

Aus der Klinik für Neurologie
der Universität zu Lübeck
Direktor: Prof. Dr. med. Thomas F. Münte

**Beeinflussung des ereigniskorrelierten EEG-Potentials P3b
durch die Kombination zweier Stimuli**

INAUGURALDISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde
der Universität zu Lübeck
- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von
Lin Marlena Hamann
aus Hamburg

Lübeck 2015

Berichtersteller/Berichterstellerin: 1. Prof. Dr. rer. soc. Rolf Verleger

2. Priv.-Doz. Dr. med. Andreas Wahl-Kordon

Tag der mündlichen Prüfung: 11.01.2016

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 11.01.2016

Promotionskommission der Sektion Medizin

Der Wissenschaft gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | 6 |
| EINLEITUNG..... | 7 |
| 1.1 DAS ELEKTROENZEPHALOGRAMM | 7 |
| 1.2 EREIGNISBEZOGENE POTENTIALE..... | 11 |
| 1.3 DIE P300 | 13 |
| EXPERIMENT 1 | 19 |
| 2.1 EINLEITUNG | 19 |
| 2.2 MATERIAL UND METHODEN..... | 20 |
| 2.2.1 Versuchspersonen | 20 |
| 2.2.2 EEG-Ableitung | 20 |
| 2.2.3 Stimuli und Prozedere..... | 26 |
| 2.2.4 Datenverarbeitung..... | 32 |
| 2.3 ERGEBNISSE | 38 |
| 2.3.1 S1-evozierte P3b | 38 |
| 2.3.2 S2-evozierte Negativität..... | 38 |
| 2.3.3 Reaktionszeit und Fehlerquote..... | 42 |
| 2.4 DISKUSSION..... | 46 |
| EXPERIMENT 2 | 47 |
| 3.1 EINLEITUNG | 47 |
| 3.2 MATERIAL UND METHODEN..... | 48 |
| 3.2.1 Versuchspersonen | 48 |
| 3.2.2 EEG-Ableitung | 48 |
| 3.2.3 Stimuli und Prozedere..... | 48 |
| 3.2.4 Datenverarbeitung..... | 52 |
| 3.3 ERGEBNISSE | 54 |
| 3.3.1 S1-evozierte P3b | 54 |
| 3.3.2 S2-evozierte Negativität..... | 54 |
| 3.3.3 Reaktionszeit und Fehlerquote..... | 57 |
| 3.4 DISKUSSION..... | 59 |
| EXPERIMENT 3 | 60 |
| 4.1 EINLEITUNG | 60 |
| 4.2 MATERIAL UND METHODEN..... | 62 |
| 4.2.1 Versuchspersonen | 62 |
| 4.2.2 EEG Aufnahme | 62 |
| 4.2.3 Stimuli und Prozedere..... | 62 |

| | | |
|-------|------------------------------------|-----------|
| 4.2.4 | Datenverarbeitung..... | 64 |
| 4.3 | ERGEBNISSE | 66 |
| 4.3.1 | S1-evozierte P3b | 66 |
| 4.3.2 | S2-evozierte Negativität..... | 66 |
| 4.3.3 | Reaktionszeit und Fehlerquote..... | 69 |
| 4.4 | DISKUSSION..... | 72 |
| | ALLGEMEINE DISKUSSION | 73 |
| | ZUSAMMENFASSUNG | 77 |
| | Literaturverzeichnis | 78 |
| | Anhang: Ethikantrag | 82 |
| | Danksagungen..... | 83 |
| | Lebenslauf | 84 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|--|
| Abb. | Abbildung |
| bzw. | Beziehungsweise |
| CNV | Contingent Negative Variation = Abhängige Negative Variation |
| EEG | Elektroenzephalogramm |
| ERP / EKP | Event Related potential = Ereigniskorrelierte Potentiale |
| FQ | Fehlerquote |
| hEOG | horizontales Elektroofokulogramm |
| Hz | Hertz (Einheit) |
| k Ω | Kilohm (Einheit) |
| ms | Millisekunde (Einheit) |
| n. s. | Nicht signifikant |
| RZ | Reaktionszeit |
| s | Sekunde (Einheit) |
| S1 | Erster Stimulus |
| S2 | Zweiter Stimulus |
| S-R | Stimulus-Response = Stimulus-Antwort |
| S-R Link | Stimulus-Response Link = Stimulus-Antwort Verbindung |
| S-R mapping | Stimulus-Response mapping = Zuordnung von Stimulus und Antwort |
| Tbl. | Tabelle |
| u. a. | Unter anderem |
| vEOG | Vertikales Elektroofokulogramm |
| VEP | Visuell evoziertes Potential |
| vgl. | Vergleiche |
| z. B. | Zum Beispiel |
| μ V | Mikrovolt (Einheit) |

EINLEITUNG

1.1 DAS ELEKTROENZEPHALOGRAMM

In London gelang es R. Caton 1875 erstmals, Hirnstromwellen von Affen und Kaninchen abzuleiten. Die Ableitung erfolgte damals mit einfachen Galvanometern und nicht wie heute üblich mit Verstärkertechniken. Folglich waren die abgeleiteten Hirnstromwellen sehr klein, nicht konstant und fanden deshalb wenig Beachtung (Spillane 1974). Es mussten weitere 50 Jahre vergehen, bis H. Berger in der Psychiatrischen Universitätsklinik in Jena 1924 Hirnstromwellen des menschlichen Gehirns ableiten konnte (Berger 1929), basierend auf den Ergebnissen von R. Caton. Die elektrische Aktivität des menschlichen Gehirns registrieren und in Kurven aufzeichnen zu können stellte dennoch vorerst keine Sensation dar und wurde eher als unglaublich abgetan. Bis 1939 beschrieb Berger in seinen Publikationen viele Merkmale des Elektroenzephalogramms (EEGs). Den Durchbruch des EEGs zur Wissenschaft und weltweiter Anerkennung gelang erst 1934 durch die Bestätigung der Experimente Bergers durch den Physiker und englischen Nobelpreisträger E. D. Adrian (Compston 2010: Adrian und Matthews 1934). Das EEG erhielt Einzug in die Wissenschaft. Man versprach sich Aufklärungen über einen ganz speziellen Teil des Menschen, sein Gehirn. In dieser Zeit entwickelte Tönnies ein Tintenschreibergerät zur Direktaufzeichnung von EEG-Kurven und ermöglichte damit die Nutzung des EEGs auch in der klinischen Diagnostik (Neundörfer 2002 [a]). Viele Studien über die abgeleiteten Hirnströme konnten pathologische Formen, wie sie z. B. bei der Epilepsie vorkommen, aus dem EEG herauslesen. Heute gibt es handliche EEGs, die in Arztpraxen und im Krankenhaus direkt am Bett des Patienten eingesetzt werden können. In der Forschung wird häufig die direkte Auswertung des EEGs am Computer genutzt. In der Physiologie und kognitiven Neurowissenschaft nutzt man das EEG, um zerebrale Aktivierungsvorgänge erforschen zu können. Dazu zählen z. B. Aufmerksamkeitsprozesse, Bewusstseinszustände und ereigniskorrelierte Gehirnaktivität (Schandry 2003).

Auch wenn die Entdeckung des EEGs schon Jahre zurückliegt, besteht noch immer keine völlig umfassende Erkenntnis, wie das EEG entsteht. Sicher ist, dass der Entstehungsort der Kortex des Gehirns ist (Berger 1929). Tiefer gelegene Spannungsquellen können vom EEG nicht erfasst werden. Heute geht man davon aus, dass das Potential für das EEG vorwiegend durch exzitatorische postsynaptische Potentiale hervorgerufen wird, die im Kortex unterhalb einer EEG-Elektrode liegen. Ein einzelnes Potential eines Neurons

kann jedoch nicht an der Kopfhaut abgeleitet werden, da Entfernung und verschiedene dämpfende Effekte wie Haut und Knochen zu groß sind. Empfangen allerdings mehrere benachbarte Neurone elektrische Impulse, so kommt es zu einem Gesamtpotential, welches abgeleitet werden kann. Das EEG kann also verstanden werden als eine Summation der postsynaptischen Potentiale, die synchron in bestimmter zeitlicher Reihenfolgen und räumlicher Aufteilung ablaufen (Seifert 2005).

