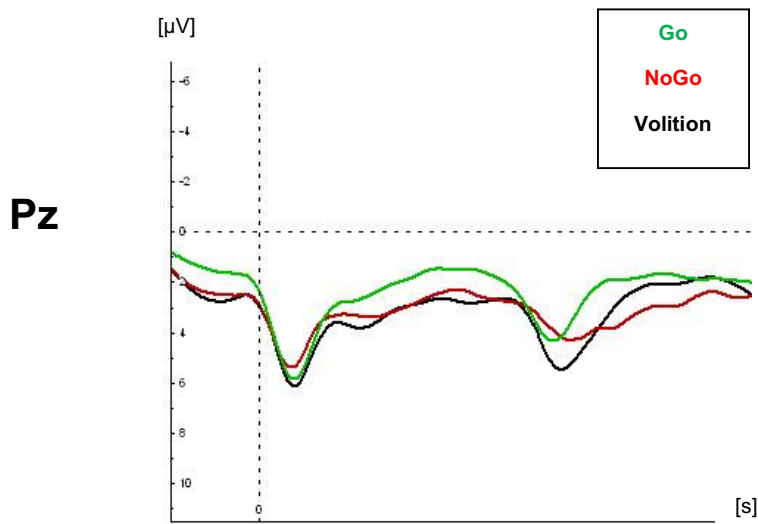


Abbildung 20 c)

Abbildung 20 a) - c): Alphaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.2.2.3 Betaband bei Entscheidung Reaktion rechts/links

Beta-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 48) = 3,758; p = 0,030$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 48) = 14,885; p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 96) = 5,847; p < 0,001$] war ebenfalls signifikant. Betaaktivität war nicht signifikant ausgeprägter in Entscheidungs-Aufgaben im Vergleich zu Go- ($p = 0,277$) aber signifikant ausgeprägter als in NoGo-Aufgaben ($p = 0,010$). Beta-Aktivität war v.a. in zentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Cz und Pz ($p < 0,001$) sowie zwischen Fz und Pz ($p = 0,001$) waren signifikant, nicht signifikant aber zwischen Cz und Fz ($p < 0,138$). Siehe Abbildungen 21 a) bis c).

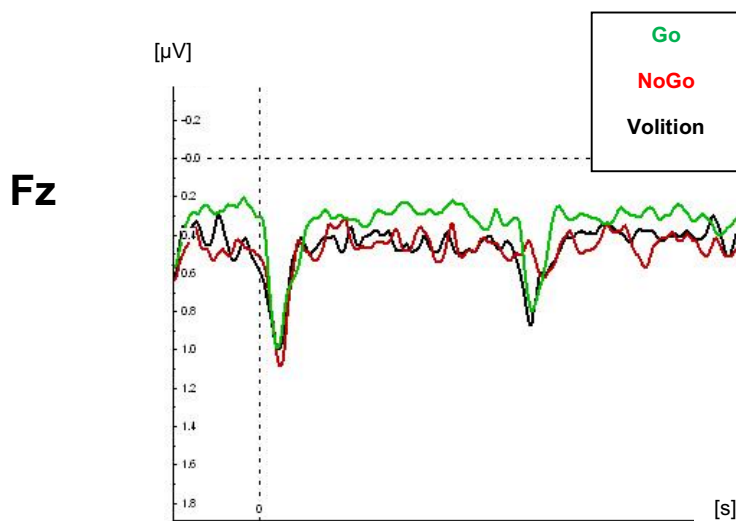


Abbildung 21 a)

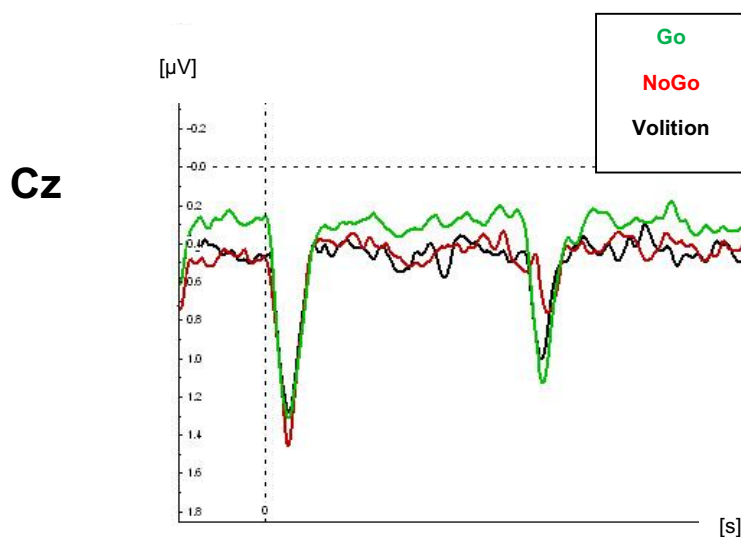


Abbildung 21 b)

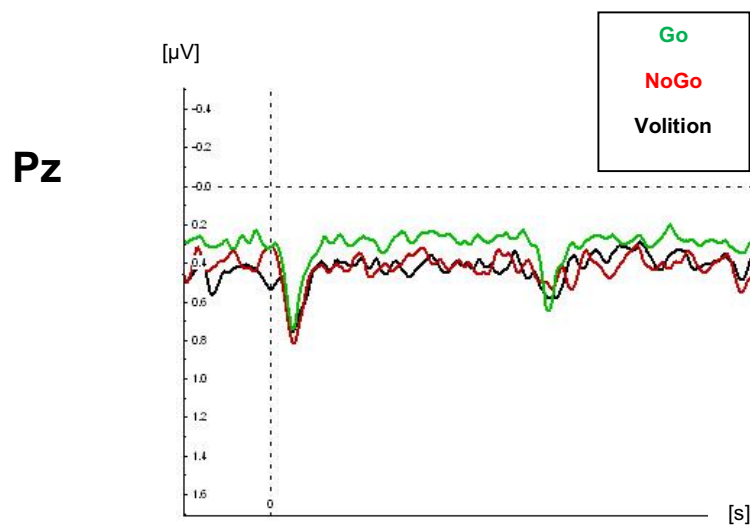


Abbildung 21 c)

Abbildung 21 a) - c): Betaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.2.2.4 Gammaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links

Gamma-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 48) = 11,714$; $p < 0,001$] als auch zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 48) = 17,461$; $p < 0,001$]. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 96) = 6,730$; $p < 0,001$] war ebenfalls signifikant. Gammaaktivität war ausgeprägter in Entscheidungs- im Vergleich zu Go- ($p < 0,044$) und NoGo-Aufgaben ($p < 0,001$). Gamma-Aktivität war v.a. in frontalen und frontozentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Fz und Cz ($p < 0,001$) sowie zwischen Fz und Pz ($p < 0,001$) waren signifikant. Siehe Abbildungen 22 a) bis c).

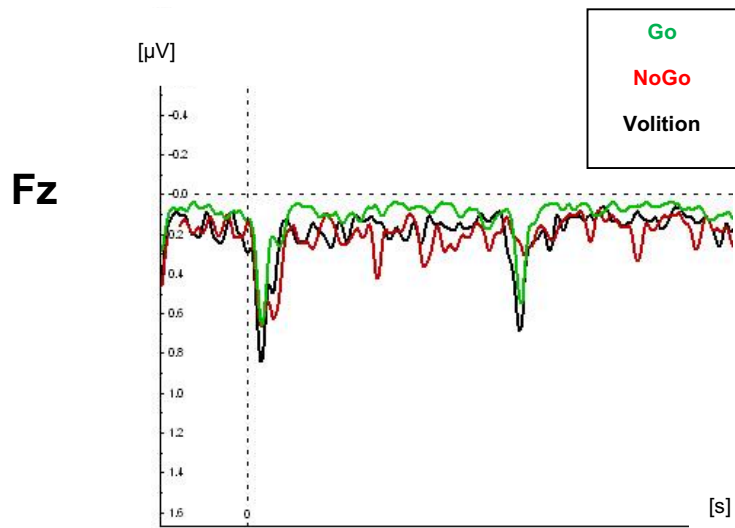


Abbildung 22 a)

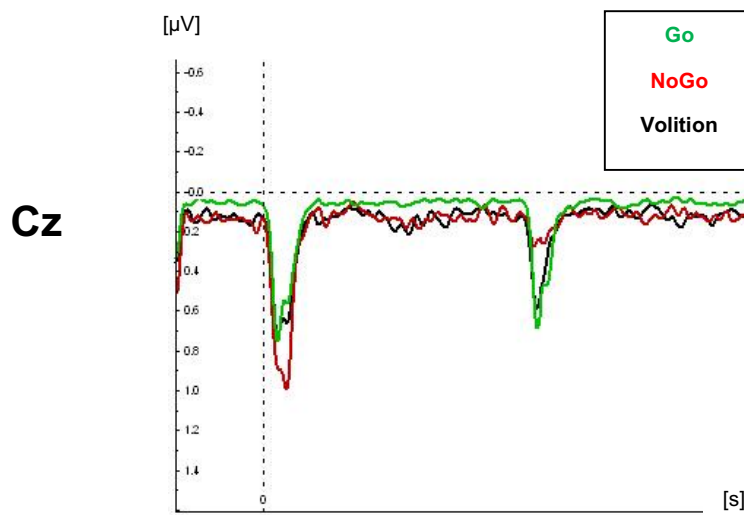


Abbildung 22 b)

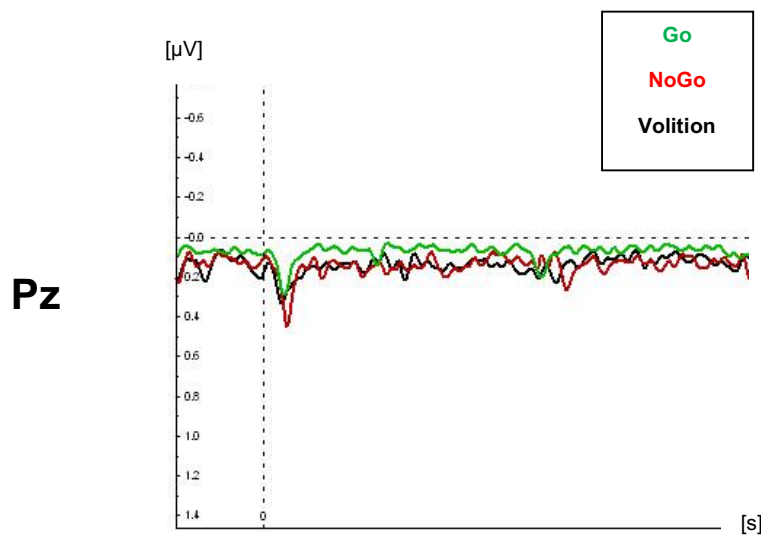


Abbildung 22 c)

Abbildung 22 a) - c): Gammaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz

1.3 Ergebnisse der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

1.3.1 Ergebnisse Ereigniskorrelierte Potentiale bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

1.3.1.1 N2 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

Die Auswertungen zeigen, dass sich die N2-Amplituden signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 50) = 12,947$; $p < 0,001$] und Elektrodenpositionen [$F(2; 50) = 12,997$; $p < 0,001$] unterscheiden. Der Interaktionseffekt Bedingung x Elektrodenposition zeigte einen Trend [$F(4; 100) = 2,533$; $p = 0,076$]. Die Interaktionen Bedingung x Gruppe [$F(2; 50) = 0,181$; $p = 0,835$]; Elektrodenposition x Gruppe [$F(2; 50) = 0,106$; $p = 0,828$] und Bedingung x Elektrodenposition x Gruppe [$F(4; 100) = 0,190$; $p = 0,868$] waren statistisch nicht signifikant. Der Gruppeneffekt (Entscheidung Reaktion ja/nein; Entscheidung Reaktion rechts/links) war statistisch nicht signifikant ($p = 0,921$). Post-hoc-Analysen zeigten erhöhte N2-Amplituden während NoGo-Aufgaben im Vergleich zu Go-Aufgaben ($p = 0,001$) sowie bei Entscheidungs-Aufgaben im Vergleich zur Go-Bedingung ($p = 0,001$). N2-Amplituden waren in Fz höher als in Cz ($p < 0,001$) und Pz ($p = 0,007$).

1.3.1.2 P3 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

Die P3-Amplitude unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 50) = 32,524$; $p < 0,001$], zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 50) = 10,831$; $p < 0,001$] sowie bei der Interaktion Bedingung x Elektrodenposition [$F(4; 100) = 14,495$; $p < 0,001$]. Im Gegensatz dazu waren die Interaktionen zwischen Bedingung x Gruppe [$F(2; 50) = 0,382$; $p = 0,632$], Elektrodenposition x Gruppe [$F(2; 50) = 2,239$; $p = 0,117$] und Bedingung x Elektrodenposition x Gruppe [$F(4; 100) = 0,292$; $p = 0,883$] statistisch nicht signifikant. Außerdem zeigte sich kein signifikanter Effekt zwischen den Gruppen [$F(1; 25) = 0,010$; $p = 0,921$]. Der Post-hoc T-Test zeigte, dass die P3-Amplitude während NoGo-Aufgaben signifikant höher war als bei der Go- ($p < 0,001$) und Entscheidungs-Bedingung ($p = 0,001$). P3-Amplituden in Entscheidungs-Aufgaben waren im Vergleich zur Go-P3 erhöht ($p < 0,001$). In zentralen Hirnregionen zeigten sich höhere P3-Potentiale als in frontalen (Cz > Fz; $p < 0,001$).

1.3.2 Ergebnisse der Frequenzbandanalyse bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

1.3.2.1 Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

Betrachtet man die Theta-Aktivität, so konnten zwischen den Paradigmen Entscheidung Reaktion ja/nein und Entscheidung Reaktion rechts/links keine Unterschiede gefunden werden [$F(1; 25) = 0,653$; $p = 0,427$]. Die Theta-Aktivität unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 50) = 3,789$; $p = 0,029$] und es zeigte sich ein Trend zwischen NoGo- und Go-Bedingung ($p = 0,089$). Die Theta-Antwort zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Elektrodenpositionen [$F(1,597; 39,930) = 44,537$; $p < 0,001$]. In zentralen Bereichen wurden höhere Werte im Vergleich zu frontalen ($p < 0,001$) und parietalen Arealen ($p < 0,001$) gemessen. Die Interaktionen waren nicht signifikant: Bedingung x Gruppe [$F(2; 50) = 0,743$; $p = 0,481$], Elektrodenposition x Gruppe [$F(1,597; 39,930) = 1,106$; $p = 0,329$], Bedingung x Elektrodenposition [$F(2,447; 61,178) = 0,365$; $p = 0,738$] und Bedingung x Elektrodenposition x Gruppe [$F(2,447; 61,178) = 1,039$; $p = 0,371$]. Siehe Abbildung 23.

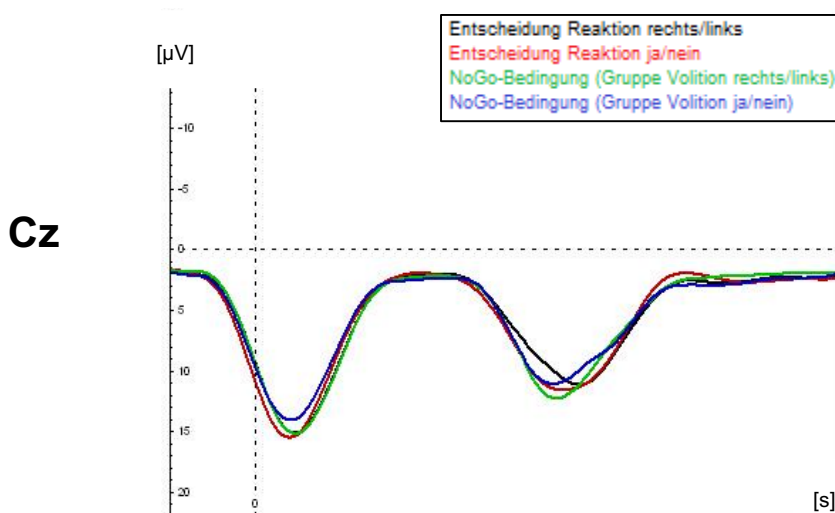


Abbildung 23: Thetaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz= Entscheidung Reaktion rechts/links, rot= Entscheidung Reaktion ja/nein, grün= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein)

1.3.2.2 Alphaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

Betrachtet man die Alpha-Aktivität, so unterscheidet sich das Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links nicht signifikant von Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein [$F(1; 25) = 0,120$; $p = 0,732$]. Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen [$F(2; 50) = 6,538$; $p = 0,003$]. Es zeigte sich auch eine erhöhte Aktivität während der Entscheidung im Vergleich zur Go-Bedingung ($p = 0,005$). Die Alphaantwort war in zentralen Arealen im Vergleich zu frontalen und parietalen Bereichen erhöht: Cz verglichen mit Fz ($p < 0,001$), und Cz verglichen mit Pz ($p < 0,001$) [$F(2; 50) = 25,477$; $p < 0,001$]. Die Interaktionen waren nicht signifikant: Bedingung x Gruppe [$F(2; 50) = 1,546$; $p = 0,223$]; Elektrodenposition x Gruppe [$F(2; 50) = 0,365$; $p = 0,696$]; Elektrodenposition x Bedingung [$F(4; 100) = 1,938$; $p < 0,110$]; Bedingung x Elektrodenposition x Gruppe [$F(4; 100) = 0,703$; $p = 0,592$]. Siehe Abbildung 24.

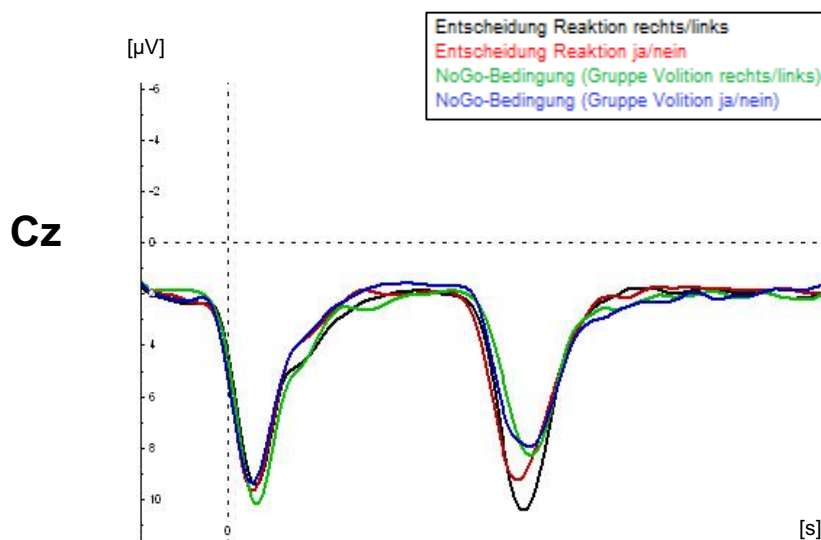


Abbildung 24: Alphaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz= Entscheidung Reaktion rechts/links, rot= Entscheidung Reaktion ja/nein, grün= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein)

1.3.2.3 Betaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen dem Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein und dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links hinsichtlich Beta-Aktivität festgestellt werden [$F(1; 25) = 1,401$; $p = 0,248$]. Die Beta-Aktivität unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen [$F(2; 50) = 8,952$; $p < 0,001$] mit erhöhten Werten während Entscheidung im Vergleich zur Go- ($p < 0,001$) und zur NoGo-Aufgabe ($p = 0,031$). Außerdem gab es einen signifikanten Unterschied zwischen den Elektrodenpositionen [$F(2; 50) = 6,666$; $p = 0,003$] mit einer erhöhten Aktivität in Cz im Vergleich zur Pz ($p = 0,002$). Die Interaktionen waren nicht signifikant: Bedingung x Gruppe [$F(2; 50) = 0,688$; $p = 0,507$], Elektrodenposition x Gruppe [$F(2; 50) = 0,229$; $p = 0,796$], Bedingung x Elektrodenposition [$F(4; 100) = 0,403$; $p = 0,806$], Bedingung x Elektrodenposition x Gruppe [$F(4; 100) = 0,917$; $p = 0,457$]. Siehe Abbildung 25.