Bei der hirnelektrischen Aktivität wird zwischen Spontanaktivität und evozierter Aktivität unterscheiden. Die Spontanaktivität, auch Spontan-EEG genannt, beschreibt den Zustand der Gehirnaktivität, z. B. wach oder schlafend. An der Kopfhaut eines Lebenden können immer Spannungsschwankungen abgeleitet werden, sodass folglich immer eine Spontanaktivität im EEG sichtbar ist. Evozierte Gehirnaktivität hingegen ist eine kurzzeitige Reaktion auf einen Stimulus (Schandry 2003). Diese ereigniskorrelierenden Potentiale (EKPs) werden später genauer beschrieben.

Die EEG-Signale entstehen im Neokortex, der histologisch in sechs Schichten gegliedert wird. Funktionell wird er eingeteilt in Primär-, Sekundär- und Assoziationsfelder. Die Primärfelder sind sensorische Zentren, die ihre Sinnesafferenz direkt vom Thalamus empfangen. Die Sekundärfelder befinden sich immer neben den ihnen zugeordneten primären Rindenzentren (z. B. Sehrinde). Hier werden Informationen interpretiert, sodass Sinnesinformationen erkannt und zugeordnet werden können. Die Handlungskonsequenz auf diese Wahrnehmung wird dann u. a. von Assoziationsfeldern initiiert. Des Weiteren unterscheidet man zwei Hauptzelltypen im Neokortex: Die exzitatorischen Pyramidenzellen und die inhibitorischen Nicht-Pyramidenzellen (z. B. Korbzellen). Die Pyramidenzellen machen 85% aller Nervenzellen des Neokortex aus. Sie bestehen aus einem Perikaryon und vielen weiteren Dendriten. An der Basis des Perikaryons befindet sich ein nach unten gerichtetes Axon, welches Efferenzen entsendet. Die Dendriten empfangen kortikale Afferenzen (Trepel 2008).

In der Schicht III des Neokortex befinden sich vorwiegend große Pyramidenzellen, ihre Axone bilden einen Großteil der Assoziations- und Kommissurenfasern. In der IV Schicht enden vor allem die kortikalen Afferenzen aus dem Thalamus. Diese Schicht ist deshalb besonders in den sensorischen Kortexarealen (z. B. Hörrinde, Sehrinde) stark ausgeprägt. In der Schicht V sind vorwiegend sehr große Pyramidenzellen die mit ihren Axonen den Hauptteil der kortikalen Efferenzen zu tiefer gelegenen Zentren (Basalganglien,

Rückenmark, Hirnstamm) versenden. Die kleinen Pyramidenzellen der VI Schicht hingegen richten ihre Axone zum Thalamus (Trepel 2008).

Die Erregung der Dendriten durch die afferenten Fasern des Thalamus ist essenziell für die elektrische Spannungsänderung im Spontan-EEG und den EKPs. Das Auf und Ab von Erregung und Nicht-Erregung sind die Potentialschwankungen, die den Rhythmus des EEGs bestimmen, der sich vor allem in Wellen ausdrückt. Für die Ableitung der Potentiale haben die apikalen Dendriten der Pyramidenzellen die besten Voraussetzungen, da sie vielzählig parallel nah unter der Kopfhaut liegen (Trepel 2008). Diese abgeleiteten Hirnstrombilder werden in fünf Frequenzbereiche um 1 – 30 Hz pro Sekunde unterteilt. Die Bereiche werden verschiedenen physiologischen Zuständen zugeordnet. Die fünf klassischen Wellentypen werden mit den griechischen Buchstaben Alpha bis Theta bezeichnet. Gamma-Wellen sind nur bei besonderen Bedingungen sichtbar (siehe Tabelle 1). Besonders gut erkennbar ist der sinusförmige Alpha-Rhythmus, der bei Personen auftritt, die wach und entspannt sind. Konzentriert sich die Person und ist aufmerksam, so wird der Alpha-Rhythmus blockiert und geht in einen höher frequenten Beta-Rhythmus über. Die Delta- und Theta-Wellen treten überwiegend im Schlaf oder unter pathologischen Bedingungen auf (Bernard et al. 2004).

| Welle | Frequenzbereich | Bedeutung |
|------------------|-----------------|---|
| β -Wellen | 14-30 Hz/s | Wachzustand, aufmerksam, konzentriert REM-Phase des Schlafes |
| α -Wellen | 8 – 13 Hz/s | Wach und entspannt |
| θ -Wellen | 4 – 7 Hz/s | Im Schlaf Pathologische Hirnveränderungen Im Wachzustand bei Kindern und Jugendlichen |
| δ -Wellen | 0,5 – 3 Hz/s | Im Schlaf Pathologische Hirnveränderungen |
| γ -Wellen | Über 30 Hz/s | Komplexe Aufgaben, Funktion wird noch diskutiert |

Tabelle 1: In der Tabelle sind die fünf verschiedenen Wellenbilder und ihre Bedeutung aufgeführt.

Zur Ableitung der Hirnströme vom Kopf werden Elektroden genutzt. Diese werden nach einem international standardisierten System angebracht (genauerer siehe Methodenteil). Durch diese Elektroden können die Potentialverteilung und die Potentialschwankungen über die Zeit abgegriffen werden. Es gibt zwei verschiedene Arten diese Potentiale abzuleiten: Die unipolare und die bipolare Ableitung. Das Prinzip der unipolaren Ableitung ist die Messung der Spannungsdifferenz (auch Potentialdifferenz genannt) der Elektroden welche die Potentiale des Kortex ableiten gegenüber einer Bezugselektrode (auch Referenz genannt) die möglichst keine aktiven Potentiale ableitet. Im Gegensatz dazu misst man bei der bipolaren Ableitung die Potentialdifferenz zwischen zwei benachbarten Elektroden die auf dem Kopf angebracht sind. Da beide Ableitungsarten ihre Vor- und Nachteile haben werden sie bei klinischen Ableitungen kombiniert, um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten (Petsche 1970).

Da die Potentialschwankungen der abgeleiteten Signale sich lediglich in einem Bereich bis $100\ \mu\text{V}$ bewegen, müssen diese durch Transistoren verstärkt werden (Neundörfer 2002). Außerdem sind sie durch ihren empfindlichen Mikrovolt Bereich sehr störanfällig. Artefakte können z. B. durch schlecht sitzende oder defekte Elektroden entstehen. In den Versuchsreihen, die in dieser Dissertation beschrieben, werden saßen die Patienten, um Artefakte durch die Bewegungen des Körpers (Kopf, Rumpf, Arme, Beine) zu minimieren. Die meisten EEG Artefakte wurden durch Blinzeln und Augenbewegungen verursacht. Auch andere Potentiale, die von anderen Körperregionen ausgehen, können Artefakte verursachen wie z. B. der Schluckakt. Ebenso kann Schwitzen Artefakte im EEG hervorrufen. Zu beachten ist außerdem, dass die Ableitung des EEGs durch andere elektrische Geräte wie z. B. Handys gestört werden kann. Deshalb sollte die Person, an der das EEG abgeleitet wird, sich in einem möglichst abgeschirmten Raum befinden und kein Handy bei sich tragen. Natürlich können auch immer Artefakte durch eine Störung der benutzten Geräte auftreten. All diese Artefakte müssen bei der Auswertung des EEGs gefunden und eliminiert werden (siehe Methodenteil). Durch Frequenzfilter kann ein Teil der störenden Potentiale ausgeblendet werden. Die Filter können Frequenzen unterschiedlicher Frequenzstärke eliminieren. Bei den hier beschriebenen Experimenten z. B. wurden mit einem Tiefpassfilter alle Frequenzen über 25 Hz herausgefiltert (genauerer siehe Datenverarbeitung). Dies gilt allerdings nicht für das häufigste Artefakt, das Augenzwinkern, denn diese Frequenzen liegen genau in dem für die EEG-Signale interessierenden Bereich. Ebenfalls müssen sogenannte Grundlinienschwankungen beseitigt werden (genauerer siehe Datenverarbeitung) (Zschocke 2002).

1.2 EREIGNISBEZOGENE POTENTIALIA

Um Arbeitsprozesse des Gehirns verstehen zu können, ist die Betrachtung der evozierten bzw. ereigniskorrelierten Potentiale (EKPs) wichtig. Wie oben erwähnt, spiegeln sie eine hirnelektrische Reaktion auf externe Reize wider und treten vor, während und nach ihnen auf. Die EKPs werden in vier verschiedene Typen unterteilt: sensorische, motorische, endogene und langsame Potentialverschiebungen. Die sensorisch evozierten Potentiale entstehen als Antwort auf einen Reiz von sensorischen Fasern (Sinnesreiz). Endogene EKPs werden abgeleitet als Reaktion auf ein Ereignis, das für diesen Menschen im Rahmen einer Aufgabe von Bedeutung ist. Langsame Potentiale sind späte Komponenten der EKPs. Sie entstehen bei komplexen Prozessen, wie z. B. der Verarbeitung von Informationen, der Planung von Verhalten (z. B. Vorbereitung einer motorischen Reaktion) oder während der Erwartung eines Reizes. Eine bekannte langsame Potentialverschiebung ist die „Contingent Negative Variation“ (CNV), eine Negativität, die während Erwartungssituationen auftritt. Hört eine Versuchsperson ein Signal, welches eine Aufgabe ankündigt, so bildet sich danach eine Negativierung die dann verschwindet, wenn auf das erste Signal ein weiteres Signal folgt, woraufhin die Versuchsperson eine geforderte Reaktion ausführen muss (z. B. einen Buchstaben tippen) (Schandry 2003). Die CNV kann somit als eine sich langsam aufbauende negative „Erwartungs-Welle“ verstanden werden, die einen Vorbereitungs- und Orientierungsprozess widerspiegelt.

Die verschiedenen EKPs setzen sich aus vielen Maxima und Minima zusammen, welche Komponenten genannt werden. Sie werden durch ihre Amplitude und ihre Latenz (Zeitverlauf) beschrieben. Ist die Amplitude positiv, erhält die Komponente den Buchstaben „P“, ist sie negativ den Buchstaben „N“. Die Latenz ist der Abstand zwischen Reizbeginn und einem Maximum oder Minimum. Durch die Verwendung der Beschreibung der Polarität und der Latenz können verschiedene Komponenten klassifiziert werden. Tritt z. B. eine positive Maximierung 200 ms nach einem Reiz auf, so wird diese bezeichnet als „P200“. Es gibt auch die Kennzeichnung „P2“. Dies ist eine zweite Art der Klassifikation, um EKPs zu beschreiben. P2 bezeichnet das zweite positive Maximum eines EKP. Die Positivierung ist zurückzuführen auf eine Reduzierung der thalamischen Schrittmacher Impulse oder durch Erregung von Synapsen, die überwiegend im Bereich des Somas der Pyramidenzellen zustande kommen. Eine Negativierung kommt primär durch kortikale cholinerge Synapsen zustande (Birbaumer und Schmidt 2010).

Die Komponenten der EKPs sind meist kleiner als die Delta-, Theta- und Alpha-Wellen des Spontan-EEGs. Ihre Amplituden sind in der Regel zwischen 1 – 30 μ V. Der

Grund für die kleineren Amplituden könnte zum Beispiel dadurch zustande kommen, dass die EKPs stärker konzentriert in verschiedenen Arealen der Großhirnrinde auftreten (Birbaumer und Schmidt 2010). Die Überlagerungen der Amplituden der EKPs durch die Wellen des Spontan-EEGs werden im Fachjargon als Rauschen bezeichnet. Deshalb benötigt man spezielle Analysemethoden, um die EKPs zu separieren. Der wesentliche Unterschied, der es möglich macht die EKPs aus dem Rauschen herauszufiltern ist, dass die EKPs direkt im Zusammenhang mit einem auslösenden Reiz stehen. Durch zeitsynchrone Mittelung können die EKPs aus dem Rauschen gefiltert werden. Es werden die Potentialverläufe aller Durchgänge eines Versuchs aufeinander addiert. Amplituden, die zum gleichen Zeitpunkt eine ähnliche Form und Polarität haben werden dadurch, relativ zu allen anderen Amplituden größer. Je mehr Durchgänge addiert werden, desto größer werden die Amplituden der EKPs im Gegensatz zum Rauschen. Zum Schluss wird das arithmetische Mittel der summierten EKP-Kurven gebildet um deren Originalgröße zu erhalten. Dieser hier beschriebene Prozess wird von einem Computer übernommen (genauerer siehe Datenverarbeitung).

Zur Charakterisierung einer EKP-Komponente gehört ebenfalls die Angabe der Lokalisation. Diese wird durch die Position der Elektrode(n) auf dem Kopf bestimmt. Um sich ein Bild von der gesamten hirnelektrischen Aktivität während eines EKPs machen zu können, werden sogenannte „scalp-Maps“ erstellt. Durch eine farbige Kartierung der Kopfhaut können Vermutungen angestellt werden, welches Areal des Neokortex des Gehirns einem EKP zugeordnet ist (siehe z. B. Abb. 2). Eine der bekanntesten Komponenten der EKPs ist die P300 um die es in dieser Dissertation geht. Das sogenannte Oddball-Paradigma ist der empirische Fall, dass die P300 durch einen seltenen Reiz ausgelöst wird. Sie tritt nach diesem in einem Zeitraum von ca. 250-600 ms auf. Näheres zur P300-Komponente siehe weiter unten.

EKPs sind klinisch wichtig. Vor allem akustische und visuell evozierte Potentiale werden zu diagnostischen Zwecken eingesetzt, um die Funktion der Hör- bzw. Sehbahn zu überprüfen. Auch bei Erkrankungen, bei denen es zur Demyelinisierung der Axone kommt, (z. B. Multiple Sklerose) werden EKPs eingesetzt. Durch den Abbau der Myelinscheide kommt es zu einer Verlangsamung der Erregungsleitung und damit auch zu einer Verlängerung der Latenz der verschiedenen Komponenten der evozierten Potentiale (Maurer et al. 2005).

1.3 DIE P300

Wie schon erwähnt ist eine der bekanntesten Komponenten der ereigniskorrelierten Potentiale die P300. Sie setzt sich aus der frontalen P3a und der parietal abgeleiteten P3b zusammen (Polich 2007). Über die P3a ist man sich weltweit einig, dass sie Ausdruck einer Reizneuheit ist. Sie tritt auf, wenn plötzlich die Aufmerksamkeit auf etwas anderes gelenkt wird, als auf die vorliegende Aufgabe (Kopp und Lange 2013). Über die P3b gibt es bereits viele Studien die zu erklären versuchen, was sich in der durch die P3b ausgedrückten hirnelektrischen Aktivität widerspiegelt. Jedoch gibt es bis heute keinen einheitlichen Konsens. Im Folgenden werden die wichtigsten Hypothesen vorgestellt.

Auf der einen Seite haben wir Theorien die davon ausgehen, dass die P3b nur durch die Reizverarbeitung beeinflusst wird. Hierzu gehört z. B. die Template Updating Hypothese (Schablonen-Aktualisierungs-Hypothese) die davon ausgeht, dass die P3b eine Erneuerung des Gedächtnisses widerspiegelt. Das Gedächtnis bildet durch jeden präsentierten Stimulus eine Art Schablone, die es nutzen kann, um auf künftige Reize zu reagieren. Erscheint nun ein ungewohnter (neuer oder seltener) Reiz, so muss die Schablone erneuert werden (Gonsalvez et al. 2007, Steiner et al. 2013).