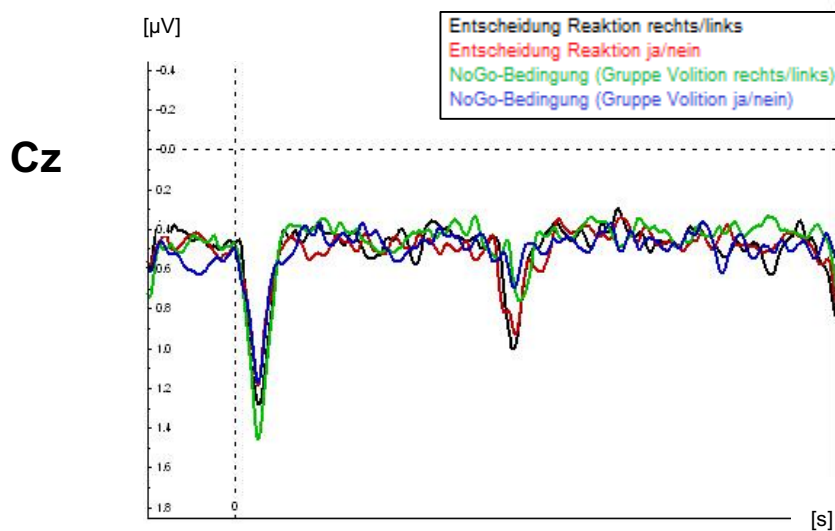


Abbildung 25: Betaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz= Entscheidung Reaktion rechts/links, rot= Entscheidung Reaktion ja/nein, grün= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein)

1.3.2.4 Gammaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein versus rechts/links

Gamma-Aktivität im Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein unterschied sich nicht signifikant vom Paradigma Entscheidung rechts/links [$F(1; 25) = 0,741$; $p = 0,398$]. Die Haupteffekte der Bedingung [$F(2; 50) = 10,492$; $p < 0,001$] und der Elektrodenposition [$F(2; 50) = 11,378$; $p < 0,001$] erwiesen sich als statistisch signifikant. Die Interaktion zwischen Bedingung und Elektrodenposition [$F(4; 100) = 5,232$; $p = 0,001$] war ebenfalls signifikant. Gammaaktivität war ausgeprägter in Entscheidungs-Versuchen im Vergleich zu Go- ($p = 0,001$) und NoGo-Aufgaben ($p = 0,002$). Gamma-Aktivität war v.a. in frontalen und frontozentralen Arealen lokalisiert: Unterschiede zwischen Fz und Pz ($p < 0,001$) sowie zwischen Cz und Pz ($p = 0,013$) waren signifikant. Die Interaktionseffekte Bedingung x Gruppe [$F(2; 50) = 0,331$; $p = 0,675$], Elektrodenposition x Gruppe [$F(2; 50) = 0,591$, $p = 0,557$] und Bedingung x Elektrodenposition x Gruppe [$F(6; 306) = 0,158$; $p = 0,959$] waren nicht signifikant. Siehe Abbildung 26.

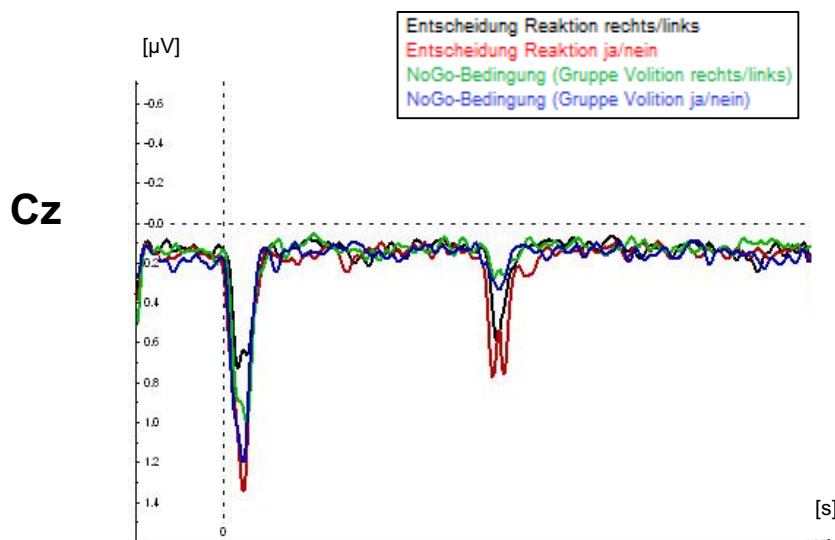


Abbildung 26: Gammaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz= Entscheidung Reaktion rechts/links, rot= Entscheidung Reaktion ja/nein, grün= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau= NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein)

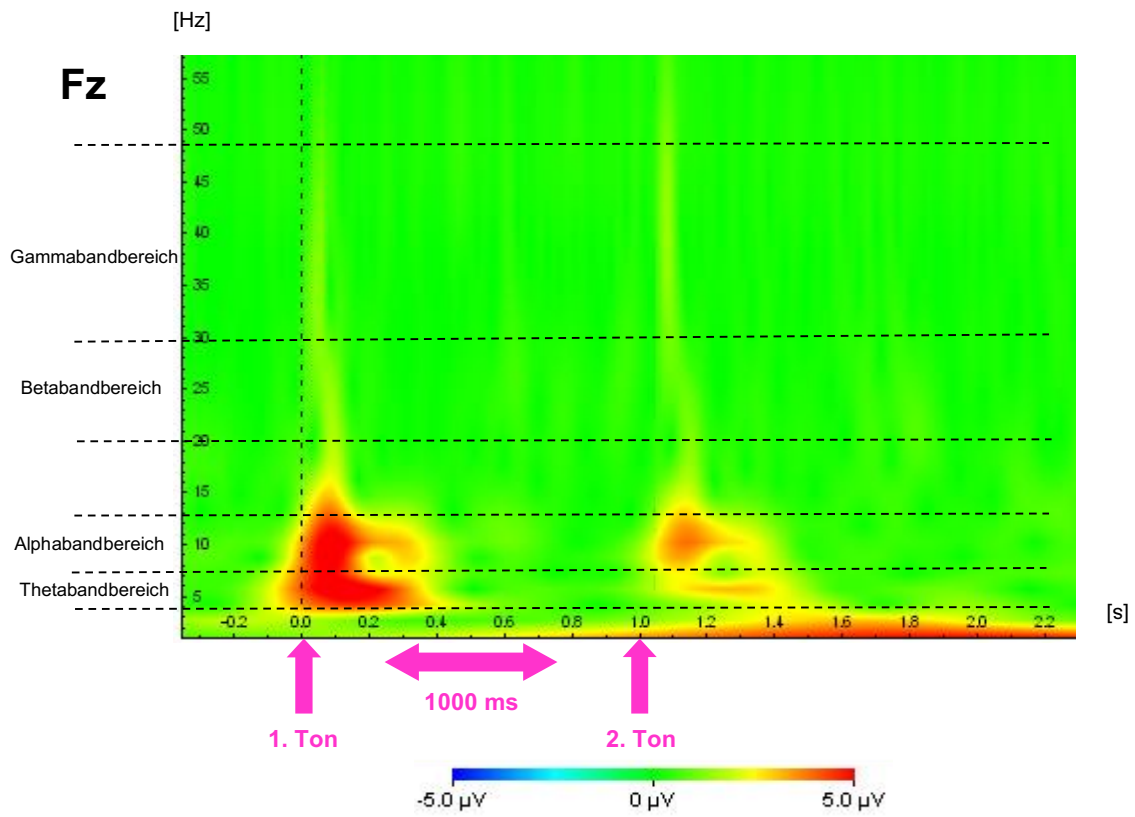


Abbildung 27: Zeit-Frequenz-Analyse bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 1. Termin in der Ableitung Fz

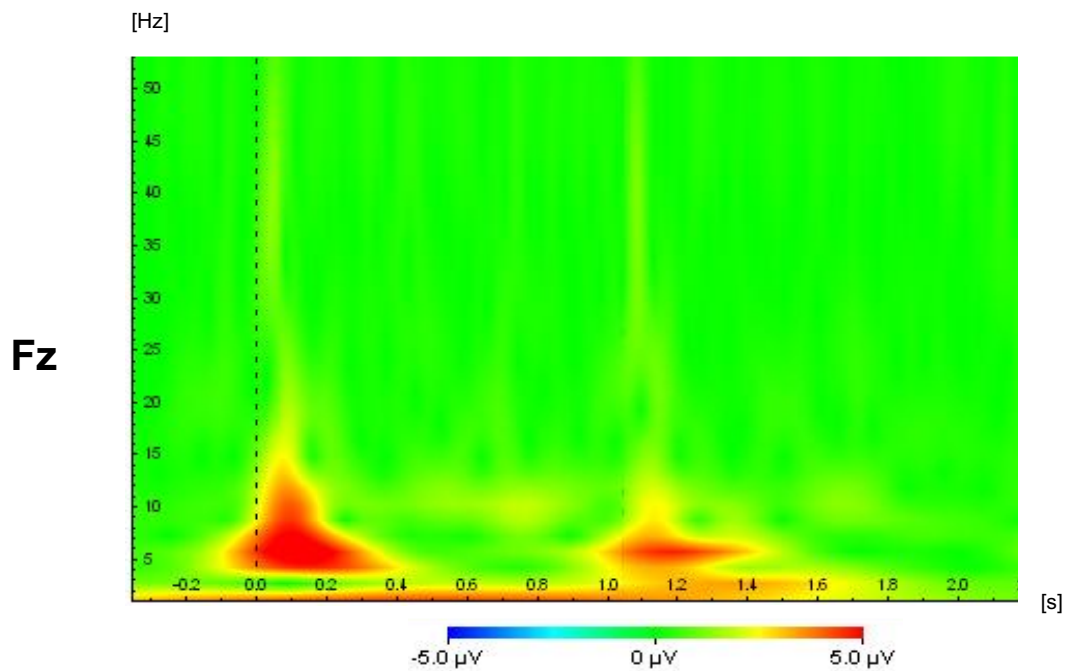


Abbildung 28: Zeit-Frequenz-Analyse bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 2. Termin in der Ableitung Fz

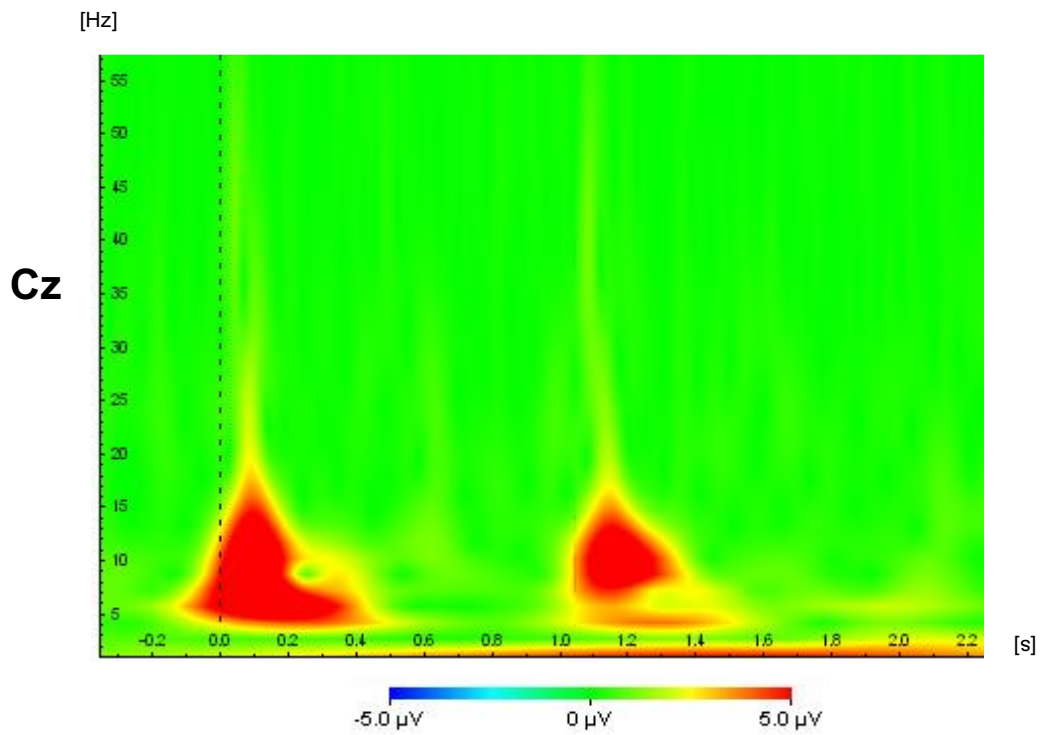


Abbildung 29: Zeit-Frequenz-Analyse bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 1. Termin in der Ableitung Cz

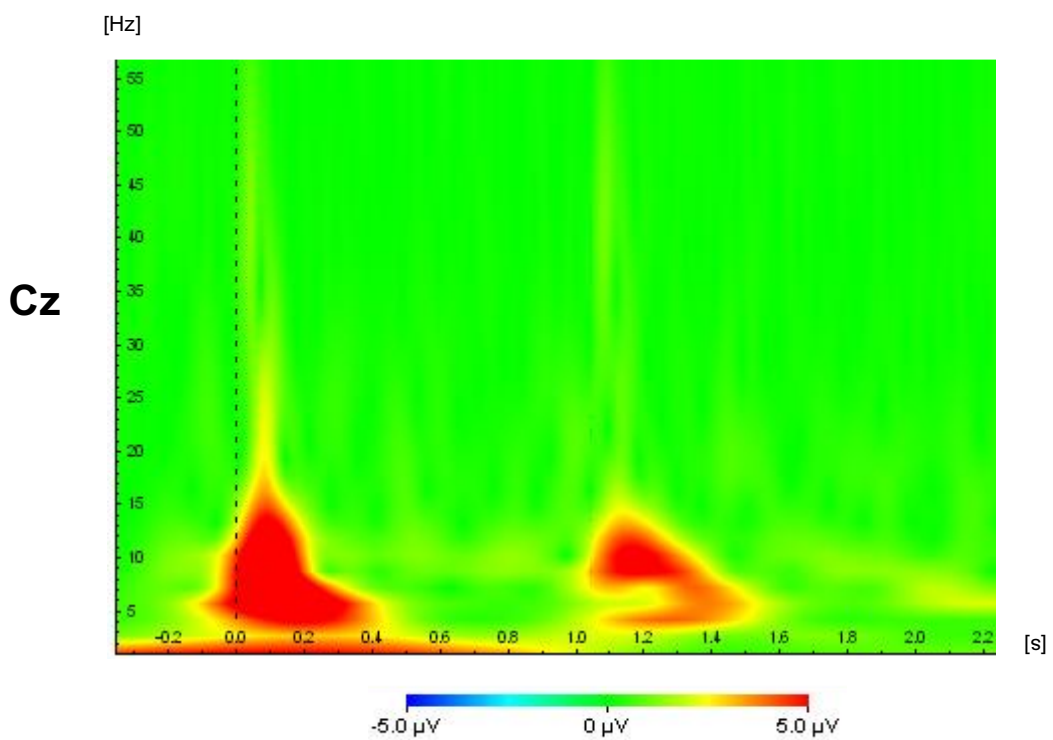


Abbildung 30: Zeit-Frequenz-Analyse bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 2. Termin in der Ableitung Cz

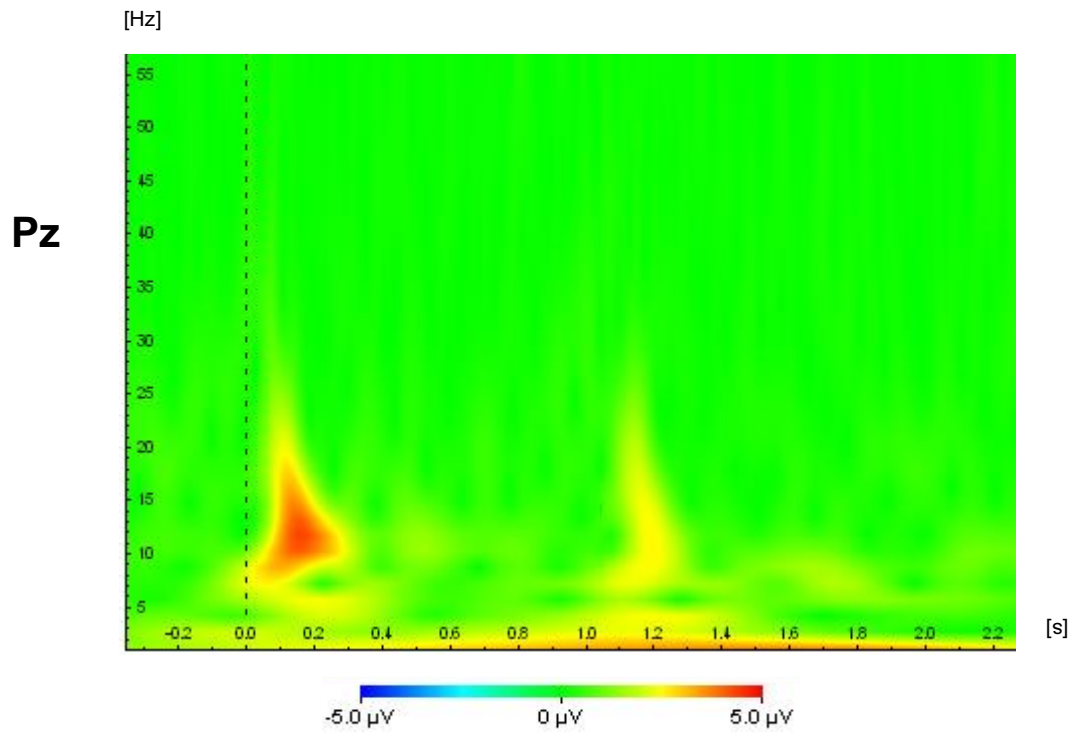


Abbildung 31: Zeit-Frequenz-Analyse bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 1. Termin in der Ableitung Pz

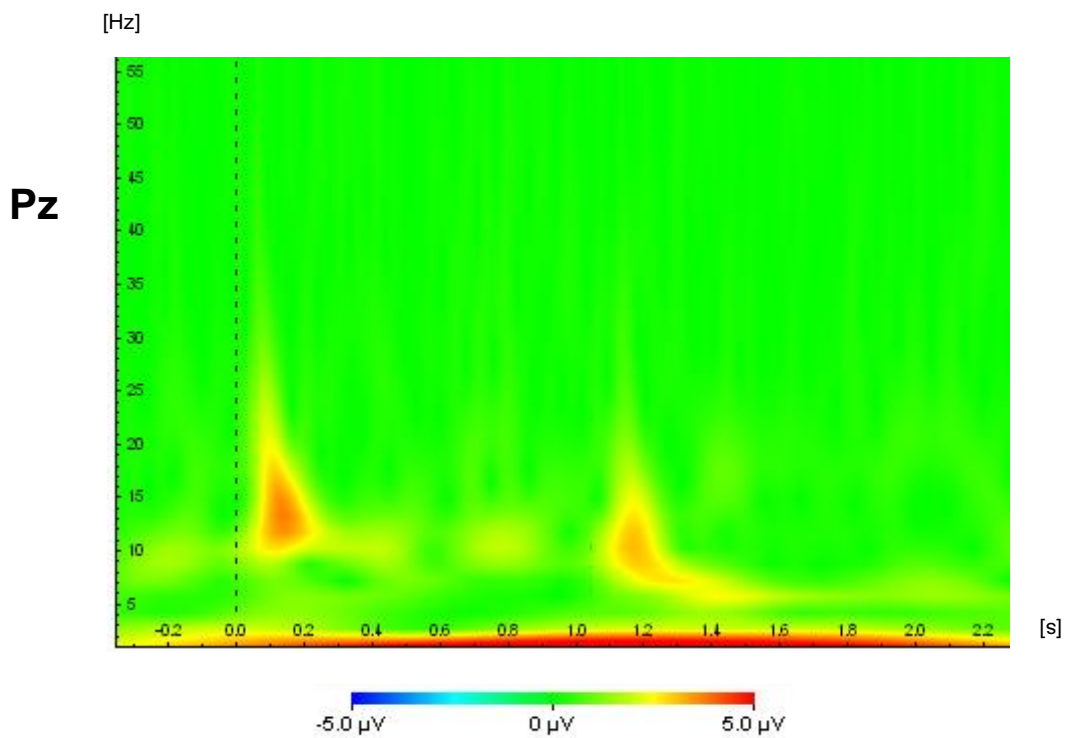


Abbildung 32: Zeit-Frequenz-Analyse bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 2. Termin in der Ableitung Pz

2 Ergebnisse der Retest-Reliabilität neurophysiologischer Korrelate

2.1 Ergebnisse der Retest-Reliabilität bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

2.1.1 Ergebnisse der Retest-Reliabilität ereigniskorrelierter Potentiale bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

2.1.1.1 Retest-Reliabilität von N2 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

Bei Messungen der N2-Amplitude ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten [$F(1; 26) = 0,001$; $p = 0,978$]. Zwischen den Bedingungen (Go, NoGo, Entscheidung Reaktion ja/nein) ergaben sich signifikante Unterschiede [$F(2; 52) = 12,900$; $p < 0,001$] ebenso wie für die Elektrodenpositionen [$F(1,227; 31,898) = 6,207$; $p = 0,013$]. Während der Go-Bedingung zeigten sich erhöhte N2-Amplituden im Vergleich zur NoGo- ($p = 0,004$) und Entscheidungsbedingung ($p < 0,001$). Hinsichtlich der Elektrodenpositionen zeigten sich höhere Werte bei der Cz-Elektrode im Vergleich zur Fz-Position ($p < 0,001$).