Ähnliche aber wesentlich einflussreicher und ausgearbeiteter ist die Context Updating Hypothese (Zusammenhang-Aktualisierungs-Hypothese), die erstmals 1981 von Dochin beschrieben wurde. Sie geht davon aus, dass die P3b hervorgerufen wird, wenn eine neue Information nicht in das erwartete Schema passt, worauf hin dieses Schema aktualisiert werden muss (Kamp et al. 2013). Wird also ein seltener Stimulus präsentiert, so muss eine Aktualisierung der Erwartung und des Verhaltens stattfinden und zwar dahingehend, dass auch dieser seltene Stimulus auftreten kann. Dieses „Update“ (daher der Name der Hypothese) wird durch die P3b widergespiegelt. Die Vertreter der Context Updating Hypothese sind der Meinung, dass diese Neustrukturierung jedoch nicht der Auswahl der Antwort auf den derzeitig vorliegenden Stimulus diene, sondern ausschließlich der „strategischen“ Planung zukünftiger Reaktionsantworten. Die P3b werde demnach durch die Wahrnehmung und Bewertung des Stimulus (bekannt oder unbekannt) und der daraus resultierenden Dauer der Reizverarbeitung beeinflusst, nicht aber durch die Reaktion auf den Stimulus (Reaktionsprozess) (Kamp et al. 2013). Diese Meinung, dass die P3b ausschließlich durch die Reizverarbeitung beeinflusst werde, findet man auch in vielen anderen Publikationen z. B.: Callaway 1983, Verleger 1988, Duncan et al. 2009.

Im Gegensatz zu dieser Auffassung stehen andere Theorien, die im Grundsatz davon ausgehen, dass die P3b einen Aspekt des Entscheidungsprozesses widerspiegelt (Hillyard

und Kutas 1983). Die Vorstellung, dass die P3b eine sofortige Verhaltens- bzw. Entscheidungsreaktion auf den aktuell vorliegenden Stimulus widerspiegelt geht auch aus anderen Arbeiten hervor (z. B. Falkenstein et al. 1994, Nieuwenhuis et al. 2005, Verleger et al. 2005, Poli et al. 2010, O'Connell et al. 2012, Kelly und O'Connell 2013). Die Meinung darüber, wie die P3b durch den Entscheidungsprozess beeinflusst wird, ist jedoch unterschiedlich. Zum einen ist es denkbar, dass sich die P3b Amplitude erhöht, wenn die Entscheidungen schwieriger werden, da der Entscheidungsprozess mehr Zeit und Anstrengung benötigt (O'Connell et al. 2012, Kelly und O'Connell 2013). Möglich wäre auch, dass sich die P3b Amplitude erniedrigt, wenn die Entscheidung schwieriger wird (Verleger et al. 2005). Genau diese Verbindung zwischen Stimulus und Reaktion ist bislang noch unzureichend verstanden.

In der S-R Link Hypothese von Verleger et al. 2014 [a]) wird davon ausgegangen, dass die P3b eine Reaktivierung von gut etablierten Stimulus-Antwort Verbindungen (S-R Links) reflektiert. Das bedeutet, dass eine große P3b Amplitude erzeugt wird, wenn durch einen Stimulus eine Stimulus-Antwort Verbindung abgerufen wird, die vorher zwar kreiert wurde, sich jedoch gegenwärtig nicht in einem aktiven Zustand befindet. Dass die P3b einen Reaktivierungsprozess widerspiegelt, wurde in einer weiteren Studie von Verleger et al. (2014 [b]) überprüft. Hierbei wurden eine Standard Oddball-Aufgabe mit einer davon modifizierten Aufgabe verglichen, die im Folgenden erklärt werden.

Der Oddball-Effekt besagt, dass die P3b bei der Beantwortung von seltenen Stimuli größer ist als bei der Beantwortung häufiger Stimuli, wenn diese Stimuli in unvorhersehbaren randomisierten Serien präsentiert werden (Duncan-Johnson und Donchin 1977, Johnson und Donchin 1980, Squires et al. 1975). Um den Oddball-Effekt zu veranschaulichen, hier ein kleines Exempel: Nehmen wir z. B. eine Häufigkeitsverteilung zweier Buchstaben (X und U) im Verhältnis 80% zu 20% (siehe Tabelle 2 auf der nächsten Seite). Laut des Paradigmas des Oddball-Effekts wird erwartet, dass durch die Präsentation des seltenen Buchstabes ein großer P3-Komplex hervorgerufen wird. Dies konnte in vielen Studien gezeigt werden (z. B.: Gaeta et al. 2003, Dien et al. 2004, Debener et al. 2005).

| Standard Oddball-Aufgabe | Buchstabe X | Buchstabe U |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| Häufigkeit | 80% | 20% |
| Beantwortung des Stimulus | Linke Hand | Rechte Hand |

Tabelle 2: In der Tabelle ist die Standard Oddball-Aufgabe dargestellt. Der Buchstabe X ist mit einer Häufigkeit von 80% der häufige Stimulus, der Buchstabe U ist mit einer Häufigkeit von 20% der seltene Stimulus. Bei der Präsentation des Buchstaben X soll mit der linken Hand reagiert werden (z. B. durch Drücken einer Taste), bei dem Buchstaben U mit der rechten Hand.

In der Studie von Verleger et al. (2014 [b]) wurde diese Standard Oddball-Aufgabe modifiziert, um die S-R Link Hypothese zu überprüfen. In den Experimenten wurden zwei Stimuli präsentiert (S1 und S2) und die Antworten wurden entweder durch einen oder durch die Kombination beider Stimuli definiert. Der erste Stimulus (S1) war wieder der Buchstaben X oder U, wobei ebenfalls wieder einer häufig und einer selten im Verhältnis von 80 zu 20% war. Gleichzeitig mit dem Buchstaben oder ihm folgend (wie auch in den Experimenten in dieser Dissertation) wurde ein gelber oder blauer Rahmen (S2) präsentiert im Verhältnis von 50 zu 50%. In der Oddball-Aufgabe war die Antwortauswahl nur von S1 abhängig. S2 fungierte lediglich als Start („Go“) Signal, sodass nach S2 die entsprechende Taste (definiert durch S1) gedrückt werden durfte. Die Rahmenfarbe von S2 war hierbei irrelevant. In dieser einfachen Aufgabe wurde ein großer Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 hervorgerufen. Im Gegensatz dazu bestimmte S2 in der sogenannten Kombinations-Aufgabe in Verbindung mit S1 die Antwortauswahl z. B.: Wenn der Buchstabe X und ein gelber Rahmen präsentiert wurden, sollte die rechte Hand reagieren, wenn X und ein blauer Rahmen erschien, sollte die linke Hand reagieren. Bei einem U und gelben Rahmen sollte die linke und bei einem U und blauen Rahmen sollte die rechte Hand reagieren (siehe Tabelle 3 auf der nächsten Seite). In dieser Kombinations-Aufgabe war der Oddball-Effekt auf die S1 (hier seltenes U) -evozierte P3 massiv reduziert.

| Stimulus 1 und Häufigkeit | Stimulus 2 und Häufigkeit | Reaktion auf die Kombination S1 mit S2 und Häufigkeit |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| X 80% | gelber Rahmen 50% | Rechte Hand 40% |
| | blauer Rahmen 50% | Linke Hand 40% |
| U 20% | gelber Rahmen 50% | Linke Hand 10% |
| | blauer Rahmen 50% | Rechte Hand 10% |

Tabelle 3: In der Tabelle ist die Kombinations-Aufgabe mit ihren vier möglichen Stimulus-Varianten und ihrer Häufigkeitsverteilung dargestellt.