Abgesehen von der Interaktion Bedingung x Elektrode [$F(4; 104) = 3,207$; $p = 0,016$], wiesen die übrigen Interaktionen keine signifikanten Unterschiede auf: Elektrode x Gruppe [$F(2; 52) = 0,239$; $p = 0,788$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 104) = 0,225$; $p = 0,924$]. Siehe Abbildung 33.

2.1.1.2 Retest-Reliabilität von P3 bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

Zwischen den zwei Messzeitpunkten der P3-Amplitude konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden [$F(1; 26) = 0,913$; $p = 0,348$]. Zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 42,675$; $p < 0,001$] sowie zwischen den Elektrodenpositionen [$F(1,638; 42,576) = 10,263$; $p = 0,001$] bestand ein signifikanter Unterschied. Die NoGo-Bedingung wies größere P3-Amplituden im Vergleich zur Go- ($p < 0,001$) und Entscheidungsbedingung ($p = 0,001$) auf. Wie bei der N2, waren höhere Werte in den zentralen Bereichen als im Vergleich zu den frontalen ($p < 0,001$) und den parietalen Arealen ($p = 0,006$) zu beobachten.

Die Interaktionen waren, außer die Interaktion Bedingung x Elektrode [$F(4; 104) = 18,783$; $p < 0,001$], nicht signifikant: Elektrode x Gruppe [$F(1,638; 42,576) = 0,182$; $p = 0,791$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 104) = 0,486$; $p = 0,746$]. Siehe Abbildung 33.

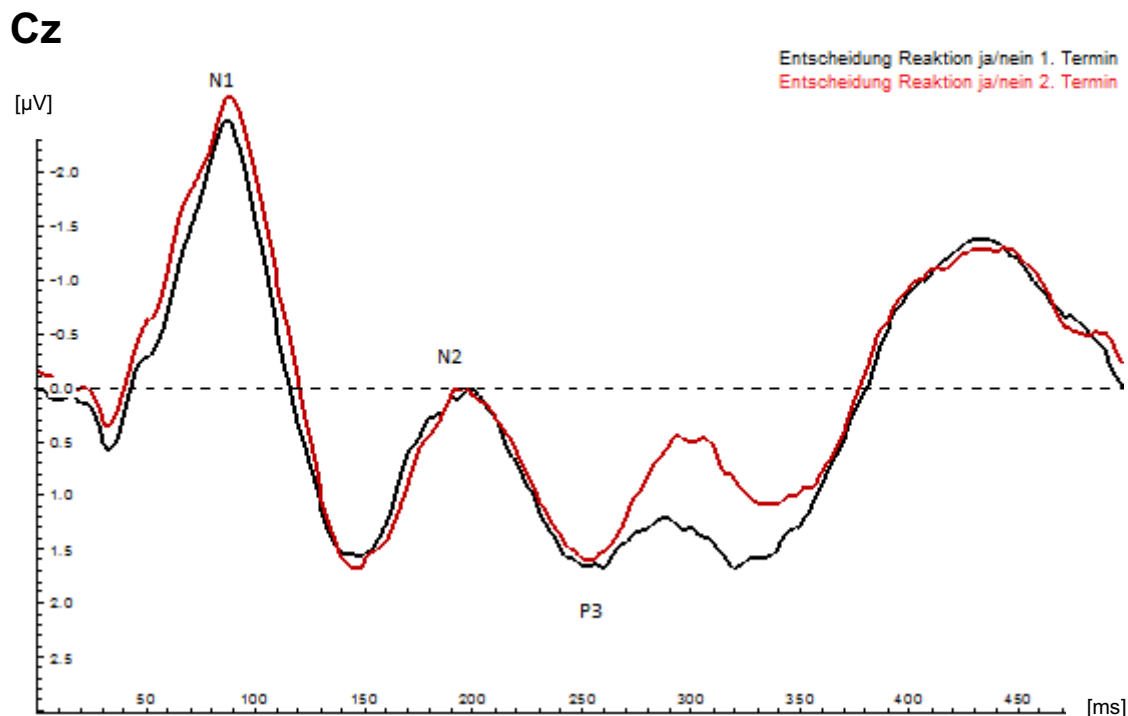


Abbildung 33: ERPs bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin (schwarz) versus 2. Termin (rot) in der Ableitung Cz

2.1.2 Ergebnisse der Retest-Reliabilität von Frequenzbändern bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

2.1.2.1 Retest-Reliabilität vom Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

Bei der Thetapower konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Messzeitpunkten festgestellt werden [$F(1; 26) = 0,145$; $p = 0,706$]. Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 5,083$; $p = 0,010$] auf. Während der Go-Aufgabe wurde niedrigere Thetaaktivität gemessen im Vergleich zur NoGo- ($p = 0,016$) und Entscheidungs-Bedingung ($p = 0,049$). Die Interaktionen zeigten keinen signifikanten Effekt: Elektrode x Gruppe [$F(2; 52) = 0,596$; $p = 0,554$], Bedingung x Elektrode [$F(4; 104) = 0,835$; $p = 0,506$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 104) = 0,214$; $p = 0,930$]. Siehe Abbildung 34.

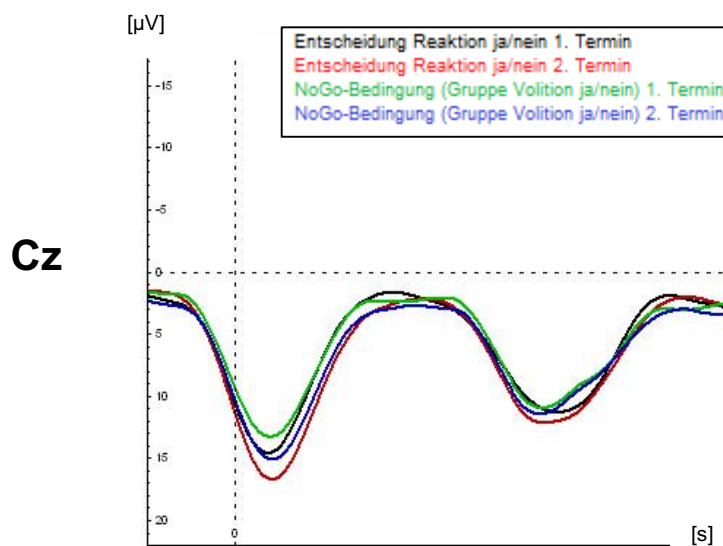


Abbildung 34: Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

2.1.2.2 Retest-Reliabilität vom Alphanband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

Beim Alphanband ergaben sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei Messterminen [$F(1; 26) = 0,030$; $p = 0,864$]. Signifikante Unterschiede zeigten sich zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 19,332$; $p < 0,001$], zwischen den Elektrodenpositionen [$F(1,522; 39,564) = 31,964$; $p < 0,001$] und bei der Interaktion Bedingung x Elektrodenposition [$F(3,063; 79,627) = 4,147$; $p = 0,008$]. Die Entscheidungs-Bedingung ergab eine signifikant höhere Alphaaktivität im Vergleich zur Go-Bedingung ($p < 0,001$). An der Cz-Ableitung wurden höhere Messwerte als bei der Fz- ($p < 0,001$) und Pz-Ableitung ($p < 0,001$) gemessen.

Die Interaktionen waren nicht signifikant: Elektrodenposition x Gruppe [$F(2; 52) = 0,003$; $p = 0,997$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 104) = 0,287$; $p = 0,886$]. Siehe Abbildung 35.

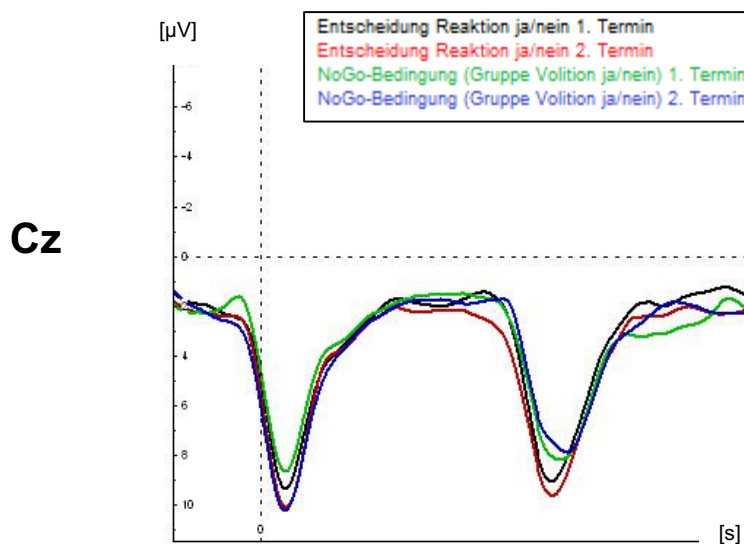


Abbildung 35: Alphanband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

2.1.2.3 Retest-Reliabilität vom Betaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

Zwischen dem ersten und zweiten Termin konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Beta-power festgestellt werden [$F(1; 26) = 0,051$; $p = 0,823$]. Signifikante Unterschiede zeigten sich zwischen den Bedingungen [$F(2; 52) = 9,638$; $p < 0,001$] und den Elektrodenpositionen [$F(2; 52) = 4,614$; $p = 0,014$]. Die Entscheidungs-Bedingung ergab eine höhere Betaaktivität im Vergleich zur Go- Bedingung ($p = 0,001$) und die zentralen Areale zeigten höhere Werte im Vergleich zu parietalen Bereichen ($p = 0,012$).

Die Interaktionseffekte waren nicht signifikant: Bedingung x Gruppe [$F(2; 52) = 0,643$; $p = 0,530$], Bedingung x Elektrode [$F(4; 104) = 0,376$; $p = 0,825$] und Bedingung x Gruppe x Elektrodenposition [$F(4; 104) = 0,728$; $p = 0,575$]. Siehe Abbildung 36.

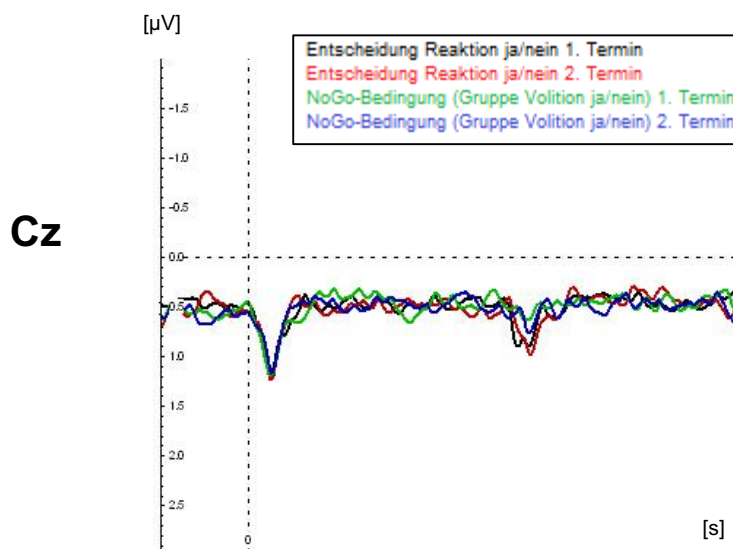


Abbildung 36: Betaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

2.1.2.4 Retest-Reliabilität vom Gammaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin versus. 2. Termin

Die Gammaaktivität unterschied sich nicht signifikant zwischen den beiden Messzeitpunkten [$F(1; 26) = 0,619$; $p = 0,439$]. Bei der Bedingung [$F(2; 52) = 9,143$; $p < 0,001$], bei der Elektrodenposition [$F(2; 52) = 15,961$; $p < 0,001$] sowie bei der Interaktion Bedingung x Elektrode [$F(2,196; 57,103) = 6,693$; $p = 0,002$] zeigten sich signifikante Unterschiede. Während der Entscheidung war die Gammaaktivität signifikant erhöht im Vergleich zur Go- ($p < 0,001$) und NoGo-Bedingung ($p = 0,003$). Höhere Messwerte konnten bei der Cz-Ableitung im Vergleich zur Pz-Elektrode ($p = 0,005$) erzielt werden. Folgende Interaktionen zeigten keinen signifikanten Effekt: Bedingung x Gruppe [$F(2; 52) = 1,989$; $p = 0,147$], Elektrode x Gruppe [$F(2; 52) = 2,571$; $p = 0,086$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 104) = 2,021$; $p = 0,097$]. Siehe Abbildung 37.

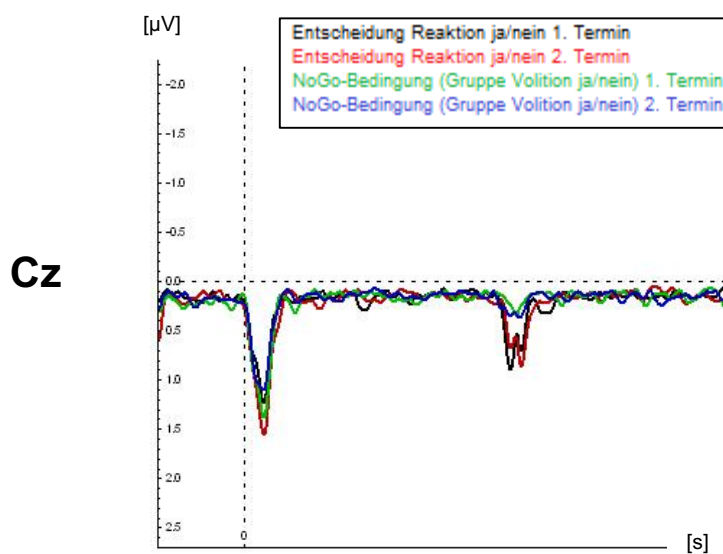


Abbildung 37: Gammaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

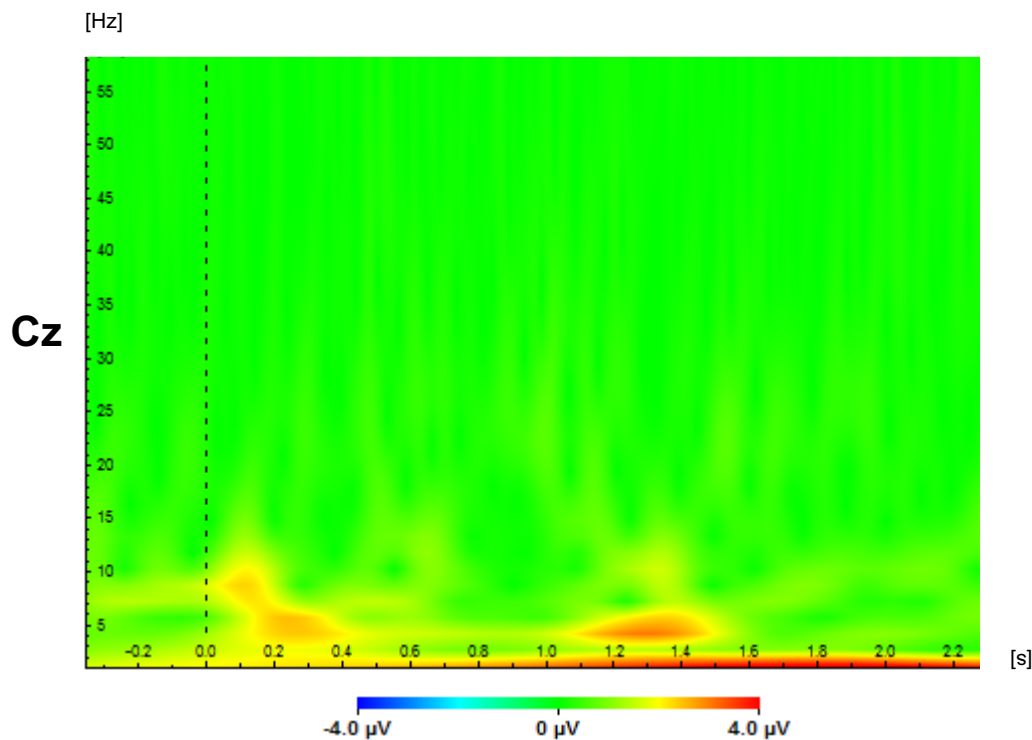


Abbildung 38: Zeit-Frequenz-Analyse bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin minus 2. Termin in der Ableitung Cz

2.2 Ergebnisse der Retest-Reliabilität bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

2.2.1 Ergebnisse der Retest-Reliabilität ereigniskorrelierter Potentiale bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

2.2.1.1 Retest-Reliabilität von N2 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

Die N2-Amplitude unterschied sich zwischen den Messzeitpunkten nicht signifikant [$F(1; 24) = 0,001$; $p = 0,977$]. Die Bedingungen [$F(2; 48) = 15,739$; $p < 0,001$] als auch die Elektrodenpositionen [$F(1,357; 32,564) = 22,698$; $p < 0,001$] wiesen signifikante Unterschiede auf. Während der Go-Bedingung wurden höhere Messwerte im Vergleich zur NoGo- ($p = 0,001$) und Entscheidungs-Bedingung ($p < 0,001$) abgeleitet. In zentralen Arealen konnten größere N2-Amplituden gemessen werden als in frontalen Bereichen ($p < 0,001$). Die Interaktionen zeigten keinen signifikanten Effekt: Bedingung x Gruppe [$F(2; 48) = 0,352$; $p = 0,705$], Elektrode x Gruppe [$F(2; 48) = 0,820$; $p = 0,447$], Bedingung

x Elektrode [$F(2,745; 65,869) = 2,737; p = 0,055$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 96) = 0,471; p = 0,757$]. Siehe Abbildung 39.

2.2.1.2 Retest-Reliabilität von P3 bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

Zwischen dem ersten und zweiten Termin konnten keine signifikanten P3-Amplitudenunterschiede festgestellt werden [$F(1; 24) = 0,149; p = 0,703$]. Signifikante Unterschiede ergaben sich bei der Bedingung [$F(1,307; 31,363) = 21,928; p < 0,001$], der Elektrodenposition [$F(1,319; 31,653) = 18,643; p < 0,001$] und der Interaktion Bedingung x Elektrode [$F(1,899; 45,568) = 10,515; p < 0,001$]. Während der NoGo-Bedingung konnten höhere Werte im Vergleich zur Go- ($p < 0,001$) und Entscheidungsbedingung ($p = 0,010$) erzielt werden. Bei der Cz-Elektrode zeigten sich höhere P3-Amplituden als in den Fz ($p < 0,001$).

Die Interaktionen ließen keinen signifikanten Effekt erkennen: Bedingung x Gruppe (2; 48) = 0,222; $p = 0,802$], Elektrode x Gruppe [$F(2; 48) = 0,175; p = 0,840$], und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 96) = 0,518; p = 0,722$]. Siehe Abbildung 39.

Cz

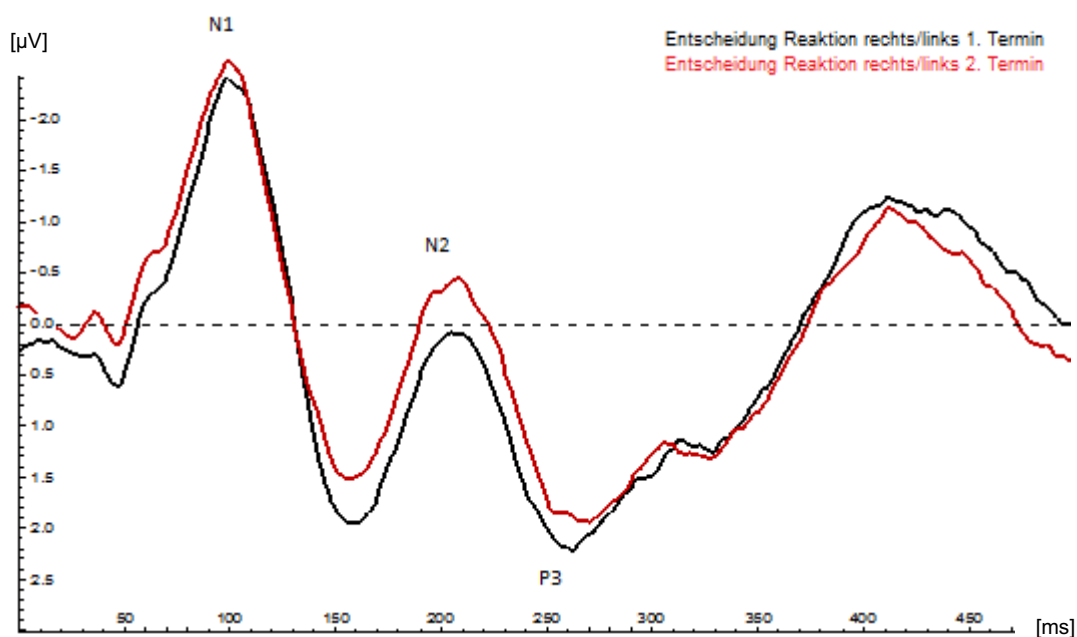


Abbildung 39: ERPs bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin (schwarz) versus 2. Termin (rot) in der Ableitung Cz

2.2.2 Ergebnisse der Retest-Reliabilität von Frequenzbändern bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

2.2.2.1 Retest-Reliabilität vom Thetaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

Hinsichtlich der Theta-Power ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Messzeitpunkten [$F(1; 24) = 0,216$; $p = 0,646$]. Es konnte kein signifikanter Unterschied bei der Bedingung [$F(1,507; 36,179) = 0,093$; $p = 0,105$] und den Interaktionen Bedingung x Gruppe [$F(2; 48) = 0,093$; $p = 0,912$], Elektrode x Gruppe [$F(2; 48) = 0,175$; $p = 0,840$], Bedingung x Elektrode [$F(1,811; 43,454) = 1,169$; $p = 0,316$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4;96) = 0,087$; $p = 0,986$] gemessen werden. Die Elektrodenposition wies einen signifikanten Unterschied auf [$F(1,285; 30,850) = 1,285$; $30,850) = 36,469$; $p < 0,001$]. Bei der NoGo-Bedingung konnte ein Trend im Vergleich zur Entscheidung ($p = 0,051$) beobachtet werden. In zentralen Bereichen waren die Messwerte im Vergleich zu frontalen ($p < 0,001$) und parietalen Arealen ($p < 0,001$) signifikant erhöht. Siehe Abbildung 40.

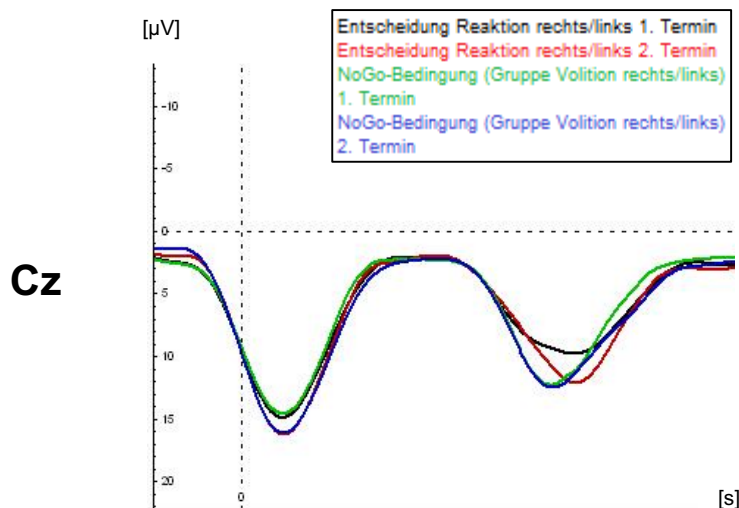


Abbildung 40: Thetaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

2.2.2.2 Retest-Reliabilität vom Alphaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

Die Alpha-Aktivität unterschied sich zwischen dem ersten und zweiten Termin nicht signifikant [$F(1; 24) = 0,041$; $p = 0,842$]. Bezüglich der Bedingung [$F(1,463; 35,120) = 3,417$; $p = 0,058$] zeigte sich kein signifikanter Unterschied. Bei der Elektrodenposition [$F(2; 48) = 27,966$; $p < 0,001$] ergab sich ein signifikanter Unterschied. Nicht signifikant waren die Interaktionseffekte: Bedingung x Gruppe [$F(2; 48) = 0,684$; $p = 0,510$], Elektrode x Gruppe [$F(2; 48) = 0,147$; $p = 0,864$], Bedingung x Elektrode [$F(2,627; 63,042) = 1,058$; $p = 0,367$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 96) = 0,032$; $p = 0,998$]. Die Entscheidung ließ höhere Alphaaktivität im Vergleich zur Go-Aufgabe erkennen ($p = 0,030$) und in den zentralen Ableitungen waren die Werte höher als in den frontalen ($p < 0,001$) und parietalen Ableitungen ($p < 0,001$). Siehe Abbildung 41.

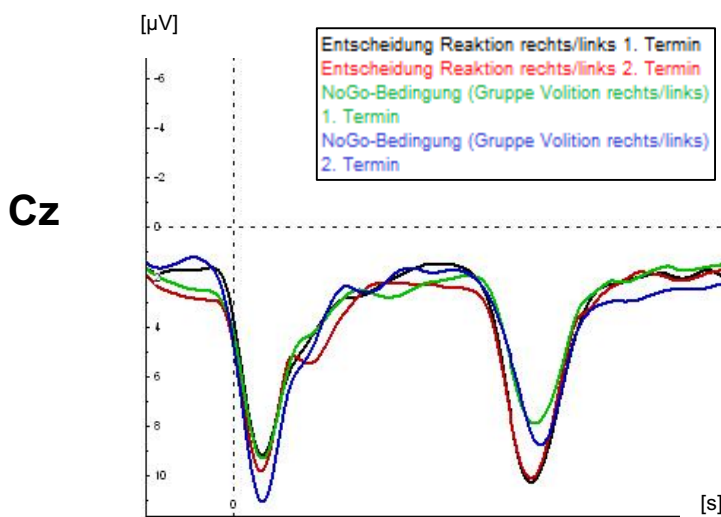


Abbildung 41: Alphaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

2.2.2.3 Retest-Reliabilität vom Betaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

Die Beta-Aktivität unterschied sich nicht signifikant zwischen den Messzeitpunkten [$F(1; 24) = 1,109$; $p = 0,303$]. Bei der Elektrodenposition [$F(2; 48) = 14,603$; $p < 0,001$] sowie bei der Interaktion Bedingung x Elektrode [$F(4; 96) = 2,874$; $p = 0,027$] konnten signifikante Unterschiede beobachtet werden. Die Bedingungen unterschieden sich nicht signifikant (Entscheidung > Go; $p = 0,255$; Entscheidung > NoGo; $p = 0,090$). Die Betaaktivität war in den zentralen Ableitungen größer als in frontalen ($p = 0,014$) und parietalen Ableitungen ($p < 0,001$). Bei folgenden Interaktionen konnte kein signifikanter Effekt festgestellt werden: Bedingung x Gruppe [$F(2; 48) = 0,223$; $p = 0,801$], Elektrode x Gruppe [$F(2;48) = 0,516$; $p = 0,600$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 96) = 1,609$; $p = 0,178$]. Siehe Abbildung 42.

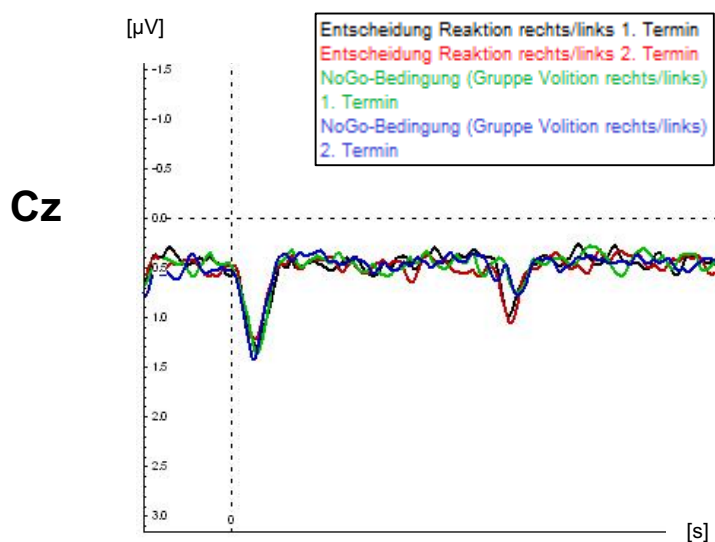


Abbildung 42: Betaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

2.2.2.4 Retest-Reliabilität vom Gammaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin versus 2. Termin

Zwischen dem ersten und zweiten Termin erwies sich der Unterschied hinsichtlich der Gammaaktivität als nicht signifikant [$F(1; 24) = 0,014$; $p = 0,907$]. Bei der Bedingung [$F(2; 48) = 11,714$; $p < 0,001$], bei der Elektrodenposition [$F(2; 48) = 17,461$; $p < 0,001$] sowie bei der Interaktion Bedingung x Elektrode [$F(2,730; 65,509) = 6,730$; $p = 0,001$] zeigte sich ein signifikanter Unterschied. Die Entscheidungsbedingung ergab signifikant höhere Werte als die Go ($p = 0,044$) und die NoGo-Bedingung ($p < 0,001$). Die Cz-Elektrode wies höhere Messwerte auf als die parietale Ableitung ($p < 0,001$).

Es konnte kein signifikanter Effekt bei folgenden Interaktionen festgestellt werden: Bedingung x Gruppe [$F(2; 48) = 1,598$; $p = 0,213$], Elektrode x Gruppe [$F(2; 48) = 1,735$; $p = 0,187$] und Bedingung x Elektrode x Gruppe [$F(4; 96) = 0,724$; $p = 0,578$]. Siehe Abbildung 43.

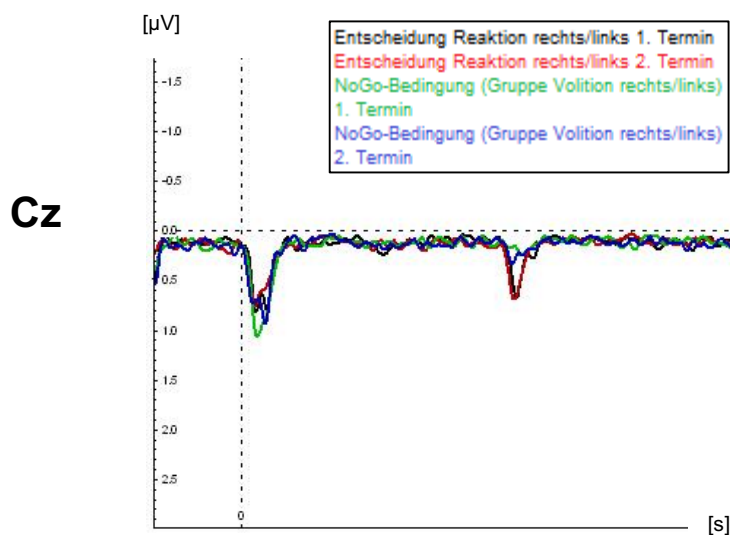


Abbildung 43: Gammaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau)

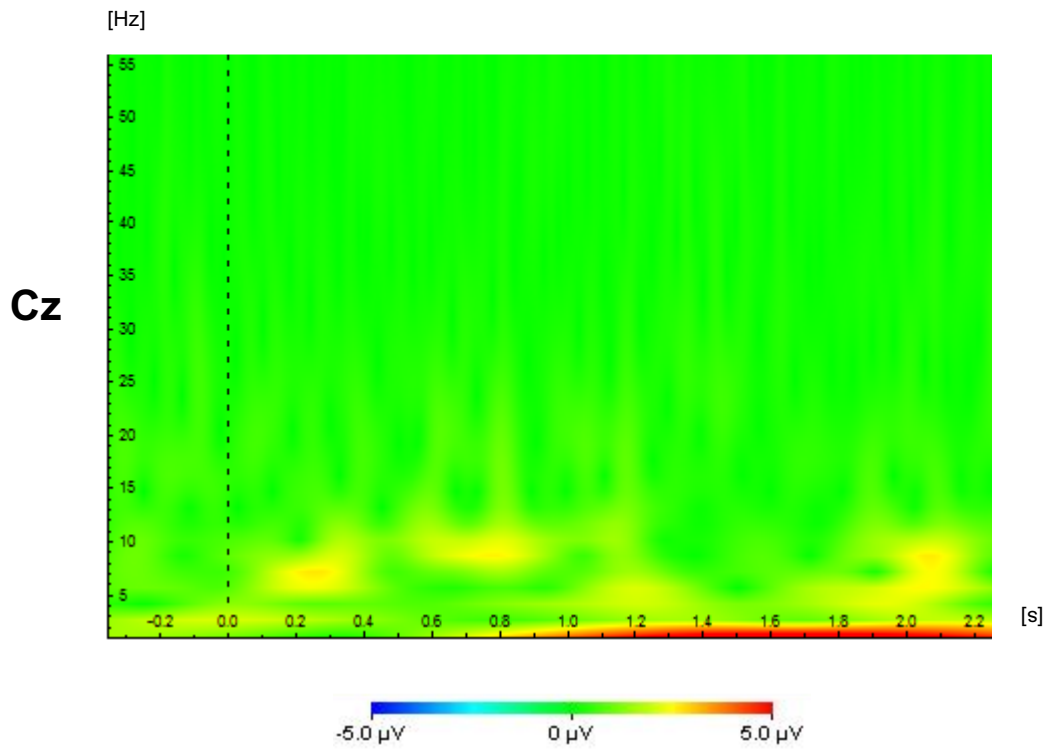


Abbildung 44: Zeit-Frequenz-Analyse bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin minus 2. Termin in der Ableitung Cz

	ERP- Amplitudenhöhe	Unter- schie- de zwischen Bedingungen	Unterschiede zwischen Elektroden- positionen	Unterschiede zwischen Entscheidungsarten bzw. Messzeitpunkten	Entscheidung > Go	Entscheidung > NoGo	Fz > Cz	Cz > Fz
Entscheidung Reaktion ja/nein	N2	p = 0,006	p = 0,034		p = 0,015	n.s.	p = 0,010	n.s.
	P3	p < 0,001	p = 0,047		p = 0,005	n.s.	n.s.	p = 0,020
Entscheidung Reaktion rechts/links	N2	p = 0,004	p < 0,001		p = 0,041	n.s.	p < 0,001	n.s.
	P3	p < 0,001	p = 0,007		p = 0,008	n.s.	n.s.	p = 0,005
Entscheidung Reaktion ja/nein vs. rechts/links	N2	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	p = 0,001	n.s.	p < 0,001	n.s.
	P3	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	p < 0,001	n.s.	n.s.	p < 0,001
Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin vs. 2. Termin	N2	p < 0,001	p = 0,013	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p < 0,001
	P3	p < 0,001	p = 0,001	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p < 0,001
Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin vs. 2. Termin	N2	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p < 0,001
	P3	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p < 0,001

Tabelle 6: p-Wert-Übersicht der Amplitudenhöhe ereigniskorrelierter Potentiale bei verschiedenen Entscheidungsarten und Messzeitpunkten; n.s.: nicht signifikant

E

	Frequenzband-aktivität	Unterschiede zwischen Bedingungen	Unterschiede zwischen Elektrodenpositionen	Unterschiede zwischen Entscheidungsarten bzw. Messzeitpunkten	Entscheidung > Go	Entscheidung > NoGo	Fz > Cz	Cz > Fz
Entscheidung Reaktion ja/nein	Theta	$p = 0,010$	$p < 0,001$		$p = 0,049$	n.s.	n.s.	$p < 0,001$
	Alpha	$p < 0,001$	$p < 0,001$		$p < 0,001$	n.s.	n.s.	$p = 0,007$
	Beta	$p < 0,001$	$p < 0,001$		$p < 0,001$	$p = 0,001$	n.s.	n.s.
	Gamma	$p < 0,001$	$p < 0,001$		$p < 0,001$	$p = 0,003$	$p = 0,007$	n.s.
Entscheidung Reaktion rechts/links	Theta	n.s.	$p < 0,001$		n.s.	n.s.	n.s.	$p < 0,001$
	Alpha	$p = 0,041$	$p < 0,001$		$p = 0,030$	n.s.	n.s.	$p < 0,001$
	Beta	$p = 0,030$	$p < 0,001$		n.s.	$p = 0,010$	n.s.	n.s.
	Gamma	$p < 0,001$	$p < 0,001$		$p < 0,044$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	n.s.
Entscheidung Reaktion ja/ nein vs. rechts/links	Theta	$p = 0,029$	$p < 0,001$	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	$p < 0,001$
	Alpha	$p = 0,003$	$p < 0,001$	n.s.	$p = 0,005$	n.s.	n.s.	$p < 0,001$
	Beta	$p < 0,001$	$p = 0,003$	n.s.	$p < 0,001$	$p = 0,031$	n.s.	n.s.
	Gamma	$p < 0,001$	$p < 0,001$	n.s.	$p = 0,001$	$p = 0,002$	n.s.	n.s.

	Frequenzband-aktivität	Unterschiede zwischen Bedingungen	Unterschiede zwischen Elektrodenpositionen	Unterschiede zwischen Entscheidungsarten bzw. Messzeitpunkten	Entscheidung > Go	Entscheidung > NoGo	Fz > Cz	Cz > Fz
Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin vs. 2. Termin	Theta	p = 0,010	p < 0,001	n.s.	p = 0,049	n.s.	n.s.	p < 0,001
	Alpha	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	p < 0,001	n.s.	n.s.	p < 0,001
	Beta	p < 0,001	p = 0,014	n.s.	p < 0,001	n.s.	n.s.	n.s.
	Gamma	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	p < 0,001	p = 0,003	p = 0,007	n.s.
Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin vs. 2. Termin	Theta	n.s.	p < 0,001	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p < 0,001
	Alpha	n.s.	p < 0,001	n.s.	p = 0,030	n.s.	n.s.	p < 0,001
	Beta	n.s.	p < 0,001	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p = 0,014
	Gamma	p < 0,001	p < 0,001	n.s.	p = 0,044	p < 0,001	n.s.	n.s.

Tabelle 7: p-Wert-Übersicht der Frequenzbandaktivität bei verschiedenen Entscheidungsarten und Messzeitpunkten; n.s.: nicht signifikant

D. Diskussion

Sich zwischen verschiedenen Alternativen entscheiden zu können ist ein wichtiges Merkmal menschlichen Verhaltens. Freie Entscheidungen werden nicht nur durch unsere inneren Absichten und Ziele bestimmt, sondern auch durch externe Faktoren, unsere Umwelt und Erfahrungen, geprägt (Bargh et al., 2001). Um in der Lage zu sein, sich im Rahmen von aktuellen Absichten auf ein Ziel zu konzentrieren, Störfaktoren auszublenden und ggf. den Fokus zu ändern sind kognitive Kontrollmechanismen erforderlich. Kognitive Kontrolle bezieht sich im Allgemeinen auf die Fähigkeit, Gedanken und Verhalten zu steuern, um innerlich erzeugte Ziele zu erreichen (Miller & Cohen, 2001; Norman, 1986). Als eine Unterform kognitiver Kontrolle kann vorsätzliches Handeln angesehen werden. Vorsätzliches Handeln wird spezifisch mit innerlich gelenktem Verhalten assoziiert (Brass & Haggard, 2007). Ein Ziel der aktuellen Studie war die Unterscheidung zwischen innerlich und äußerlich gelenktem Verhalten anhand elektrophysiologischer Korrelate (ereigniskorrelierte Potentiale, Theta-, Alpha-, Beta- und Gammaaktivität). Zudem wurden verschiedene Komponenten vorsätzlichen Handelns untersucht: Zum einen die Entscheidung, ob gehandelt wird oder nicht, zum anderen, die Entscheidung, welche Handlung ausgeführt wird. Um diese beiden Aspekte volitionalen Handelns als auch extern getriggerte Handlungen neurophysiologisch objektivieren zu können, wurde folgendes Experiment durchgeführt: Probanden konnten sich einerseits frei entscheiden, ob eine Handlung, ein Knopfdruck, ausgeführt wird oder nicht (Paradigma Entscheidung Reaktion ja/nein), andererseits wurde den Probanden die Wahl gelassen, ob sie mit dem rechten oder linken Zeigefinger reagieren (Entscheidung Reaktion rechts/links). Insgesamt konnten mit diesem adaptierten Go/NoGo-Paradigma nicht nur extern gesteuerte kognitive Prozesse (u.a. Inhibition von Reaktionen) sondern auch innerlich gelenkte Entscheidungsprozesse getestet und miteinander verglichen werden. Als Vergleichsparameter dienten in dieser Studie elektrophysiologische Korrelate im Sinne von ereigniskorrelierten Potentialen (ERPs) und Frequenzbändern. Zudem wurden Reaktionszeiten bestimmt.