In der Oddball-Aufgabe wurde die Verbindung zwischen Stimulus und Antwort (S-R Link) des häufigen Reizes (Buchstabe X) in 80% der Fälle präsentiert und war daher, laut der S-R Link Hypothese von Verleger et al., in einem aktiven Zustand und musste nicht reaktiviert werden. Auch die Verknüpfungen mit dem häufigen Reiz (Buchstabe X) in der Kombinations-Aufgabe wurden oft präsentiert (je 40% aller Reize) und waren ebenfalls in einem aktivierten Zustand. Im Gegensatz dazu war der S-R Link des seltenen Reizes (Buchstabe U) in der Oddball-Aufgabe nicht aktiviert, da der seltene S1 nur in 20% der Fälle präsentiert wurde. Die Abrufung des S-R Links des seltenen Reizes (Buchstabe U) in einer Kombination (U und ein blauer Rahmen bedeutet rechts drücken, U und ein gelber Rahmen bedeutet links) erschien nur in 10% der Fälle. Demnach müsste dieser S-R Link bei Präsentation erst reaktiviert werden. Die Ergebnisse der Studie (Verleger et al. (2014 [b]) zeigen, dass in der einfachen Oddball-Aufgabe durch die Präsentation des seltenen Buchstabens ein großer Oddball-Effekt auf die P3b hervorgerufen wurde. Bei der Präsentation des seltenen Buchstabens in Kombination mit dem Farbrahmen hingegen wurde eine massive Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3b beobachtet.

Laut der Template Updating und der Context Updating Hypothese würde man erwarten, dass durch den seltenen Stimulus (in diesem Beispiel Buchstabe U mit 20%) ein großer Oddball-Effekt auftreten würde. Die P3b würde immer gleich groß sein, egal ob der seltene Stimulus allein oder in Kombination präsentiert werden würde. Denn nach diesen Hypothesen würde die P3b nicht durch die Reaktion auf den Stimulus beeinflusst werden, sondern nur durch die Wahrnehmung und Bewertung des Stimulus (bekannt oder unbekannt). Es wird folglich nicht davon ausgegangen, dass die Komplexität der Aufgabe eine Veränderung des Oddball-Effekts bewirken könnte. Diese Hypothesen haben folglich

ihre Schwierigkeiten zu erklären, warum sich der Oddball-Effekt auf die P3 bei einer komplexen Aufgabenstellung (wie der Kombinations-Aufgabe) verändern konnte.

Wenn man die P3 hingegen als einen Aspekt des Entscheidungsprozesses interpretiert und die P3 als Ausdruck der Verbindung zwischen Reiz und Reaktion versteht, dann kann man wie schon beschrieben folgern, dass der Oddball-Effekt auf die P3 stark durch die schwierigere Kombinations-Aufgabe beeinflusst werden kann und wird, wie die aktuellen Ergebnisse von Verleger et al. (2014 [b]) zeigen. So wird die Annahme, dass die P3b ein Ausdruck der Reaktivierung von nicht leicht verfügbaren S-R Links ist, bestätigt. Es bleibt die Frage, welcher Faktor für die Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3 verantwortlich ist.

In der Studie von Verleger et al. (2014 [b]) konnte gezeigt werden, dass die Reduktion der P3b sehr wahrscheinlich nicht durch die Überlagerung eines negativen Potentials hervorgerufen wird. Tatsächlich trat ein großes negatives Potential in der Kombinations-Aufgabe auf. Diese große fronto-zentrale Negativität wurde von der Rahmenfarbe (zweiter Stimulus) ausgelöst, wenn diese nach einem seltenen Buchstaben (erster Stimulus) erschien. Durch Verlängerung der Latenz zwischen Buchstabe und der darauf folgenden Rahmenfarbe konnte die P3 jedoch von dem negativen Potential separiert werden. Wenn die Verringerung des Oddball-Effekts auf die P3 frei von negativen Überlagerungen ist, wie kann man dann diese Reduktion erklären? Welche Faktoren könnten eine Rolle spielen? Diese Fragen sollen in der hier vorliegenden Dissertation untersucht und wenn möglich geklärt werden.

Ein Faktor könnte die fehlende Assoziation zwischen S1 und Antwort sein, denn wenn S1 (X oder U) präsentiert wurde wussten die Versuchspersonen nicht, ob eine Reaktion mit rechts oder links erforderlich sein würde, da die Antwort auch durch S2 bestimmt wurde. Im ersten Experiment soll S2, basierend auf S1, vorhersagbar gemacht werden um eine Assoziation zwischen S1 und der Antwort zu kreieren und so die passende Antwort auf S1 schon bei der Wahrnehmung von S1 zu aktivieren. Wenn die fehlende Assoziation der entscheidende Faktor für die Reduzierung des Oddball-Effekts auf die P3 ist, dann sollte diese hier nicht mehr auftreten.

Ein anderer Faktor könnte die Komplexität der Zuordnung von Stimulus und Antwort (S-R mapping) sein. Diese Schwierigkeit könnte in mehrfacher Hinsicht entstehen. Ein Aspekt hierbei ist vielleicht das 4:2 mapping. Damit ist gemeint, dass vier verschiedene S-R Links nur durch zwei verschiedene Antwortmöglichkeiten (z. B. rechte oder linke Hand) beantwortet werden können, z. B.: X und blauer Rahmen oder U und gelber Rahmen

forderten eine Reaktion mit der rechten Hand, während X und gelber Rahmen oder U mit blauen Rahmen eine Antwort mit der linken Hand verlangen. Hierbei könnte es sein, dass nur die S-R Links präsent (aktiv) bleiben bei denen S1 häufig ist, weil diese öfter gebraucht werden. Ein anderer Aspekt ist vielleicht die Unabhängigkeit von S1 und S2 bei der Definierung der Antwort. Z. B. bedeutet ein blauer Rahmen (S2), dass mit links und ein gelber Rahmen (S2) dass mit rechts gedrückt werden soll, dies gilt aber nur dann, wenn vorher ein häufiger S1 (z. B. X) vorausging. Wenn ein seltener S1 (z. B. U) präsentiert wurde, dann bedeutet ein blauer Rahmen, dass rechts und ein gelber Rahmen, dass links gedrückt werden sollte. Diese Faktoren der Komplexität werden im zweiten Experiment untersucht, indem zum einen die Überlappung (4:2 mapping) zwischen dem häufigen und dem seltenen S1 und zum anderen die gegenseitige Abhängigkeit von S1 und S2 bei der Definierung der Antwort stufenweise reduziert wird. Sollte die Komplexität der entscheidende Faktor für die Reduzierung des Oddball-Effekts auf die P3b sein, dann sollte diese hier nicht mehr auftreten.

Alternativ könnte der bestimmende Faktor nicht die Schwierigkeit der Antwortauswahl, sondern die erhöhte Relevanz von S2 bei der Determinierung der Antwortauswahl sein. Dies wird im dritten Experiment überprüft, indem die Oddball und die Kombinations-Aufgabe mit Go/No-Go Aufgaben verglichen werden, in denen S2 anzeigt, ob die, durch S1 ausgewählte Antwort ausgeführt werden darf (Go bedeutet Start) oder nicht (No-Go bedeutet Stopp). Indem S2 in den Go/No-Go Aufgaben relevanter ist als in der Oddball-Aufgabe und weniger relevant ist als in der Kombinations-Aufgabe, wird erwartet, dass der Oddball-Effekt auf die P3 in den Go/No-Go Aufgaben kleiner als in der Oddball- und größer als in der Kombinations-Aufgabe ist.

EXPERIMENT 1

2.1 EINLEITUNG

Im ersten Experiment sollte zum einen das Ergebnis der Studie von Verleger et al. (2014 [b]) repliziert werden, bei dem durch die Verknüpfung mit dem seltenen S1 in der schwierigen Kombinations-Aufgabe eine massive Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3b hervorgerufen wurde. Zum anderen sollte untersucht werden, ob diese Reduktion durch eine fehlende Assoziation zwischen S1 und der Antwort zustande kam. Um dies zu überprüfen, wurden die S-R Links der Oddball-Aufgabe mit zwei Versionen der schwierigen Kombinations-Aufgabe verglichen. Diese zwei verschiedenen Versionen unterschieden sich darin, ob es eine Assoziation zwischen S1 und S2 und damit zwischen S1 und der Antwort gab oder nicht. Diese Assoziation sollte kreiert werden indem S2 und damit die Antwort auf S1 vorhersagbarer gemacht wurde. So sollte der S-R Link von S1 bereits schon bei der Präsentation des ersten Stimulus aktiviert werden und dadurch die Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3b aufheben.