Bei Entscheidungsaufgaben waren die N2 sowie die P3 v.a. frontozentral lokalisiert und zeigten größere Amplituden im Vergleich zu angeleiteten Reaktionen (Go-Bedingung). Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen von Karch und Kollegen (Karch et al., 2010b; Karch et al., 2009).

Die N2-Amplitude während NoGo- und Entscheidungsaufgaben unterschied sich nicht signifikant. Im Gegensatz dazu zeigten sich v.a. zentral größere P3-Amplituden während

Inhibitionsaufgaben im Vergleich zu beiden Entscheidungsaufgaben und Go-Aufgaben was bereits von Karch und Kollegen (2009) beschrieben wurde (siehe auch Karch et al., 2009). Dies lässt einen Zusammenhang zwischen Inhibition und P3 vermuten.

Die NoGo-P3 war frontaler lokalisiert als die Go-P3. Unsere Ergebnisse der erläuterten NoGo-N2- und -P3-Potentiale gehen einher mit vorangehenden Studien: In einem visuellen Go/NoGo-Paradigma konnte bei der NoGo-Bedingung eine frontozentral lokalisierte N2 und eine weiter anterior lokalisierte P3 im Vergleich zu Go-Versuchen festgestellt werden. Die NoGo-N2 wurde mit einem erhöhten Aufwand, um das Reaktions-Hemmungs-System zu aktivieren und Vorbereitungen für die Reaktionsausführung zu unterbrechen, assoziiert (Geczy et al., 1999).

Über die Bedeutung der N2 und P3 wird viel diskutiert. Zum einen wird angenommen, dass die N2 motorische Inhibition widerspiegelt (Kok, 1986; van Boxtel et al., 2001), zum anderen, dass die N2 für die Erfassung von Reaktionskonflikten steht (Donkers & van Boxtel, 2004; Nieuwenhuis et al., 2003). Es konnte gezeigt werden, dass die N2 mit der Auswahl einer Antwort assoziiert ist und nachfolgende Abschnitte der Informationsverarbeitung, welche sich in der P3 reflektieren, beeinflussen. Es gibt Hinweise darauf, dass unerwartete Berichtigungen von Reaktionen die N2-Amplitude erhöhen und das Auftreten der N2 verzögern (Gajewski et al., 2008). Forstmann und Kollegen folgerten aus ihren Ergebnissen, dass der Entscheidungs-bedingte N2-P2-Komplex möglicherweise frühe sensorische Wahrnehmungsprozesse widerspiegelt (Forstmann et al., 2007). Die Möglichkeit, Generatoren von ERP-Komponenten zu lokalisieren ist aufgrund der schlechten räumlichen Auflösung des EEGs begrenzt. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden EEG- und funktionelle MRT-Daten simultan während eines freien Entscheidungsparadigmas aufgezeichnet (Karch et al., 2010a). N2-assozierte hämodynamische Reaktionen im Gehirn wurden v.a. in medialen und lateralen Frontalhirnregionen gefunden (Karch et al., 2010a). Damit einhergehend konnte man schon in vorangehenden Studien feststellen, dass der mediale Frontalkortex entscheidend ist für innerlich motivierte kognitive Kontrollprozesse, u.a. das Treffen freier Entscheidungen (Brass & Haggard, 2008; Forstmann et al., 2006; Forstmann et al., 2008; Lau et al., 2004b).

Auch bezüglich der P3 gibt es verschiedene Berechnungen: Manche Autoren vermuten, dass die P3 die Bewertung des Stimulus (Forstmann et al., 2007) oder des Inhibitionserfolgs (Dimoska et al., 2003) repräsentiert. Außerdem wird die P3 mit dem Inhibitionsprozess an sich (Bekker et al., 2005a; Kok et al., 2004; Ramautar et al., 2004)

assoziiert. Karch und Kollegen konnten zeigen, dass die P3-Amplitude in erster Linie mit erhöhten BOLD-Reaktionen in der temporo-parietalen Verbindung und in lateralen Frontalhirnarealen assoziiert ist (Karch et al., 2010a). Die Autoren folgerten aus ihren Ergebnissen, dass mediale Frontalhirnareale in einem früheren Zeitabschnitt involviert werden als temporo-parietale Areale (Karch et al., 2010a). Helenius und Kollegen (Helenius et al., 2010) brachten allerdings Aktivierungen in der temporo-parietalen Verbindung mit der N2 in Verbindung. Dies ist nur ein Beispiel von vielen, das erkennen lässt, dass die Erforschung von Generatoren der N2 und P3 noch nicht abgeschlossen ist. Dass sich innerer Konflikt und freie Entscheidung nicht eindeutig voneinander abgrenzen lassen, sondern dass es sich um überlappende Konzepte handelt, beschreiben z.B. Kriehoff und Kollegen (2011) folgendermaßen: Reaktionskonflikt und Volition repräsentieren zwei Seiten einer Medaille und es gibt keinen freien Willen ohne innere Konfliktsituation (Kriehoff et al., 2011).

Ereigniskorrelierte Potentiale bestehen aus vielen unterschiedlichen Frequenzspektren und einige Frequenzen sind charakteristisch für bestimmte neuronale Prozesse. Neuronale Oszillationen und ihre Synchronisation repräsentieren wichtige Mechanismen interneuronaler Kommunikation und Informationsbindung in verschiedenen Hirnregionen (Roach & Mathalon, 2008). Bei der sog. Wavelet-Analyse werden die verschiedenen Frequenzen der ERPs untersucht. Es können sogenannte induzierte Oszillationen durch einen nichtperiodischen Stimulus, welcher gewöhnlich in ERP-Studien verwendet wird, ausgelöst werden (Basar-Eroglu et al., 1992). Diese nichtperiodischen Stimuli können sensorischer oder kognitiver Art sein und beeinflussen dementsprechend die oszillatorischen Reaktionen.

Die Frequenzbandanalyse stellt eine weitere wichtige Messmethode dar, welche einen Vergleich zwischen Entscheidungsaufgaben und angeleiteten Go- und NoGo-Aufgaben ermöglicht. In der aktuellen Studie konnte erhöhte Theta-, Alpha-, Beta- und Gammaaktivität während Entscheidungsaufgaben im Vergleich zu angeleiteten Aufgaben (Go) festgestellt werden. Außerdem waren Beta- und Gammaoszillationen ausgeprägter während Entscheidungsaufgaben als bei der Inhibition von Reaktionen. Die erhöhte Frequenzbandaktivität war v.a. in frontalen und frontozentralen Arealen lokalisiert.

In vorangehenden Studien fand man heraus, dass hohe Feuerungsraten einzelner Neurone zu Gamma- und Betaoszillationen führen. Diese Neigung ist besonders hoch wenn wiederholte Verbindungen stark sind, was eine Eigenschaft von Arbeitsgedächtnis

und Entscheidungsfällung ist (Wang, 2010). Bouyer und Kollegen fanden Rhythmen zwischen 40 und 50 Hz in parietalen und frontalen Arealen wenn sich Katzen in einem Zustand erhöhter Aufmerksamkeit befanden, z.B. bei der Beobachtung eines Beutetiers, das den Raum betrat. Diese Autoren bezeichneten diese schnellen Oszillationen als „Hypervigilanzrhythmus“ (Bouyer et al., 1981). Es konnte zudem gezeigt werden, dass sich die Gamma-Aktivität mit steigender Aufgabenschwierigkeit erhöht (Senkowski und Herrmann, 2002; Posada et al., 2003; Mulert et al., 2007). Gammabandaktivität wurde von Mulert und Kollegen (2007) mit Mittellinienbereichen einschließlich des dorsalen ACCs und dem medialen Frontalkortex assoziiert (Mulert et al., 2007).

Elektrophysiologische Studien zeigten, dass Betaaktivität mit Vorbereitung und inhibitorischer Kontrolle im motorischen System in Zusammenhang steht: Betaoszillationen sind erniedrigt zu Beginn einer Bewegung und erhöht wenn die Reaktion zurückgehalten wird (Baker et al., 1997; Pfurtscheller, 1981). Thetaoszillationen scheinen v.a. frontalen Mittellinienkortex einschließlich des anterioren cingulären Kortex ausgeprägt zu sein (Gevins et al., 1997; Onton et al., 2005) und für Handlungskontrolle, inklusive Fehler-Überwachung und Lernprozessen eine Rolle zu spielen (Luu et al., 2004). Bei Go/NoGo-Versuchen konnte eine frontale Theta-Aktivitätssteigerung für Go-Stimuli beobachtet werden (Barry, 2009).

Das Alphanband scheint ebenfalls an sensorischen, motorischen und kognitiven Prozessen beteiligt zu sein (Klimesch, 1997; Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999). Es wird angenommen, dass thalamo-kortikale Schaltkreise eine relevante Rolle für die Erzeugung von Alphaantworten spielen (Basar et al., 1997). Man vermutet, dass NoGo-spezifische Alphanbandwellen kurz vor und während der NoGo-N2, am initialen Teil des Inhibitionsprozesses beteiligt sind (Yamanaka & Yamamoto, 2010).

In unserer Studie wurden nicht nur extern gesteuerte kognitive Prozesse (Go-/NoGo-Aufgaben) innerlich gelenkten Entscheidungsaufgaben gegenübergestellt, sondern auch die beiden Entscheidungsarten (Reaktion ja/nein und Reaktion rechts/links) miteinander verglichen.

Aus dem Vergleich neuronaler Korrelate der beiden Entscheidungsarten, zum einen die Entscheidung, rechts oder links zu drücken („what“) und zum anderen die Entscheidung, ob überhaupt ein Tastendruck ausgeführt wird oder nicht („whether“), ergab sich eine interessante Beobachtung: Es konnten keine Unterschiede bezüglich der ERP-Komponenten N2 und P3 oder bei oszillatorischen Antworten festgestellt werden: Theta-, Alpha-, Beta- und Gammaaktivität unterschieden sich nicht signifikant zwischen den

Entscheidungen bei den verschiedenen Bedingungen. Außerdem waren die N2- und P3-Amplituden vergleichbar. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung elektrophysiologischer Antworten im EEG wurden in der aktuellen Studie keine Lokalisationsunterschiede untersucht. Ein direkter Vergleich verschiedener Entscheidungsarten bezüglich ihrer anatomischen Korrelate fand im Rahmen folgender Studien statt:

Krieghoff und Kollegen konnten zeigen, dass das Areal des rostralen Cingulums mit der Entscheidung, *welche* Handlung ausgeführt wird in Zusammenhang steht. (Krieghoff et al., 2009). Dies geht einher mit vorangehenden fMRT-Studien, welche die „what“-Komponente vorsätzlicher Kontrolle mit dem Bereich des rostralen Cingulums in Verbindung brachten (Brass & Haggard, 2008; Cunnington et al., 2006; De Baene et al., 2012). Kuhn und Brass (2009) fanden heraus, dass das Abwägen zu reagieren oder nicht („whether“-Entscheidung) ähnliche Gehirnareale involviert, nämlich das rostrale Cingulum sowie den dorsolateralen präfrontalen Kortex – unabhängig vom Ergebnis der Entscheidung. Daraus wurde gefolgert, dass absichtliches Nicht-Handeln auch als eine Art von Handlung angesehen werden kann (Kuhn & Brass, 2009).

Neben der ERP- und Frequenzbandanalyse diente die Reaktionszeitmessung als zuverlässige Messmethode beim Vergleich der Paradigmen. Bezüglich der Verhaltensdaten konnten längere Reaktionszeiten bei Entscheidungsaufgaben als bei extern getriggerten Aufgaben gemessen werden. Dies steht im Einklang mit Messergebnissen vorangehender Studien, welche ein vergleichbares Paradigma verwendeten (Karch et al., 2009; Karch et al., 2010b). Möglicherweise kann man daraus schließen, dass bei freien Entscheidungen zusätzliche kognitive Prozesse benötigt werden im Vergleich zu Stimulus gesteuerten Handlungen. Zwischen den Entscheidungsarten, d.h. zwischen Entscheidung Reaktion ja/nein („whether“) und Reaktion rechts/links („what“) konnte kein Reaktionszeitunterschied festgestellt werden.

Um die zeitliche Stabilität (Retest-Reliabilität) der elektrophysiologischen Korrelate zu untersuchen, wurden die Experimente an zwei unterschiedlichen Terminen durchgeführt. Zwischen den Messzeitpunkten ließen sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Höhe der N2- und P3-Amplitude bzw. bei der Frequenzbandanalyse feststellen.

Reliabilität ist besonders wichtig für die Untersuchung individueller Differenzen, die als Merkmalseigenschaften angesehen werden. Man geht davon aus, dass Merkmale homogene Eigenschaften repräsentieren, die zeitlich stabil sind (Fingelkurts et al.,

2006). Bezüglich der Test-Retest-Reliabilität von elektrophysiologischen Korrelaten gibt es einige Untersuchungen: Hong und Kollegen (2013) konnten zeigen, dass sowohl die P3-Amplitude als auch die P3-Latenz reliable Messinstrumente darstellen (Hong et al., 2013). Speziell dem P3-NoGo-Potential wurde von Brunner und Kollegen (2013) eine Langzeit-Stabilität zugesprochen, sodass das P3-NoGo-Potential als gut geeignetes, reliables Messinstrument für die Beurteilung von kognitiven Kontrollfunktionen in Klinik und Forschung angesehen wurde (Brunner et al., 2013a). Die N2-Amplitude konnte im Rahmen einer Eriksen Flanker Aufgabe ebenfalls eine Test-Retest-Stabilität aufweisen (Clayson & Larson, 2013). Fingelkurts und Kollegen (2006) untersuchten u.a. die Test-Retest-Reliabilität von Oszillationen anhand eines Wahrscheinlichkeits-Klassifikations-Profiles (PCP) während Gedächtnisaufgaben. Das PCP umfasst die Zusammensetzung der Oszillationen und ihr prozentuales Verhältnis zueinander. Es konnte gezeigt werden, dass die PCPs der gleichen Individuen u.a. eine große Ähnlichkeit zwischen zwei Versuchsterminen besitzen und dass die Spezifität für alle untersuchten Bedingungen sehr hoch ist. Es zeigten sich also keine systematischen Unterschiede bei der Zusammensetzung von Oszillationen und ihrem prozentualen Verhältnis zwischen zwei Versuchsterminen (Fingelkurts et al., 2006).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass das Treffen von Entscheidungen mit frontozentral lokalisierten N2- und P3-Potentialen in Zusammenhang steht. Diese Antworten scheinen ausgeprägter zu sein als die, die mit angeleiteten Reaktionen und der instruierten Inhibition von Reaktionen assoziiert sind. Außerdem waren Theta-, Alpha-, Beta- und Gammaband-Antworten während Entscheidungsaufgaben erhöht im Vergleich zu den instruierten Reaktionen. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass womöglich ein zusätzlicher kognitiver Prozess für das Treffen von Entscheidungen benötigt wird im Vergleich zu vorgegebenen Verhalten. Hierfür würden auch die längeren Reaktionszeiten bei Entscheidungsaufgaben als bei extern getriggerten Aufgaben sprechen. Die neuronalen Reaktionen waren vergleichsweise unabhängig von der Art der Entscheidung, die getroffen wurde.

E. Zusammenfassung

Im Alltag spielen exekutive Funktionen eine wichtige Rolle bei der Anpassung des eigenen Verhaltens an externe Anforderungen. Verhaltensinhibition und das Treffen von Entscheidungen sind höhere kognitive Prozesse, die dem Bereich der exekutiven Funktionen zugeordnet werden können und für die aktuelle Studie eine wichtige Rolle spielen. Das Treffen von Entscheidungen wird nicht nur durch innere Absichten, sondern auch durch externe Faktoren beeinflusst. Dies lässt die Frage aufkommen, inwieweit sich angeleitete Reaktionen von freien Entscheidungen unterscheiden, beziehungsweise ob sich die Entscheidung, welche Handlung ausgeführt wird, von der Entscheidung, ob überhaupt eine Handlung ausgeführt wird, abgrenzen lässt.

Bei einigen psychiatrischen Erkrankungen werden exekutive Dysfunktionen beobachtet, deren neuronale Grundlagen zum Beispiel mithilfe von ereigniskorrelierten Potentialen und Frequenzbandanalysen untersucht werden können. Verhaltenskontrollprozesse sind mit den ereigniskorrelierten Potentialen N2 und P3 assoziiert. Zusätzlich können anhand von Wavelet-Analysen verschiedene Frequenzbereiche genauer untersucht werden.

Ziele dieser Studie sind die Untersuchung elektrophysiologischer Korrelate von Verhaltensinhibition und Entscheidungsprozessen, die Auswirkung verschiedener Reaktionsmöglichkeiten auf diese elektrophysiologischen Korrelate sowie die zeitliche Stabilität der neurobiologischen Korrelate (Retest-Reliabilität).

28 gesunde männliche Probanden zwischen 20 und 35 Jahren nahmen an einem adaptierten Go/NoGo-Paradigma teil. Währenddessen wurden EEG-Aufzeichnungen durchgeführt.

Bei der Go-Bedingung wurden die Probanden aufgefordert, die rechte Reaktionstaste zu drücken, bei der NoGo-Bedingung sollten sie nicht reagieren (Inhibition). Bei der Entscheidungsaufgabe musste sich die erste Versuchsgruppe für oder gegen einen Tastendruck entscheiden, wohingegen die zweite Versuchsgruppe die Wahl hatte, entweder mit rechts oder links zu reagieren. Die drei Bedingungen wurden in pseudorandomisierter Reihenfolge präsentiert. Jeder Proband nahm zweimal an dem Experiment teil. Für die Erzeugung auditorischer Stimuli wurde das Programm Brain Stim 0.91 verwendet; die Reaktionen wurden von dem Programm Vision Recorder 0.94 registriert.

Die evozierten Potentiale wurden mit einem 32-Kanal-EEG (31 EEG-Kanäle, ein EOG-Kanal) digital mithilfe des EEG-Verstärkers Neuroscan SynAmps bei geöffneten Augen (Impedanz < 5 kOhm, Aufnahmezeitrate 1000 Hz, analoger Bandpassfilter 0,5 Hz–100 Hz) aufgezeichnet und mit der Vision Analyzer Software (Brain Products, München) analysiert. Für jede Versuchsbedingung (Go/NoGo/Entscheidung) wurden eine Segmentierung und eine Mittelung durchgeführt. Es erfolgten außerdem eine Baseline-Korrektur, eine Korrektur der Augenbewegungen sowie eine Artefaktkorrektur (minimale/maximale Amplitude +/- 70 mV). Zudem wurde eine kontinuierliche Wavelet-Transformation angewendet.

Bei Entscheidungsaufgaben waren die N2- und P3-Amplituden vor allem frontozentral lokalisiert. Im Vergleich zu angeleiteten Reaktionen (Go-Bedingung) wiesen Entscheidungsaufgaben größere N2- und P3-Amplituden auf. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von Karch und Kollegen in vorangehenden Studien (Karch et al., 2010b; Karch, 2009). Die P3 war vor allem in zentralen Bereichen bei der Inhibitionsbedingung ausgeprägter als bei der Entscheidungs- oder Go-Bedingung entsprechend den Beobachtungen von Karch und Kollegen (Karch et al., 2009).

Hervorzuheben ist, dass die Amplitude der N2 und P3 durch die Art der Entscheidung (Entscheidung Reaktion ja/nein vs. Entscheidung Reaktion rechts/links) nicht beeinflusst wurde. Auch zwischen den Messzeitpunkten ließen sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Höhe der N2- und P3-Amplitude bzw. bei der Frequenzbandanalyse feststellen. Dass die P3-Latenz als auch die P3-Amplitude als reliable Messinstrumente gelten, konnten Hong und Kollegen (2013) in ihrer Studie zeigen (Hong et al., 2013). Der N2-Amplitude konnte ebenfalls eine Test-Retest-Stabilität zugesprochen werden (Clayson et al., 2013). Darüber hinaus wurde in der Studie von Fingelkurts und Kollegen (2006) die Test-Retest-Reliabilität der Oszillationen demonstriert (Fingelkurts et al., 2006).

Bei der Frequenzbandanalyse konnten in der aktuellen Studie erhöhte Theta-, Alpha-, Beta- und Gammaaktivität während Entscheidungsaufgaben im Vergleich zu angeleiteten Aufgaben (Go) und Inhibitionsaufgaben (NoGo) festgestellt werden. Die Oszillationen zeigten vor allem in frontalen und frontozentralen Bereichen eine erhöhte Aktivität.

Ein Aktivitätsanstieg im Thetaband-Bereich in frontalen Hirnregionen wird mit verschiedenen exekutiven Funktionen, wie selektiver Aufmerksamkeit, (Gevins et al., 1997; Ishii et al., 1999), Fehlerverarbeitung (Cavanagh et al., 2009; Cohen, 2011; Luu &

Tucker, 2001; Trujillo & Allen, 2007) und Gedächtnisprozessen (Klimesch et al., 2001; Scheeringa et al., 2009) assoziiert. Lisman und Idiart (1995) gehen davon aus, dass Thetaoszillationen, welche insbesondere im frontalen Mittellinienkortex einschließlich des anterioren cingulären Kortex lokalisiert sind (Gevins et al., 1997; Onton et al., 2005), möglicherweise zur Kommunikation zwischen verschiedenen Hirnregionen beitragen. Eine Verbindung mit anderen Frequenzbereichen, entsprechend einer phasischen Kopplung zwischen frontalen Theta- und posterioren Gammaoszillationen wird vermutet (Lisman & Idiart, 1995). Gammaoszillationen, auch als sogenannte „Hypervigilanzrhythmus“ (Bouyer et al., 1981) bezeichnet, zeigten im Experiment von Ford und Kollegen (2008) vor einem freiwilligen Tastendruck eine maximale Synchronität über dem kontralateralen sensorimotorischen Kortex, was mit der ipsilateralen somatosensorischen ERP-Amplitude, die durch den Tastendruck evoziert wurde, korrelierte (Ford et al., 2008). Von Mulert und Kollegen (2007) wurde Gammabandaktivität mit Mittellinienbereichen einschließlich des dorsalen ACCs und dem medialen Frontalkortex assoziiert (Mulert et al., 2007). Hinsichtlich des Betabands ist bekannt, dass Betaaktivität für Vorbereitung und inhibitorische Kontrolle im motorischen System eine Rolle spielt. Betaoszillationen sind verringert zu Beginn einer Bewegung und erhöht wenn die Reaktion zurückgehalten wird (Baker et al., 1997; Pfurtscheller, 1981). Für Entscheidungsprozesse spielen also wahrscheinlich insbesondere Beta- und Gammaoszillationen eine größere Rolle. Das Alphaband scheint ebenfalls an sensorischen, motorischen und kognitiven Prozessen beteiligt (Klimesch, 1997; Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999) und entscheidend für das Arbeitsgedächtnis zu sein (Basar, 2001; Oniz & Basar, 2009; Sauseng, 2008).

Zusammenfassend kann man sagen, dass Entscheidungsprozesse verstärkte oszillatorische Reaktionen hervorrufen und die P3 vor allem mit der Inhibition von Verhalten assoziiert werden kann. Daneben zeigte sich eine hohe Retest-Reliabilität sowohl für die ereigniskorrelierten Potentiale als auch für die Frequenzbandanalysen. Gezeigt hat sich außerdem, dass die Art der Entscheidung keinen entscheidenden Einfluss auf die elektrophysiologischen Korrelate hat.

Es hat sich herausgestellt, dass sich neuronale Korrelate von Entscheidungsprozessen mit Hilfe von evozierten Potentialen zuverlässig und stabil messen lassen. Die starken Reaktionen vor allem im Gamma- und Betafrequenzbereich sprechen für eine Beteiligung von komplexen kognitiven Prozessen bei dem Treffen von Entscheidungen.

Diese Studienergebnisse bilden die Grundlage dafür, elektrophysiologische Korrelate von Entscheidungen auch bei Patienten mit psychiatrischen Erkrankungen messen zu können sowie die Ursache beziehungsweise Korrelate der exekutiven Defizite bei Patienten genauer zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- Ariely, D., & Norton, M. I. (2008). How actions create--not just reveal--preferences. *Trends Cogn Sci*, 12(1), 13-16. doi: 10.1016/j.tics.2007.10.008
- Aron, A. R. (2007). The neural basis of inhibition in cognitive control. *Neuroscientist*, 13(3), 214-228. doi: 10.1177/1073858407299288
- Aron, A. R., Behrens, T. E., Smith, S., Frank, M. J., & Poldrack, R. A. (2007). Triangulating a cognitive control network using diffusion-weighted magnetic resonance imaging (MRI) and functional MRI. *J Neurosci*, 27(14), 3743-3752. doi: 10.1523/jneurosci.0519-07.2007
- Aron, A. R., & Poldrack, R. A. (2005). The cognitive neuroscience of response inhibition: relevance for genetic research in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biol Psychiatry*, 57(11), 1285-1292. doi: 10.1016/j.biopsych.2004.10.026
- Aron, A. R., & Poldrack, R. A. (2006). Cortical and subcortical contributions to Stop signal response inhibition: role of the subthalamic nucleus. *J Neurosci*, 26(9), 2424-2433. doi: 10.1523/jneurosci.4682-05.2006
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn Sci*, 8(4), 170-177. doi: 10.1016/j.tics.2004.02.010
- Baker, S. N., Olivier, E., & Lemon, R. N. (1997). Coherent oscillations in monkey motor cortex and hand muscle EMG show task-dependent modulation. *J Physiol*, 501 (Pt 1), 225-241.
- Band, G. P., Ridderinkhof, K. R., & van der Molen, M. W. (2003). Speed-accuracy modulation in case of conflict: the roles of activation and inhibition. *Psychol Res*, 67(4), 266-279. doi: 10.1007/s00426-002-0127-0
- Bargh, J. A., Gollwitzer, P. M., Lee-Chai, A., Barndollar, K., & Trötschel, R. (2001). The automated will: nonconscious activation and pursuit of behavioral goals. *J Pers Soc Psychol*, 81(6), 1014-1027.
- Barkley, R. A. (1997). *ADHD and the Nature of Self Control*. NY, London: Guilford Pubn.
- Barry, R. J. (2009). Evoked activity and EEG phase resetting in the genesis of auditory Go/NoGo ERPs. *Biol Psychol*, 80(3), 292-299. doi: 10.1016/j.biopsycho.2008.10.009

Basar-Eroglu, C., Basar, E., Demiralp, T., & Schurmann, M. (1992). P300-response: possible psychophysiological correlates in delta and theta frequency channels. A review. *Int J Psychophysiol*, 13(2), 161-179.

Basar, E., Basar-Eroglu, C., Karakas, S., Schurmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *Int J Psychophysiol*, 39, 241-248.

Basar, E., Schurmann, M., Basar-Eroglu, C., & Karakas, S. (1997). Alpha oscillations in brain functioning: an integrative theory. *Int J Psychophysiol*, 26(1-3), 5-29.

Baumeister, R. F., Vohs, K.D., Tice, D.M. (2007). The strength model of self-control. *Current Directions in Psychological Science*, 16(6), 351-355.

Beck, A. T. W., C.; Mendelson M. . (1961). Beck Depression Inventory (BDI). *Arch Gen Psychiatry* 4, 561-571.

Bekker, E. M., Kenemans, J. L., Hoeksma, M. R., Talsma, D., & Verbaten, M. N. (2005a). The pure electrophysiology of stopping. *Int J Psychophysiol*, 55(2), 191-198. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2004.07.005

Bekker, E. M., Kenemans, J. L., & Verbaten, M. N. (2004). Electrophysiological correlates of attention, inhibition, sensitivity and bias in a continuous performance task. *Clin Neurophysiol*, 115(9), 2001-2013. doi: 10.1016/j.clinph.2004.04.008

Bekker, E. M., Kenemans, J. L., & Verbaten, M. N. (2005b). Source analysis of the N2 in a cued Go/NoGo task. *Brain Res Cogn Brain Res*, 22(2), 221-231. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2004.08.011

Bekker, E. M., Overtom, C. C., Kenemans, J. L., Kooij, J. J., De Noord, I., Buitelaar, J. K., & Verbaten, M. N. (2005c). Stopping and changing in adults with ADHD. *Psychol Med*, 35(6), 807-816.

Bekker, E. M., Overtom, C. C., Kooij, J. J., Buitelaar, J. K., Verbaten, M. N., & Kenemans, J. L. (2005d). Disentangling deficits in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Arch Gen Psychiatry*, 62(10), 1129-1136. doi: 10.1001/archpsyc.62.10.1129

Bengson, J. J., Mangun, G. R., & Mazaheri, A. (2012). The neural markers of an imminent failure of response inhibition. *Neuroimage*, 59(2), 1534-1539. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.08.034

Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Arch f Psychiatr.*, 87, 527-570.

Bleuler, E. (1911). Dementia Praecox oder Gruppe der Schizophrenien. In G. Aschaffenburg (Hg.), *Handbuch der Psychiatrie*, Spezieller Teil, 4. Abt., 1. Hälfte. Leipzig u. Wien: Franz Deuticke.

Boccardi, E., Della Sala, S., Motto, C., & Spinnler, H. (2002). Utilisation behaviour consequent to bilateral SMA softening. *Cortex*, 38(3), 289-308.

Bokura, H., Yamaguchi, S., & Kobayashi, S. (2001). Electrophysiological correlates for response inhibition in a Go/NoGo task. *Clin Neurophysiol*, 112(12), 2224-2232.

Bouyer, J. J., Montaron, M. F., & Rougeul, A. (1981). Fast fronto-parietal rhythms during combined focused attentive behaviour and immobility in cat: cortical and thalamic localizations. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 51(3), 244-252.

Brandeis, D., van Leeuwen, T. H., Rubia, K., Vitacco, D., Steger, J., Pascual-Marqui, R. D., & Steinhausen, H. C. (1998). Neuroelectric mapping reveals precursor of stop failures in children with attention deficits. *Behav Brain Res*, 94(1), 111-125.

Brass, M., & Haggard, P. (2007). To do or not to do: the neural signature of self-control. *J Neurosci*, 27(34), 9141-9145. doi: 10.1523/jneurosci.0924-07.2007

Brass, M., & Haggard, P. (2008). The what, when, whether model of intentional action. *Neuroscientist*, 14(4), 319-325. doi: 10.1177/1073858408317417

Bressler, S. L. (1990). The gamma wave: a cortical information carrier? *Trends Neurosci*, 13(5), 161-162.

Brittain, J. S., Watkins, K. E., Joundi, R. A., Ray, N. J., Holland, P., Green, A. L., . . . Jenkinson, N. (2012). A role for the subthalamic nucleus in response inhibition during conflict. *J Neurosci*, 32(39), 13396-13401. doi: 10.1523/jneurosci.2259-12.2012

Bruin, K. J., & Wijers, A. A. (2002). Inhibition, response mode, and stimulus probability: a comparative event-related potential study. *Clin Neurophysiol*, 113(7), 1172-1182.

Brunner, J. F., Hansen, T. I., Olsen, A., Skandsen, T., Haberg, A., & Kropotov, J. (2013a). Long-term test-retest reliability of the P3 NoGo wave and two independent components decomposed from the P3 NoGo wave in a visual Go/NoGo task. *Int J Psychophysiol*, 89(1), 106-114. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2013.06.005

Brunner, J. F., Hansen, T. I., Olsen, A., Skandsen, T., Haberg, A., & Kropotov, J. (2013b). Long-term test-retest reliability of the P3 NoGo wave and two independent components decomposed from the P3 NoGo wave in a visual Go/NoGo task. *Int J Psychophysiol*. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2013.06.005

Cai, W., & Leung, H. C. (2009). Cortical activity during manual response inhibition guided by color and orientation cues. *Brain Res*, 1261, 20-28. doi: 10.1016/j.brainres.2008.12.073

Casey, B. J., Castellanos, F. X., Giedd, J. N., Marsh, W. L., Hamburger, S. D., Schubert, A. B., . . . Rapoport, J. L. (1997). Implication of right frontostriatal circuitry in response inhibition and attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 36(3), 374-383. doi: 10.1097/00004583-199703000-00016

Cavanagh, J. F., Cohen, M. X., & Allen, J. J. (2009). Prelude to and resolution of an error: EEG phase synchrony reveals cognitive control dynamics during action monitoring. *J Neurosci*, 29(1), 98-105. doi: 10.1523/jneurosci.4137-08.2009

Chao, H. H., Luo, X., Chang, J. L., & Li, C. S. (2009). Activation of the pre-supplementary motor area but not inferior prefrontal cortex in association with short stop signal reaction time--an intra-subject analysis. *BMC Neurosci*, 10, 75. doi: 10.1186/1471-2202-10-75

Chen, W. J., Hsiao, C. K., Hsiao, L. L., & Hwu, H. G. (1998). Performance of the Continuous Performance Test among community samples. *Schizophr Bull*, 24(1), 163-174.

Clayson, P. E., & Larson, M. J. (2013). Psychometric properties of conflict monitoring and conflict adaptation indices: Response time and conflict N2 event-related potentials. *Psychophysiology*. doi: 10.1111/psyp.12138

Cohen, M. X. (2011). Error-related medial frontal theta activity predicts cingulate-related structural connectivity. *Neuroimage*, 55(3), 1373-1383. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.12.072

Cornblatt, B. A., & Keilp, J. G. (1994). Impaired attention, genetics, and the pathophysiology of schizophrenia. *Schizophr Bull*, 20(1), 31-46.

Costa, P. T. J. M., R.R. (1989). *The NEO-PI/NEO-FFI manual supplement*. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources, Inc.

Crichton-Browne, J. (1879). On the weight of the brain and its component in the insane. *Brain*, 2, 42-67.

Cunnington, R., Windischberger, C., Robinson, S., & Moser, E. (2006). The selection of intended actions and the observation of others' actions: a time-resolved fMRI study. *Neuroimage*, 29(4), 1294-1302. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.09.028

De Baene, W., Albers, A. M., & Brass, M. (2012). The what and how components of cognitive control. *Neuroimage*, 63(1), 203-211. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.06.050

De Jong, R., Coles, M. G., Logan, G. D., & Gratton, G. (1990). In search of the point of no return: the control of response processes. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 16(1), 164-182.

de Zubicaray, G. I., Andrew, C., Zelaya, F. O., Williams, S. C., & Dumanoir, C. (2000). Motor response suppression and the prepotent tendency to respond: a parametric fMRI study. *Neuropsychologia*, 38(9), 1280-1291.

Deetjen, P., Speckmann, E., & Hescheler, J. (2005). *Physiologie* (4. Auflage, S. 281-288). München Jena: Elsevier.

Demanet, J., De Baene, W., Arrington, C. M., & Brass, M. (2013). Biasing free choices: the role of the rostral cingulate zone in intentional control. *Neuroimage*, 72, 207-213. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.01.052

Dennett, D. C. (1984). Elbow room: The varieties of free will worth wanting. *The MIT Press*.

Dillon, D. G., & Pizzagalli, D. A. (2007). Inhibition of Action, Thought, and Emotion: A Selective Neurobiological Review. *Appl Prev Psychol*, 12(3), 99-114. doi: 10.1016/j.appsy.2007.09.004

Dimoska, A., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2006). The auditory-evoked N2 and P3 components in the stop-signal task: indices of inhibition, response-conflict or error-detection? *Brain Cogn*, 62(2), 98-112. doi: 10.1016/j.bandc.2006.03.011

Dimoska, A., Johnstone, S. J., Barry, R. J., & Clarke, A. R. (2003). Inhibitory motor control in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: event-related potentials in the stop-signal paradigm. *Biol Psychiatry*, 54(12), 1345-1354.

- Dockree, P. M., & Robertson, I. H. (2011). Electrophysiological markers of cognitive deficits in traumatic brain injury: a review. *Int J Psychophysiol*, 82(1), 53-60. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2011.01.004
- Donchin, E. C., M. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behav. Brain Sci* 11, 357-375.
- Donkers, F. C., & van Boxtel, G. J. (2004). The N2 in go/no-go tasks reflects conflict monitoring not response inhibition. *Brain Cogn*, 56(2), 165-176. doi: 10.1016/j.bandc.2004.04.005
- Duncan, C. C. B., R. J.; Connolly, J. F.; Fischer, C.; Michie, P. T.; Naatanen, R.; Polich, J.; Reinvang, I.; Van Petten, C. (2009). Event-related potentials in clinical research: guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clin Neurophysiol*, 120(11), 1883-1908. doi: 10.1016/j.clinph.2009.07.045
- Ebner, A., & Deuschl, G. (2011). *EEG* (2. Auflage, S. 42). Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- Eimer, M. (1993). Effects of attention and stimulus probability on ERPs in a Go/Nogo task. *Biol Psychol*, 35(2), 123-138.
- Enriquez-Geppert, S., Konrad, C., Pantev, C., & Huster, R. J. (2010). Conflict and inhibition differentially affect the N200/P300 complex in a combined go/nogo and stop-signal task. *Neuroimage*, 51(2), 877-887. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.043
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1999). ERP components in Go/Nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta Psychol (Amst)*, 101(2-3), 267-291.
- Filevich, E., & Haggard, P. (2012). Grin and bear it! Neural consequences of a voluntary decision to act or inhibit action. *Exp Brain Res*, 223(3), 341-351. doi: 10.1007/s00221-012-3263-9
- Filevich, E., Kuhn, S., & Haggard, P. (2012). Intentional inhibition in human action: the power of 'no'. *Neurosci Biobehav Rev*, 36(4), 1107-1118. doi: 10.1016/j.neubiorev.2012.01.006
- Fingelkurts, A. A., Ermolaev, V. A., & Kaplan, A. Y. (2006). Stability, reliability and consistency of the compositions of brain oscillations. *Int J Psychophysiol*, 59(2), 116-126. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2005.03.014

- Fisher, T., Aharon-Peretz, J., & Pratt, H. (2011). Dis-regulation of response inhibition in adult Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD): an ERP study. *Clin Neurophysiol*, 122(12), 2390-2399. doi: 10.1016/j.clinph.2011.05.010
- Fleming, S. M., Mars, R. B., Gladwin, T. E., & Haggard, P. (2009). When the brain changes its mind: flexibility of action selection in instructed and free choices. *Cereb Cortex*, 19(10), 2352-2360. doi: 10.1093/cercor/bhn252
- Folmer, R. L., Billings, C. J., Diedesch-Rouse, A. C., Gallun, F. J., & Lew, H. L. (2011). Electrophysiological assessments of cognition and sensory processing in TBI: applications for diagnosis, prognosis and rehabilitation. *Int J Psychophysiol*, 82(1), 4-15. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2011.03.005
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology*, 45(1), 152-170. doi: 10.1111/j.1469-8986.2007.00602.x
- Ford, J. M., Roach, B. J., Faustman, W. O., & Mathalon, D. H. (2008). Out-of-synch and out-of-sorts: dysfunction of motor-sensory communication in schizophrenia. *Biol Psychiatry*, 63(8), 736-743. doi: 10.1016/j.biopsych.2007.09.013
- Forstmann, B. U., Brass, M., Koch, I., & von Cramon, D. Y. (2006). Voluntary selection of task sets revealed by functional magnetic resonance imaging. *J Cogn Neurosci*, 18(3), 388-398. doi: 10.1162/089892906775990589
- Forstmann, B. U., Ridderinkhof, K. R., Kaiser, J., & Bledowski, C. (2007). At your own peril: an ERP study of voluntary task set selection processes in the medial frontal cortex. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 7(4), 286-296.
- Forstmann, B. U., Wolfensteller, U., Derrfuss, J., Neumann, J., Brass, M., Ridderinkhof, K. R., & von Cramon, D. Y. (2008). When the choice is ours: context and agency modulate the neural bases of decision-making. *PLoS One*, 3(4), e1899. doi: 10.1371/journal.pone.0001899
- Franke, P., Maier, W., Hain, C., & Klingler, T. (1992). Wisconsin Card Sorting Test: an indicator of vulnerability to schizophrenia? *Schizophr Res*, 6(3), 243-249.
- Fried, I., Mukamel, R., & Kreiman, G. (2011). Internally generated preactivation of single neurons in human medial frontal cortex predicts volition. *Neuron*, 69(3), 548-562. doi: 10.1016/j.neuron.2010.11.045

Friston, K. J., Liddle, P. F., Frith, C. D., Hirsch, S. R., & Frackowiak, R. S. (1992). The left medial temporal region and schizophrenia. A PET study. *Brain, 115* (Pt 2), 367-382.