2.2 MATERIAL UND METHODEN

2.2.1 Versuchspersonen

Für das erste Experiment wurden 12 Probanden untersucht. Alle Probanden die an der Studie teilnahmen, gelangten in die Auswertung. Es nahmen 7 weibliche und 5 männliche Probanden im Alter von 19 bis 27 Jahren teil. Das Durchschnittsalter betrug 23 Jahre, Standardabweichung 2,2. Hiervon waren 11 Studenten und einer anderweitig tätig. Die Aufklärung der Probanden fand mündlich sowie schriftlich vor dem Versuch statt. Die Teilnahme war freiwillig, eine entsprechende Einwilligungserklärung wurde vorab unterschrieben. Das Experiment dauerte ca. 45 min und wurde mit 15 € entlohnt. Alle Probanden sollten gewisse Kriterien erfüllen. So wurden unter anderem nur Rechtshänder in die Studie mit eingebunden. Dies wurde durch das Edinburgh Händigkeits-Inventar (Oldfield 1971) überprüft. Der Händigkeits-Score ergab einen Mittelwert von 92,5 mit einer Standardabweichung von 9,65 bei Werten von 70 bis 100, somit waren alle Probanden Rechtshänder. Bei den Versuchsteilnehmern lagen eigenanamnestisch keine signifikanten Erkrankungen vor, insbesondere keine neurologischen oder psychiatrischen. Darüber hinaus nahmen die Probanden keine Medikamente ein, die die Funktion des Gehirns beeinflussen würden. Sechs Versuchsteilnehmer waren normalsichtig, die anderen sechs Probanden trugen eine Brille oder Kontaktlinsen, die einen normalen Visus gewährleisteten. Bei den Probanden lag keine Farbsehschwäche vor.

2.2.2 EEG-Ableitung

Als Erstes musste der Kopfumfang der Probanden gemessen werden, um eine Kopfhaut (Easycap-EEG-Haube) in der richtigen Größe auszuwählen. Die Haube wurde den Probanden auf den Kopf gesetzt und mit einem elastischen Kinnriemen geschlossen. Die Haube verfügte über besondere Vorrichtungen, an denen die Elektroden des EEG befestigt werden konnten. Die Vorrichtung bestand aus einem Loch in der Kappe, dessen Rand mit einem Plastikring verstärkt war. An diesem Plastikring konnten die Elektroden angebracht werden (siehe Abb. 5).

Die EEG Ableitung erfolgte mittels 60 Silber/Silberchlorid (Ag/AgCl) Elektroden, die an die Kopfhaut angesteckt wurden. Vier weitere Elektroden wurden im Gesicht zur Registrierung der Augenbewegungen genutzt (siehe Abb. 4). Unter Verwendung des 10-10-Systems wurden folgende Elektrodenpositionen auf dem Kopf abgeleitet (in fronto-okzipitaler Reihenfolge: siehe www.easycap.de, Stand 22.11.2013): Fpz, AFz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz, AF3, AF4, F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, FC1, FC2, FC3, FC4,

FC5, FC6, FT7, FT8, C1, C2, C3, C4, C5, C6, T7, T8, CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, TP7, TP8, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, PO3, PO4, PO7, PO8, PO9, PO10, O1, O2. Die Elektrodenpositionen sind auch nachvollziehbar durch die schematische Darstellung in Abb. 1 und 2. Die Bezeichnungen der Position der Elektroden wird durch das erwähnte international anerkannte 10-10 System definiert (Details siehe Legende Abb. 1). Für die Forschung werden meist viele Elektroden benötigt, um eine bessere Lokalisation der hirnelektrischen Ströme angeben zu können. Das 10-10 System ist eine Erweiterung des 10-20-Systems. Das 10-20-System wurde bereits 1958 von Jasper erfunden und weist im Gegensatz zum 10-10-System nur 21 Elektroden auf. 1985 wurde dann das 10-10-System, von der Arbeitsgruppe um Chatrian, mit 74 Elektroden entwickelt.

Nach Anbringen der Elektroden erfolgten zwei weitere Messungen mit einem Maßband, um zu ermitteln, ob die Kopfhaut symmetrisch saß oder durch das Anbringen der Elektroden zu einer Seite verrutscht war. Hierzu wurde mit einem Maßband vom Nasion über den Kopf bis zur Protuberancia occipitalis externa, auch Inion genannt, gemessen und dann das Messergebnis durch zwei geteilt. Das Ergebnis zeigte die Mitte zwischen rostralem und caudalem Teil der Kappe an. Lag das ermittelte Ergebnis zu weit vorne oder hinten konnte die Kappe in die richtige Position verschoben werden. Die zweite Messung erfolgte von dem präaurikulären Punkt des einen Ohrs über den Kopf zu dem anderen. Auch hier wurde dieses Messergebnis durch zwei geteilt. Das Ergebnis zeigte hier die Mitte der rechten und linken Hälfte der Kappe an.

Die Elektroden, die wie oben beschrieben an die Kopfhaut befestigt wurden, sind ringförmig und haben in der Mitte ein Loch. Sie werden im Fachjargon als Ringelektroden bezeichnet. Durch dieses konnte nun die Kopfhaut gereinigt werden. Genutzt wurde hierfür ein in Alkohol (Cutasept der Firma Bode Chemie, Hamburg) getränktes Wattestäbchen. Im Gesicht wurde die Haut an den Stellen, die mit Elektroden beklebt werden sollten, mit Alkohol und einem Peeling (Everi, Conductive and abrasive paste, Spes Media – Italien) gereinigt. Danach wurde ein abrasives Elektrodengel (Natriumchlorid, Lapis pumicis, Traganth, Glycerin, Kaliumhydrogentartrat und Phenol liquidum 0,2 % in wässriger Lösung, Theodor-Körner-Apotheke, Graz, Österreich) an die gereinigten Stellen auf die Kopfhaut gespritzt, um die Leitfähigkeit der Kopfhaut zu verbessern und dadurch den Übergangswiderstand zwischen der Kopfhaut und den Elektroden zu verringern (siehe Abb. 6). So konnte der Widerstand unter 5 k Ω gesenkt werden.

Die angebrachten Elektroden an den Augen ergaben nach der Ableitung ein Elektrookulogramm (EOG), mit dem Augenbewegungen und Blinzeln registriert werden

konnten (siehe Abb. 4). Rechts wurden zwei Elektroden oberhalb und unterhalb des Auges angebracht. Darüber hinaus wurde am lateralen Augenrand des rechten und linken Auges jeweils eine Elektrode geklebt, welche die horizontale Augenbewegung aufzeichneten (hEOG). Eine dieser Elektroden war ausreichend für die Aufzeichnung der Augenbewegungen, da sich Augen bekanntlich immer zusammen bewegen. Die andere Elektrode diente als Referenz, da sie spiegelbildlich dasselbe maß. Durch die angebrachten Elektroden über und unter dem rechten Auge konnte das vertikale EOG (vEOG) abgeleitet werden. Diese Ableitungen waren wichtig, da die hierdurch erkannte gerichtete Augenbewegungen und das Blinzeln erkannt werden konnten und ihre Übertragung in das EEG berechnet und korrigiert werden konnten (genauere Beschreibung siehe Absatz Datenverarbeitung).

Die Ableitung erfolgte gegen eine Online Referenzelektrode auf dem Kopf in Position Fz (siehe Abb. 2). Nach der Aufzeichnung des EEGs wurden die Daten offline auf eine Elektrode auf dem Nasenrücken als Referenz zurückgerechnet. Die Elektrode zur Erdung (Masse) befand sich während der Aufzeichnung des EEGs auf dem Kopf in Position Fpz (siehe Abb. 2).