Frith, C. D. (1979). Consciousness, information processing and schizophrenia. *Br J Psychiatry, 134*, 225-235.

Gajewski, P. D., Stoerig, P., & Falkenstein, M. (2008). ERP--correlates of response selection in a response conflict paradigm. *Brain Res, 1189*, 127-134. doi: 10.1016/j.brainres.2007.10.076

Galambos, R. (1992). A comparison of certain gamma band (40-Hz) brain rhythms in cat and man *Induced rhythms in the brain* (pp. 201-216): Springer.

Garavan, H., Ross, T. J., & Stein, E. A. (1999). Right hemispheric dominance of inhibitory control: an event-related functional MRI study. *Proc Natl Acad Sci U S A, 96*(14), 8301-8306.

Geczy, I., Czigler, I., & Balazs, L. (1999). Effects of cue information on response production and inhibition measured by event-related potentials. *Acta Physiol Hung, 86*(1), 37-44.

Gemba, H., & Sasaki, K. (1989). Potential related to no-go reaction of go/no-go hand movement task with color discrimination in human. *Neurosci Lett, 101*(3), 263-268.

Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cereb Cortex, 7*(4), 374-385.

Haggard, P. (2008). Human volition: towards a neuroscience of will. *Nat Rev Neurosci, 9*(12), 934-946. doi: 10.1038/nrn2497

Haggard, P. (2011). Decision time for free will. *Neuron, 69*(3), 404-406. doi: 10.1016/j.neuron.2011.01.028

Helenius, P., Laasonen, M., Hokkanen, L., Paetau, R., & Niemivirta, M. (2010). Neural correlates of late positivities associated with infrequent visual events and response errors. *Neuroimage, 53*(2), 619-628. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.06.059

Hepp, H. H., Maier, S., Hermle, L., & Spitzer, M. (1996). The Stroop effect in schizophrenic patients. *Schizophr Res, 22*(3), 187-195.

- Herrmann, C. S., & Demiralp, T. (2005). Human EEG gamma oscillations in neuropsychiatric disorders. *Clin Neurophysiol*, *116*(12), 2719-2733. doi: 10.1016/j.clinph.2005.07.007
- Hong, J. S., Lee, J. H., Yoon, Y. H., Choi, J. H., Shin, J. E., Kim, S. M., & Park, Y. G. (2013). The assessment of reliability of cognitive evoked potential in normal person. *Ann Rehabil Med*, *37*(2), 263-268. doi: 10.5535/arm.2013.37.2.263
- Hoshi, E., & Tanji, J. (2004). Differential roles of neuronal activity in the supplementary and presupplementary motor areas: from information retrieval to motor planning and execution. *J Neurophysiol*, *92*(6), 3482-3499. doi: 10.1152/jn.00547.2004
- Ishii, R., Shinosaki, K., Ukai, S., Inouye, T., Ishihara, T., Yoshimine, T., . . . Takeda, M. (1999). Medial prefrontal cortex generates frontal midline theta rhythm. *Neuroreport*, *10*(4), 675-679.
- Izuma, K., & Murayama, K. (2013). Choice-induced preference change in the free-choice paradigm: a critical methodological review. *Front Psychol*, *4*, 41. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00041
- Jodo, E., & Inoue, K. (1990). Effects of practice on the P300 in a Go/NoGo task. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *76*(3), 249-257.
- Jodo, E., & Kayama, Y. (1992). Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *82*(6), 477-482.
- Johnstone, S. J., Dimoska, A., Smith, J. L., Barry, R. J., Pleffer, C. B., Chiswick, D., & Clarke, A. R. (2007). The development of stop-signal and Go/Nogo response inhibition in children aged 7-12 years: performance and event-related potential indices. *Int J Psychophysiol*, *63*(1), 25-38. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2006.07.001
- Jonkman, L. M., Kemner, C., Verbaten, M. N., Koelega, H. S., Camfferman, G., vd Gaag, R. J., . . . van Engeland, H. (1997). Effects of methylphenidate on event-related potentials and performance of attention-deficit hyperactivity disorder children in auditory and visual selective attention tasks. *Biol Psychiatry*, *41*(6), 690-702.
- Jonkman, L. M., Kenemans, J. L., Kemner, C., Verbaten, M. N., & van Engeland, H. (2004). Dipole source localization of event-related brain activity indicative of an early visual selective attention deficit in ADHD children. *Clin Neurophysiol*, *115*(7), 1537-1549. doi: 10.1016/j.clinph.2004.01.022

Karayanidis, F., Robaey, P., Bourassa, M., De Koning, D., Geoffroy, G., & Pelletier, G. (2000). ERP differences in visual attention processing between attention-deficit hyperactivity disorder and control boys in the absence of performance differences. *Psychophysiology*, *37*(3), 319-333.

Karch, S., Feuerecker, R., Leicht, G., Meindl, T., Hantschk, I., Kirsch, V., . . . Mulert, C. (2010a). Separating distinct aspects of the voluntary selection between response alternatives: N2- and P3-related BOLD responses. *Neuroimage*, *51*(1), 356-364. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.028

Karch, S., Mulert, C., Thalmeier, T., Lutz, J., Leicht, G., Meindl, T., . . . Pogarell, O. (2009). The free choice whether or not to respond after stimulus presentation. *Hum Brain Mapp*, *30*(9), 2971-2985.

Karch, S., Thalmeier, T., Lutz, J., Cerovecki, A., Opgen-Rhein, M., Hock, B., . . . Pogarell, O. (2010b). Neural correlates (ERP/fMRI) of voluntary selection in adult ADHD patients. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*, *260*(5), 427-440. doi: 10.1007/s00406-009-0089-y

Karch, S. M., C.; Thalmeier, T.; Lutz, J.; Leicht, G.; Meindl, T.; Möller, H.J.; Jäger, L.; Pogarell, O. (2009). The free choice whether or not to respond after stimulus presentation. *Hum. Brain Mapp.*, *30*, 2971-2985.

Kawashima, R., Satoh, K., Itoh, H., Ono, S., Furumoto, S., Gotoh, R., . . . Fukuda, H. (1996). Functional anatomy of GO/NO-GO discrimination and response selection--a PET study in man. *Brain Res*, *728*(1), 79-89.

Kenemans, J. L., Bekker, E. M., Lijffijt, M., Overtom, C. C., Jonkman, L. M., & Verbaten, M. N. (2005). Attention deficit and impulsivity: selecting, shifting, and stopping. *Int J Psychophysiol*, *58*(1), 59-70. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2005.03.009

Kiefer, M., Marzinzik, F., Weisbrod, M., Scherg, M., & Spitzer, M. (1998). The time course of brain activations during response inhibition: evidence from event-related potentials in a go/no go task. *Neuroreport*, *9*(4), 765-770.

Klimesch, W. (1997). EEG-alpha rhythms and memory processes. *Int J Psychophysiol*, *26*(1-3), 319-340.

Klimesch, W., Doppelmayr, M., Russegger, H., Pachinger, T., & Schwaiger, J. (1998). Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neurosci Lett*, *244*(2), 73-76.

- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Yonelinas, A., Kroll, N. E., Lazzara, M., Rohm, D., & Gruber, W. (2001). Theta synchronization during episodic retrieval: neural correlates of conscious awareness. *Brain Res Cogn Brain Res*, 12(1), 33-38.
- Kok, A. (1986). Effects of degradation of visual stimulation on components of the event-related potential (ERP) in go/nogo reaction tasks. *Biol Psychol*, 23(1), 21-38.
- Kok, A., Ramautar, J. R., De Ruiter, M. B., Band, G. P., & Ridderinkhof, K. R. (2004). ERP components associated with successful and unsuccessful stopping in a stop-signal task. *Psychophysiology*, 41(1), 9-20. doi: 10.1046/j.1469-8986.2003.00127.x
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kikyo, H., Kameyama, M., & Miyashita, Y. (1999). Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI. *Brain*, 122 (Pt 5), 981-991.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Sekihara, K., & Miyashita, Y. (1998). No-go dominant brain activity in human inferior prefrontal cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *Eur J Neurosci*, 10(3), 1209-1213.
- Kopp, B., Mattler, U., Goertz, R., & Rist, F. (1996). N2, P3 and the lateralized readiness potential in a nogo task involving selective response priming. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 99(1), 19-27.
- Kotchoubey, B. (2006). Event-related potentials, cognition, and behavior: A biological approach. [Review]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30, 42-65.
- Kraepelin, E. (1913). *Psychiatrie. Ein Lehrbuch für Studierende und Ärzte*. III. Band: *Klinische Psychiatrie* (8. Auflage). Leipzig: Johan Brosius Barth Verlag.
- Krieghoff, V., Brass, M., Prinz, W., & Waszak, F. (2009). Dissociating what and when of intentional actions. *Front Hum Neurosci*, 3, 3. doi: 10.3389/neuro.09.003.2009
- Krieghoff, V., Waszak, F., Prinz, W., & Brass, M. (2011). Neural and behavioral correlates of intentional actions. *Neuropsychologia*, 49(5), 767-776. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.01.025
- Kropotov, J. D., Ponomarev, V. A., Hollup, S., & Mueller, A. (2011). Dissociating action inhibition, conflict monitoring and sensory mismatch into independent components of event related potentials in GO/NOGO task. *Neuroimage*, 57(2), 565-575. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.04.060

- Kuhn, S., & Brass, M. (2009). When doing nothing is an option: the neural correlates of deciding whether to act or not. *Neuroimage*, 46(4), 1187-1193. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.03.020
- Lau, H. C., Rogers, R. D., Haggard, P., & Passingham, R. E. (2004a). Attention to intention. *Science*, 303(5661), 1208-1210. doi: 10.1126/science.1090973
- Lau, H. C., Rogers, R. D., Ramnani, N., & Passingham, R. E. (2004b). Willed action and attention to the selection of action. *Neuroimage*, 21(4), 1407-1415. doi: 10.1016/j.neuroimage.2003.10.034
- Lavric, A., Pizzagalli, D. A., & Forstmeier, S. (2004). When 'go' and 'nogo' are equally frequent: ERP components and cortical tomography. *Eur J Neurosci*, 20(9), 2483-2488. doi: 10.1111/j.1460-9568.2004.03683.x
- Lenartowicz, A. K., Donald J.; Congdon, Eliza; Poldrack, Ronald (2010). Towards an Ontology of Cognitive Control. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 678-692.
- Leung, H. C., & Cai, W. (2007). Common and differential ventrolateral prefrontal activity during inhibition of hand and eye movements. *J Neurosci*, 27(37), 9893-9900. doi: 10.1523/jneurosci.2837-07.2007
- Li, C. S., Huang, C., Constable RT, Sinha, R. (2006). Imaging response inhibition in a stop-signal task: neural correlates independent of signal monitoring and post-response processing. *J Neurosci*, 26(1), 186-192.
- Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., & Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain*, 106 (Pt 3), 623-642.
- Liddle, P. F., Kiehl, K. A., & Smith, A. M. (2001). Event-related fMRI study of response inhibition. *Hum Brain Mapp*, 12(2), 100-109.
- Lisman, J. E., & Idiart, M. A. (1995). Storage of 7 +/- 2 short-term memories in oscillatory subcycles. *Science*, 267(5203), 1512-1515.
- Logan, G. D., Cowan, W.B. (1984). On the ability to inhibit thought and action - A theory of an act of control. *Psychological Review*, 91(3), 295-327.
- Loo, S. K., & Makeig, S. (2012). Clinical utility of EEG in attention-deficit/hyperactivity disorder: a research update. *Neurotherapeutics*, 9(3), 569-587. doi: 10.1007/s13311-012-0131-z

Luu, P., & Tucker, D. M. (2001). Regulating action: alternating activation of midline frontal and motor cortical networks. *Clin Neurophysiol*, *112*(7), 1295-1306.

Luu, P., Tucker, D. M., & Makeig, S. (2004). Frontal midline theta and the error-related negativity: neurophysiological mechanisms of action regulation. *Clin Neurophysiol*, *115*(8), 1821-1835. doi: 10.1016/j.clinph.2004.03.031

Luys, J. B. (1881). Contribution à l'étude d'une statistique sur les poids des hemispheres cerebraux à l'état pathologique. *Encephale*, *1*, 644-646.

Martinovic, J., & Busch, N. A. (2011). High frequency oscillations as a correlate of visual perception. *Int J Psychophysiol*, *79*(1), 32-38. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2010.07.004

Matsushashi, M., & Hallett, M. (2008). The timing of the conscious intention to move. *Eur J Neurosci*, *28*(11), 2344-2351. doi: 10.1111/j.1460-9568.2008.06525.x

Matsuzaka, Y., Aizawa, H., & Tanji, J. (1992). A motor area rostral to the supplementary motor area (presupplementary motor area) in the monkey: neuronal activity during a learned motor task. *J Neurophysiol*, *68*(3), 653-662.

Matthews, S. C., Simmons, A. N., Arce, E., & Paulus, M. P. (2005). Dissociation of inhibition from error processing using a parametric inhibitory task during functional magnetic resonance imaging. *Neuroreport*, *16*(7), 755-760.

Meere, J. v. d., Stemerink, N., Gunning, B. (1995). Effects of presentation rate of stimuli on response inhibition in ADHD children with and without tics. *Perceptual Motor Skills*, *81*, 259-262.

Menon, V., Adleman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Hum Brain Mapp*, *12*(3), 131-143.

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu Rev Neurosci*, *24*, 167-202. doi: 10.1146/annurev.neuro.24.1.167

Möller, H., Laux, G., & Deister, A. (2009). *Duale Reihe Psychiatrie und Psychotherapie* (4. Auflage, S. 139). Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.

Morstyn, R., Duffy, F. H., & McCarley, R. W. (1983). Altered P300 topography in schizophrenia. *Arch Gen Psychiatry*, *40*(7), 729-734.

Mostofsky, S. H., Schafer, J. G., Abrams, M. T., Goldberg, M. C., Flower, A. A., Boyce, A., . . . Pekar, J. J. (2003). fMRI evidence that the neural basis of response inhibition is task-dependent. *Brain Res Cogn Brain Res*, *17*(2), 419-430.

Mostofsky, S. H., & Simmonds, D. J. (2008). Response inhibition and response selection: two sides of the same coin. *J Cogn Neurosci*, *20*(5), 751-761. doi: 10.1162/jocn.2008.20500

Mulert, C., Menzinger, E., Leicht, G., Pogarell, O., & Hegerl, U. (2005). Evidence for a close relationship between conscious effort and anterior cingulate cortex activity. *Int J Psychophysiol*, *56*(1), 65-80. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2004.10.002

Mulligan, R. C., Knopik, V. S., Sweet, L. H., Fischer, M., Seidenberg, M., & Rao, S. M. (2011). Neural correlates of inhibitory control in adult attention deficit/hyperactivity disorder: evidence from the Milwaukee longitudinal sample. *Psychiatry Res*, *194*(2), 119-129. doi: 10.1016/j.psychresns.2011.02.003

Nachev, P., & Husain, M. (2010). Action and the fallacy of the 'internal': Comment on Passingham et al. *Trends Cogn Sci*, *14*(5), 192-193; author reply 193-194. doi: 10.1016/j.tics.2010.03.002

Nachev, P., Rees, G., Parton, A., Kennard, C., & Husain, M. (2005). Volition and conflict in human medial frontal cortex. *Curr Biol*, *15*(2), 122-128. doi: 10.1016/j.cub.2005.01.006

Nieuwenhuis, S., Yeung, N., & Cohen, J. D. (2004). Stimulus modality, perceptual overlap, and the go/no-go N2. *Psychophysiology*, *41*(1), 157-160. doi: 10.1046/j.1469-8986.2003.00128.x

Nieuwenhuis, S., Yeung, N., van den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. (2003). Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a go/no-go task: effects of response conflict and trial type frequency. *Cogn Affect Behav Neurosci*, *3*(1), 17-26.

Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychol Bull*, *126*(2), 220-246.

Norman, D. A. S. T. (1986). *Attention to action: Willed and automatic control of behaviour* (Vol. 4). New York: Plenum Press.

Oniz, A., & Basar, E. (2009). Prolongation of alpha oscillations in auditory oddball paradigm. *Int J Psychophysiol*, *71*(3), 235-241. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2008.10.003

Onton, J., Delorme, A., & Makeig, S. (2005). Frontal midline EEG dynamics during working memory. *Neuroimage*, *27*(2), 341-356. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.04.014

Owen, A. M. (2004). Cognitive dysfunction in Parkinson's disease: the role of frontostriatal circuitry. *Neuroscientist*, *10*(6), 525-537. doi: 10.1177/1073858404266776

Passingham, R. E., Bengtsson, S. L., & Lau, H. C. (2010). Medial frontal cortex: from self-generated action to reflection on one's own performance. *Trends Cogn Sci*, *14*(1), 16-21. doi: 10.1016/j.tics.2009.11.001

Patton, J. H., Stanford, M. S., & Barratt, E. S. (1995). Factor structure of the Barratt impulsiveness scale. *J Clin Psychol*, *51*(6), 768-774.

Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Weller, B. J., & Kopell, B. S. (1985). ERPs to response production and inhibition. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *60*(5), 423-434.

Pfurtscheller, G. (1981). Central beta rhythm during sensorimotor activities in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *51*(3), 253-264.

Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin Neurophysiol*, *110*(11), 1842-1857.

Picard, N., & Strick, P. L. (1996). Motor areas of the medial wall: a review of their location and functional activation. *Cereb Cortex*, *6*(3), 342-353.

Pliszka, S. R., Liotti, M., & Woldorff, M. G. (2000). Inhibitory control in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: event-related potentials identify the processing component and timing of an impaired right-frontal response-inhibition mechanism. *Biol Psychiatry*, *48*(3), 238-246.

Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clin Neurophysiol*, *118*(10), 2128-2148. doi: 10.1016/j.clinph.2007.04.019

Prox, V., Dietrich, D. E., Zhang, Y., Emrich, H. M., & Ohlmeier, M. D. (2007). Attentional processing in adults with ADHD as reflected by event-related potentials. *Neurosci Lett*, *419*(3), 236-241. doi: 10.1016/j.neulet.2007.04.011

Pulvermuller, F. (1996). Hebb's concept of cell assemblies and the psychophysiology of word processing. *Psychophysiology*, *33*(4), 317-333.

Ramautar, J. R., Kok, A., & Ridderinkhof, K. R. (2004). Effects of stop-signal probability in the stop-signal paradigm: the N2/P3 complex further validated. *Brain Cogn*, *56*(2), 234-252. doi: 10.1016/j.bandc.2004.07.002

Ramautar, J. R., Kok, A., & Ridderinkhof, K. R. (2006). Effects of stop-signal modality on the N2/P3 complex elicited in the stop-signal paradigm. *Biol Psychol*, *72*(1), 96-109. doi: 10.1016/j.biopsycho.2005.08.001

Randall, W. M., & Smith, J. L. (2011). Conflict and inhibition in the cued-Go/NoGo task. *Clin Neurophysiol*. doi: 10.1016/j.clinph.2011.05.012

Randolph C, G. T., Weinberger DR. (1993). The neuropsychology of schizophrenia *Clinical Neuropsychology*, 499-522.