Da die abgeleiteten Signale der Kopfhaut in einem sehr kleinen messbaren Bereich liegen (Seifert 2005), wird ein Messverstärker benötigt. Hierfür wurde der „Brain AMP MR plus“ (Brain Products GmbH, München) genutzt, der die abgeleiteten EEG-Daten in einem Frequenzbereich von DC („direct current“ = Gleichspannung) bis 250 Hz verstärkte.

Um die abgeleiteten Signale der Kopfhaut auf dem Computer darstellen zu können, wurde ein Analog-Digital-Wandler benutzt, der die Signale mit einer Abtastrate von 500 Hz umwandelte. Die digitalisierten Daten wurden auf der Festplatte des Aufzeichnungscomputers gespeichert. Die Prozedur wurde unterstützt durch das Programm „Brain Vision Recorder“ (Version 1.03, Brain Products GmbH).

Die EEG-Ableitung ist für alle drei Versuche gleich und wird deshalb nicht noch einmal beschrieben.

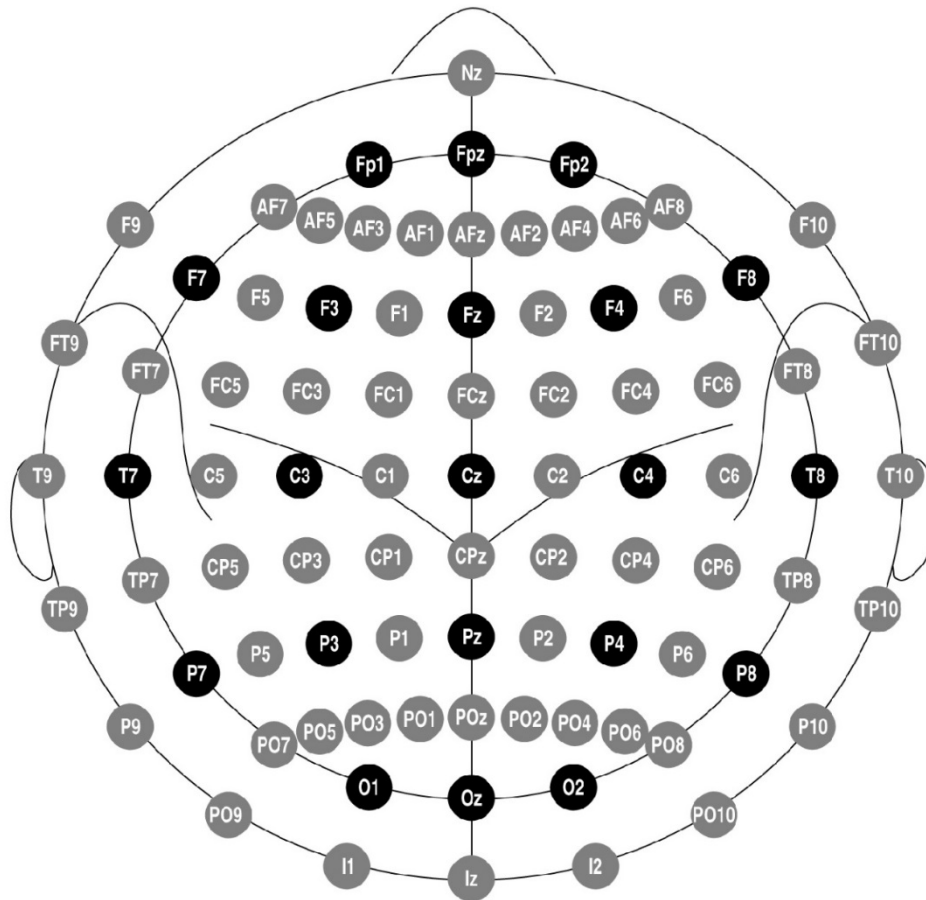


Abbildung 1 (Oostenveld R. und Praamstra P. 2001):

Das EEG-Schema zeigt die schematische Darstellung der Elektrodenpositionen. Die schwarz markierten Elektroden stellen das 10-20 System da. Die grau markierten Elektroden stellen die Erweiterung im 10-10 System da, welches auch für den Versuch genutzt wurde. Die Abkürzungen stehen für die Position der Elektrode auf den Achsen von rostral nach caudal (auf der Grafik sind es die vertikale Linien). AF für antero-frontal, F für frontal, C für zentral, T für temporal, CP für zentro-parietal, FC für fronto-zentral, P für parietal, PO für parieto-okzipital, O für okzipital. Die darauf folgenden Zahlen und Buchstaben geben die Lokalisierung auf den Achsen von links nach rechts an (in der Grafik sind es die horizontalen Linien) an. So steht der Zusatzbuchstabe z (= zero = engl. Null) für eine Lokalisation auf der Medianlinie des Kopfes, ungerade Zahlen für links, gerade Zahlen für rechts. In dieser Abbildung sind 85 Elektrodenpositionen angegeben. Für den beschriebenen Versuch wurden davon 64 verwendet, siehe Abb. 2.

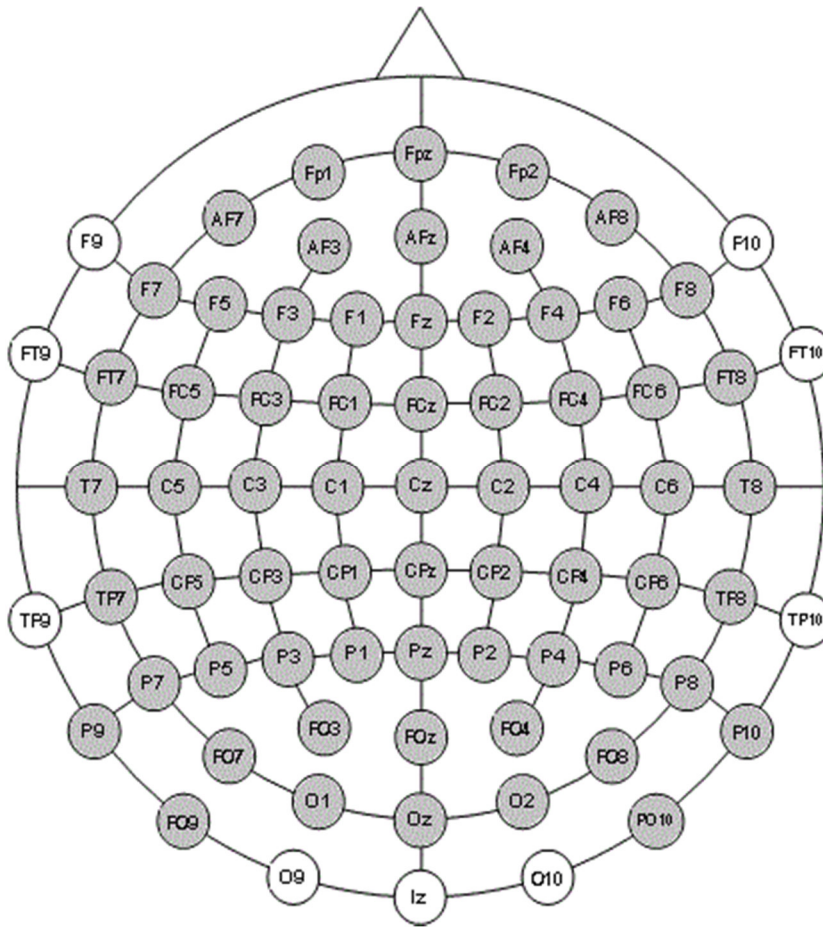


Abbildung 2

In dieser Abbildung ist die Anordnung von 74 Elektroden zu erkennen. Grau markiert sind die 64 Elektroden, die für die hier beschriebenen Experimente genutzt wurden ([http://www.easycap.de/e/products/products.htm](http://www.easycap.de/easycap/e/products/products.htm) (Stand: 16.01.2014)). Die graue Markierung, sowie die Zahlen 5 und 6 bei FC5 und FC6 wurden nachträglich zur Grafik ergänzt.):



Abbildung 3:
Probandin mit Elektroden auf dem Kopf sitzt vor dem Computer.