Roach, B. J., & Mathalon, D. H. (2008). Event-related EEG time-frequency analysis: an overview of measures and an analysis of early gamma band phase locking in schizophrenia. *Schizophr Bull*, *34*(5), 907-926. doi: 10.1093/schbul/sbn093

Rösler, F. (1982). *Hirnelektrische Korrelate Kognitiver Prozesse* (S. 8-11). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Rubia, K., Russell, T., Overmeyer, S., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Sharma, T., . . . Taylor, E. (2001). Mapping motor inhibition: conjunctive brain activations across different versions of go/no-go and stop tasks. *Neuroimage*, *13*(2), 250-261. doi: 10.1006/nimg.2000.0685

Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage*, *20*(1), 351-358.

Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., Toone, B., & Taylor, E. (2005). Abnormal brain activation during inhibition and error detection in medication-naive adolescents with ADHD. *Am J Psychiatry*, *162*(6), 1067-1075. doi: 10.1176/appi.ajp.162.6.1067

Sauseng, P., Klimesch, W. (2008). What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? *Neurosci Biobehav Rev*, *32*, 1001-1013.

Scheeringa, R., Petersson, K. M., Oostenveld, R., Norris, D. G., Hagoort, P., & Bastiaansen, M. C. (2009). Trial-by-trial coupling between EEG and BOLD identifies networks related to alpha and theta EEG power increases during working memory maintenance. *Neuroimage*, *44*(3), 1224-1238. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.08.041

Schmajuk, M., Liotti, M., Busse, L., & Woldorff, M. G. (2006). Electrophysiological activity underlying inhibitory control processes in normal adults. *Neuropsychologia*, *44*(3), 384-395. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2005.06.005

Schmidt, K. H., & Metzler, P. (1992). *Wortschatztest (WST)*. Weinheim: Beltz.

Schwenkmezger, P., Hodapp, V. & Spielberger, C. D. (1992). *Das State-Trait-Ärgerausdrucks-Inventar (STAXI)*. Bern: Huber.

Segalowitz, S. J., & Barnes, K. L. (1993). The reliability of ERP components in the auditory oddball paradigm. *Psychophysiology*, *30*(5), 451-459.

Shenton, M. E., Kikinis, R., Jolesz, F. A., Pollak, S. D., LeMay, M., Wible, C. G., . . . et al. (1992). Abnormalities of the left temporal lobe and thought disorder in schizophrenia. A quantitative magnetic resonance imaging study. *N Engl J Med*, *327*(9), 604-612. doi: 10.1056/nejm199208273270905

Shibata, T., Shimoyama, I., Ito, T., Abla, D., Iwasa, H., Koseki, K., . . . Nakajima, Y. (1999). Event-related dynamics of the gamma-band oscillation in the human brain: information processing during a GO/NOGO hand movement task. *Neurosci Res*, *33*(3), 215-222.

Siegel, M., Engel, A. K., & Donner, T. H. (2011). Cortical network dynamics of perceptual decision-making in the human brain. *Front Hum Neurosci*, *5*, 21. doi: 10.3389/fnhum.2011.00021

Smith, J. L., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2004). Inhibitory processing during the Go/NoGo task: an ERP analysis of children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Clin Neurophysiol*, *115*(6), 1320-1331. doi: 10.1016/j.clinph.2003.12.027

Smith, J. L., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2006). Effects of pre-stimulus processing on subsequent events in a warned Go/NoGo paradigm: response preparation, execution and inhibition. *Int J Psychophysiol*, *61*(2), 121-133. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2005.07.013

Smith, J. L., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2007). Response priming in the Go/NoGo task: the N2 reflects neither inhibition nor conflict. *Clin Neurophysiol*, *118*(2), 343-355. doi: 10.1016/j.clinph.2006.09.027

Smith, J. L., Smith, E. A., Provost, A. L., & Heathcote, A. (2010). Sequence effects support the conflict theory of N2 and P3 in the Go/NoGo task. *Int J Psychophysiol*, *75*(3), 217-226. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2009.11.002

- Strik, W. K., Fallgatter, A. J., Brandeis, D., & Pascual-Marqui, R. D. (1998). Three-dimensional tomography of event-related potentials during response inhibition: evidence for phasic frontal lobe activation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *108*(4), 406-413.
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, U. (2011). Are the neural correlates of stopping and not going identical? Quantitative meta-analysis of two response inhibition tasks. *Neuroimage*, *56*(3), 1655-1665. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.02.070
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., Delpuech, C., & Pernier, J. (1996). Stimulus specificity of phase-locked and non-phase-locked 40 Hz visual responses in human. *J Neurosci*, *16*(13), 4240-4249.
- Tamm, L., Menon, V., Ringel, J., & Reiss, A. L. (2004). Event-related fMRI evidence of frontotemporal involvement in aberrant response inhibition and task switching in attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, *43*(11), 1430-1440. doi: 10.1097/01.chi.0000140452.51205.8d
- Trujillo, L. T., & Allen, J. J. (2007). Theta EEG dynamics of the error-related negativity. *Clin Neurophysiol*, *118*(3), 645-668. doi: 10.1016/j.clinph.2006.11.009
- Tu, P. C., Hsieh, J. C., Li, C. T., Bai, Y. M., & Su, T. P. (2012). Cortico-striatal disconnection within the cingulo-opercular network in schizophrenia revealed by intrinsic functional connectivity analysis: a resting fMRI study. *Neuroimage*, *59*(1), 238-247. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.07.086
- Tu, P. C., Lee, Y. C., Chen, Y. S., Li, C. T., & Su, T. P. (2013). Schizophrenia and the brain's control network: Aberrant within- and between-network connectivity of the frontoparietal network in schizophrenia. *Schizophr Res*, *147*(2-3), 339-347. doi: 10.1016/j.schres.2013.04.011
- van Boxtel, G. J., van der Molen, M. W., Jennings, J. R., & Brunia, C. H. (2001). A psychophysiological analysis of inhibitory motor control in the stop-signal paradigm. *Biol Psychol*, *58*(3), 229-262.
- Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends Cogn Sci*, *12*(11), 418-424. doi: 10.1016/j.tics.2008.07.005

- Vink, M., Kahn, R. S., Raemaekers, M., van den Heuvel, M., Boersma, M., & Ramsey, N. F. (2005). Function of striatum beyond inhibition and execution of motor responses. *Hum Brain Mapp*, *25*(3), 336-344. doi: 10.1002/hbm.20111
- Wager, T. D., Sylvester, C. Y., Lacey, S. C., Nee, D. E., Franklin, M., & Jonides, J. (2005). Common and unique components of response inhibition revealed by fMRI. *Neuroimage*, *27*(2), 323-340. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.01.054
- Walsh, E., Kuhn, S., Brass, M., Wenke, D., & Haggard, P. (2010). EEG activations during intentional inhibition of voluntary action: an electrophysiological correlate of self-control? *Neuropsychologia*, *48*(2), 619-626. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2009.10.026
- Wang, X. J. (2010). Neurophysiological and computational principles of cortical rhythms in cognition. *Physiol Rev*, *90*(3), 1195-1268. doi: 10.1152/physrev.00035.2008
- Watanabe, J., Sugiura, M., Sato, K., Sato, Y., Maeda, Y., Matsue, Y., . . . Kawashima, R. (2002). The human prefrontal and parietal association cortices are involved in NO-GO performances: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, *17*(3), 1207-1216.
- Weisbrod, M., Kiefer, M., Marzinzik, F., & Spitzer, M. (2000). Executive control is disturbed in schizophrenia: evidence from event-related potentials in a Go/NoGo task. *Biol Psychiatry*, *47*(1), 51-60.
- Weisbrod, M., Winkler, S., Maier, S., Hill, H., Thomas, C., & Spitzer, M. (1997). Left lateralized P300 amplitude deficit in schizophrenic patients depends on pitch disparity. *Biol Psychiatry*, *41*(5), 541-549.
- Wild-Wall, N., Oades, R. D., Schmidt-Wessels, M., Christiansen, H., & Falkenstein, M. (2009). Neural activity associated with executive functions in adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *Int J Psychophysiol*, *74*(1), 19-27. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2009.06.003
- Wostmann, N. M., Aichert, D. S., Costa, A., Rubia, K., Moller, H. J., & Ettinger, U. (2013). Reliability and plasticity of response inhibition and interference control. *Brain Cogn*, *81*(1), 82-94. doi: 10.1016/j.bandc.2012.09.010
- Yamanaka, K., & Yamamoto, Y. (2010). Single-trial EEG power and phase dynamics associated with voluntary response inhibition. *J Cogn Neurosci*, *22*(4), 714-727. doi: 10.1162/jocn.2009.21258

Zschocke, S., & Hansen, H. (Hg.) (2012). *Klinische Elektroenzephalographie* (3. Auflage, S. 70). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Physiologisches Spontan-EEG eines Patienten im Alpha-Rhythmus, S. 5

Abbildung 2: Schema der Komponenten N2 und P3 bei ereigniskorrelierten Potentialen, S. 6

Abbildung 3: Einteilung und Bezeichnung der verschiedenen Frequenzbereiche eines EEGs (Alpha-, Beta-, Delta- und Thetaband), S. 8

Abbildung 4: Visuelles Go/NoGo-Paradigma: Sämtliche Buchstaben fungieren als Go-Signal, außer der Buchstabe „X“, der als NoGo-Stimulus das Zurückhalten einer Reaktion verlangt (modifiziert nach Chambers, 2009, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©), S. 13

Abbildung 5: Stop-Signal-Aufgabe: Auf ein Go-Signal folgt gelegentlich ein Stop-Signal. Die Stop-Signal-Reaktionszeit dient als Maß für die inhibitorische Kontrolle, S. 14

Abbildung 6: Regionen maximaler Unterschiede zwischen Go/NoGo-Paradigma (GNG) und Stop-Signal-Aufgabe (SST) durch die Subtraktion GNG minus SST: Das GNG zeigt stärkere Aktivierungen als die SST im frontoparietalen Netzwerk: Areal 1 (rechter Gyrus frontalis medius) und Areal 2 (rechter Lobus parietalis inferior) sowie Areal 5 (BA47, rechter Gyrus frontalis inferior). Die SST zeigt stärkere Aktivierungen als das GNG im cingulo-opercularen Netzwerk: Areal 3 (Thalamus) und Areal 4 (linke anteriore Insel) (Swick et al., 2011, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©), S. 15

Abbildung 7: Gliederung des menschlichen Neokortex (www.servier.de/medical-art/die-nerven, Folie 10, bearbeitet, mit freundlicher Genehmigung von Les Laboratoires Servier, Copyright © 2006), S. 20

Abbildung 8: Sagittalschnitt des Gehirns: Cortex praefrontalis (www.servier.de/medical-art/die-nerven, Folie 6, bearbeitet, mit freundlicher Genehmigung von Les Laboratoires Servier, Copyright © 2006), S. 20

Abbildung 9: Illustration des Libet-Experiments, modifiziert nach Desmurget und Sirigu, 2009: Die Aufgabe besteht darin, eine Taste mit dem rechten Zeigefinger zu drücken. (a) Probanden beobachten einen Uhrzeiger, der auf einem Bildschirm rotiert. (b) Die Probanden müssen den Augenblick herausfinden, wann sie die Absicht

verspüren, sich zu bewegen. (c) Sie drücken die Taste. (d) Nach einer beliebigen Verzögerung stoppt die Uhr und die Probanden müssen die Uhrzeigeposition von (b) berichten (Desmurget & Sirigu, 2009, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©), S. 24

Abbildung 10: fMRT-Antworten beim Vergleich der Entscheidungsbedingung mit der Kontrollbedingung nach Karch et al., 2010. Abkürzungen: sfG, Gyrus frontalis superior; mdG, Gyrus frontalis medius; mfG, Gyrus frontalis medialis; ifG, Gyrus frontalis inferior (Karch et al., 2010a, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier ©), S. 27

Abbildung 11: Adaptiertes, akustisches Go/NoGo-Paradigma, S. 39

Abbildung 12: Schematische Darstellung des internationalen 10-20-Systems der Elektrodenanordnung, ohne Zusatzelektroden (<http://www.servier.de/medical-art/vorklinische-untersuchung>, Folie 7, bearbeitet, mit freundlicher Genehmigung von Les Laboratoires Servier, Copyright © 2006), S. 42

Abbildungen 13 a) - c): ERPs bei der Entscheidung Reaktion ja/nein (schwarz) sowie bei der Go-(grün) und NoGo-Bedingung (rot) in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 48

Abbildung 14 a) - c): Thetaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 49/50

Abbildung 15 a) - c): Alphanband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 51

Abbildung 16 a) - c): Betaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S.52/53

Abbildung 17 a) - c): Gammaband bei der Aufgabe Reaktion ja/nein in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 53/54

Abbildung 18 a) - c): ERPs bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 55/56

Abbildung 19 a) - c): Thetaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 57/58

Abbildung 20 a) - c): Alphanband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 58/59

Abbildung 21 a) - c): Betaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 60/61

Abbildung 22 a) - c): Gammaband bei dem Paradigma Entscheidung Reaktion rechts/links in den Ableitungen a) Fz, b) Cz und c) Pz, S. 62

Abbildung 23: Thetaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz = Entscheidung Reaktion rechts/links, rot = Entscheidung Reaktion ja/nein, grün = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein), S. 64

Abbildung 24: Alphaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz = Entscheidung Reaktion rechts/links, rot = Entscheidung Reaktion ja/nein, grün = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein), S. 65

Abbildung 25: Betaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz = Entscheidung Reaktion rechts/links, rot = Entscheidung Reaktion ja/nein, grün = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein), S. 66

Abbildung 26: Gammaband bei den Entscheidungen Reaktion ja/nein sowie Reaktion rechts/links und NoGo-Bedingungen (schwarz = Entscheidung Reaktion rechts/links, rot = Entscheidung Reaktion ja/nein, grün = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion rechts/links, blau = NoGo-Bedingung der Gruppe Entscheidung Reaktion ja/nein), S. 67

Abbildung 27: Wavelet bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 1. Termin in der Ableitung Fz, S. 68

Abbildung 28: Wavelet bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 2. Termin in der Ableitung Fz, S. 68

Abbildung 29: Wavelet bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 1. Termin in der Ableitung Cz, S. 69

Abbildung 30: Wavelet bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 2. Termin in der Ableitung Cz, S. 69

Abbildung 31: Wavelet bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 1. Termin in der Ableitung Pz, S. 70

Abbildung 32: Wavelet bei Reaktion ja/nein minus rechts/links 2. Termin in der Ableitung Pz, S. 70

Abbildung 33: ERPs bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin (schwarz) versus 2. Termin (rot) in der Ableitung Cz, S. 72

Abbildung 34: Thetaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 73

Abbildung 35: Alphaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 74

Abbildung 36: Betaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 75

Abbildung 37: Gammaband bei der Entscheidung Reaktion ja/nein beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 76

Abbildung 38: Wavelet bei der Entscheidung Reaktion ja/nein 1. Termin minus 2. Termin in der Ableitung Cz, S. 77

Abbildung 39: ERPs bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin (schwarz) versus 2. Termin (rot) in der Ableitung Cz, S. 78

Abbildung 40: Thetaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 79

Abbildung 41: Alphaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 80

Abbildung 42: Betaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 81

Abbildung 43: Gammaband bei der Entscheidung Reaktion rechts/links beim 1. Termin (schwarz) und beim 2. Termin (rot) sowie in der NoGo-Bedingung beim 1. Termin (grün) und beim 2. Termin (blau), S. 82

Abbildung 44: Wavelet bei der Entscheidung Reaktion rechts/links 1. Termin minus 2. Termin in der Ableitung Cz, S. 83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Soziodemographische Daten der beiden Versuchsgruppen, S. 34

Tabelle 2: Ergebnisse der Visuellen Analogskala für die Kriterien Schwierigkeit, Mühe, Anstrengung sowie Leistung; Vergleich der beiden Entscheidungsparadigmen ja/nein bzw. rechts/links 1. Termin v.s. 2. Termin und Vergleich Entscheidung ja/nein v.s. rechts/links; M: Mittelwert; SD: Standardabweichung, S. 36

Tabelle 3: Ergebnisse der Screeningfragebögen aller Probanden (n = 27), S. 38

Tabelle 4: Teilerperimente des adaptierten Go/NoGo-Paradigmas, S. 41

Tabelle 5: Ergebnisse Verhaltensdaten; Abkürzung: M: Mittelwert; SD: Standardabweichung; ms: Millisekunden; %: Prozentsatz, S. 46

Tabelle 6: p-Wert-Übersicht der Amplitudenhöhe ereigniskorrelierter Potentiale bei verschiedenen Entscheidungsarten und Messzeitpunkten; n.s.: nicht signifikant, S. 84

Tabelle 7: p-Wert-Übersicht der Frequenzbandaktivität bei verschiedenen Entscheidungsarten und Messzeitpunkten; n.s.: nicht signifikant, S. 85/86

Abkürzungsverzeichnis

ACC = anteriorer cingulärer Cortex

ADHS = Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung

ANOVA = (engl.) analysis of variance

BA = Brodmann Areal

BDI = Beck Depressions Inventar

BIS-11 = Barratt-Impulsivitäts-Skala

CON = cingulo-operculares Netzwerk

dB = Dezibel

DLPFC = Cortex praefrontalis dorsolateralis

DMPFC = Cortex praefrontalis dorsomedialis

durchschn. = durchschnittlich

EEG = Elektroenzephalographie

ERBP = (engl.) event-related band power

ERD = (engl.) event-related desynchronization

ERP = (engl.) event related Potential

ERS = (engl.) event-related synchronization

fMRT = funktionelle Magnetresonanztomographie

GNG = Go/No-Go-Paradigma

Hz = Hertz

IBP = (engl.) induced band power

IC = (engl.) independent component

IFG = Gyrus frontalis inferior

ifG = Gyrus frontalis inferior

kHz = Kilohertz

k Ω = Kiloohm

LPFC = Cortex praefrontalis lateralis

mdfG = Gyrus frontalis medius

mfG = Gyrus frontalis medialis

MPFC = Cortex praefrontalis medialis

MRT = Magnetresonanztomographie

ms = Millisekunde

NEO-FFI = Neo-Fünf-Faktoren-Inventar

n.s. = nicht signifikant

OFC = Cortex orbitofrontalis

PFC = Cortex praefrontalis

Pre-SMA = (engl.) presupplementary motor area

s = Sekunde

sfG = Gyrus frontalis superior

SMA = (engl.) supplementary motor area

SPSS = (engl.) statistical package for the social sciences

SST = (engl.) stop-signal task

STAXI = State-Trait-Ärgerausbruchs-Inventar

VLPFC = Cortex praefrontalis ventrolateralis

VMPFC = Cortex praefrontalis ventromedialis

WST = Wortschatztest

α = Alpha

β = Beta

γ = Gamma

δ = Delta

ϑ = Theta

μV = Mikrovolt

Danksagung

Da eine wissenschaftliche Arbeit nie das Werk eines einzelnen ist, möchte ich an dieser Stelle folgenden Personen, die zu dem Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben, meinen Dank aussprechen:

Zunächst gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Oliver Pogarell, der mir die Gelegenheit für dieses Promotionsverfahren ermöglichte und jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen hatte. Mithilfe seiner Unterstützung und seinem fachlichen Rat konnte ich einen wertvollen Einblick in die Forschungswelt gewinnen. Ein besonderes Dankeschön gebührt meiner Betreuerin Frau PD Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Psych. Susanne Karch, die an der Erstellung dieser Arbeit maßgeblich beteiligt war. Sie unterstützte und motivierte mich stets mit ihrem beeindruckenden Fachwissen und außergewöhnlichen Engagement. Vielen Dank für all die Mühe und Geduld!

Des Weiteren danke ich den technischen Assistentinnen der Abteilung für klinische Neurophysiologie für ihre ausgesprochen herzliche und tatkräftige Unterstützung bezüglich aller gerätetechnischen Angelegenheiten.

Danken möchte ich außerdem Frau Mag. Agnieszka Chrobok, die mir immerzu mit ihrem fachlichen und persönlichen Rat zur Seite stand.

Schließlich möchte ich mich noch bei meinen Eltern für die kontinuierliche Motivation und ausgiebige Unterstützung bedanken.

Eidesstattliche Versicherung

Schwarz, Sandra

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Untersuchung von ereigniskorrelierten Potentialen und Frequenzbändern bei Verhaltenskontrollprozessen

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

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

München, den 20. Januar 2017

Ort, Datum

Doktorandin Sandra Schwarz