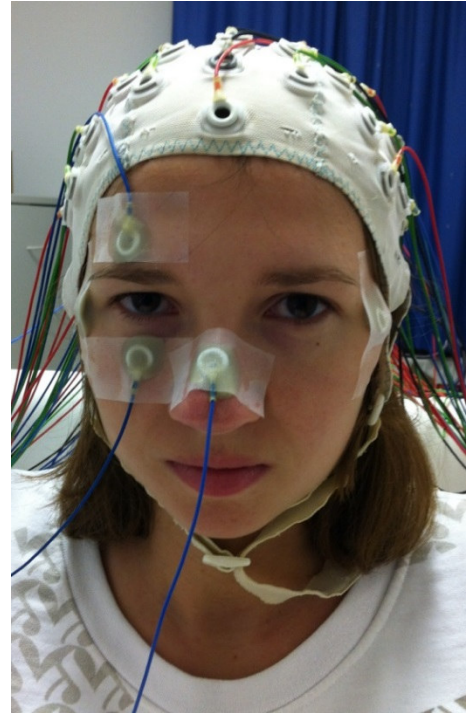


Abbildung 4:
Anordnung der Elektroden im Gesicht.

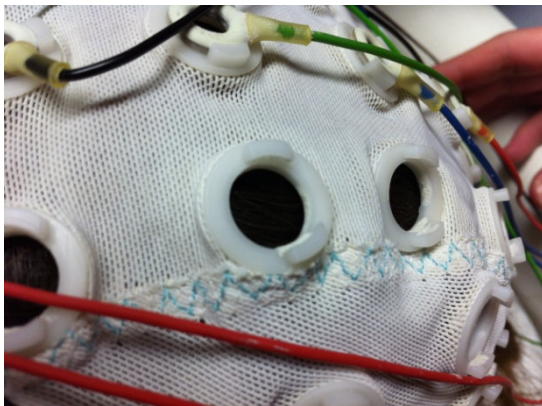


Abbildung 5:
Haltevorrichtung an der Kappe für die EEG-Elektroden.

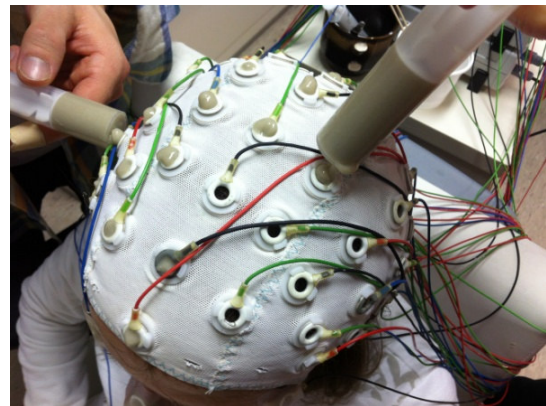


Abbildung 6:
Elektroden wird platziert.

Vielen Dank an J. Seemann und N. Baur für die Nutzung der Fotos.

2.2.3 Stimuli und Prozedere

Die Probanden befanden sich während des Experiments in einem separaten Raum bei gedimmtem Licht. Sie saßen auf einem gepolsterten Stuhl mit Armlehnen. Die Arme konnten so während des Experiments bequem platziert werden. Vor der Versuchsperson lag in einem gut erreichbaren Abstand eine Computertastatur (QWERTZ-Tastatur), auf der die Finger locker platziert werden konnten. Hier konnten die Probanden den erkannten Stimulus eingeben (siehe Abb. 3). Für das erste Experiment wurde z. B. die Zeigefinger beider Hände benutzt, die jeweils die [Strg]-Taste rechts oder links drückte. Die Tastatur lag auf einem drehbaren Tisch, der an dem Stuhl befestigt war, auf dem die Probanden saßen. Vor den Probanden stand in ca. 1,2 m Entfernung ein 17“ großer Röhrenbildschirm, der eine Bildwiederholungsfrequenz von 100 Hz produzierte. Auf diesem Bildschirm wurden die visuellen Reize präsentiert. Diese Reize wurden von einem Kontrollcomputer mit Hilfe des Programms „Presentation“ (Version 14.5, Neurobehavioral Systems San Francisco) erzeugt. Der Kontrollcomputer befand sich außerhalb des Raumes in dem die Probanden saßen. Der Bildschirmhintergrund blieb während des gesamten Versuchs gleichmäßig grau. Den Probanden wurde eine Kombination von einem Buchstaben („X“ oder „U“) mit einem darauf folgenden blauen oder gelben Rahmen dargeboten (siehe Abb. 7). Die Ereignisse waren 2,3 cm breit und 2,5 cm hoch, dies entspricht einem Sehwinkel von $1,15^\circ \times 1,25^\circ$.

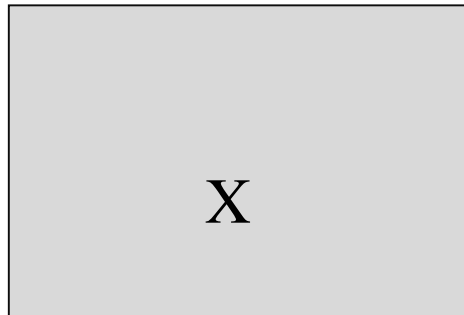
Nach dem Anbringen der Elektroden und dem Starten des Kontroll- und des Aufzeichnungscomputers wurde den Probanden der Ablauf erläutert. Die Experimente bestanden aus verschiedenen Blöcken. Jeder Block begann mit einer Aufgabenstellung, die auf dem Computerbildschirm zu lesen war. Die Aufgabenstellung erläuterte die Zuordnung der Lösungsmöglichkeiten für die jeweiligen Finger. Außer der Aufgabenstellung mit der jeweiligen Zuordnung erhielten die Probanden auch die Information, welcher Buchstabe häufig vorkommen würde. Nachdem sich die Versuchsteilnehmer die Anweisungen gemerkt hatten, wurde der erste Block gestartet. Wurde eine falsche Taste gedrückt, wartete das Programm solange, bis die richtige Taste gedrückt wurde. Erst nach der richtigen Beantwortung erschien ein neuer Reiz (siehe Abb. 7). Wurde vor einem Ereignis eine Taste gedrückt, so erschien auf dem Bildschirm in roter Schrift „Zu früh gedrückt!“ und die Versuchsperson musste zur Abschreckung 4 Sekunden warten, bevor ein neues Ereignis auf dem Bildschirm dargeboten wurde. Die Probanden wurden vor dem Versuch angewiesen, möglichst richtig und möglichst schnell zu antworten. Während des Versuchs sollten die Probanden die Mitte des Bildschirms fixieren. Darüber hinaus wurden die Probanden darauf hingewiesen, dass es wichtig sei, dass sie nicht so oft blinzelten und sich möglichst

wenig bewegten, da somit Artefakte im EEG verringert werden könnten. Während des Versuchs sollten die Probanden die Finger auf den entsprechenden Tasten der Tastatur ruhen lassen.

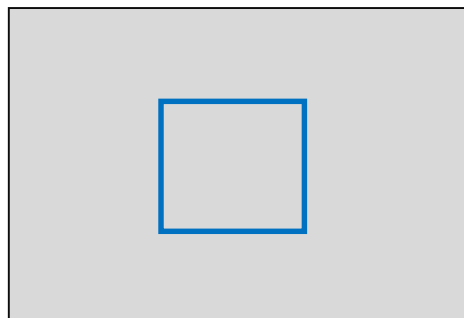
Die drei verschiedenen Experimente dauerten zwischen 30 und 70 min. Die Länge eines jeden Experiments variierte bei den Probanden ein wenig, da sie sich in der Schnelligkeit bei der Beantwortung des Reizes geringfügig unterschieden. Die Vorbereitungszeit dauerte ungefähr 45 min., abhängig davon, wie schnell der Widerstand auf unter 5 k Ω gesenkt werden konnte.

Anhand dieser Darstellung soll der Ablauf der Reizdarbietung beispielhaft verfolgt werden können.

0-200 ms: Darbietung des Buchstabens

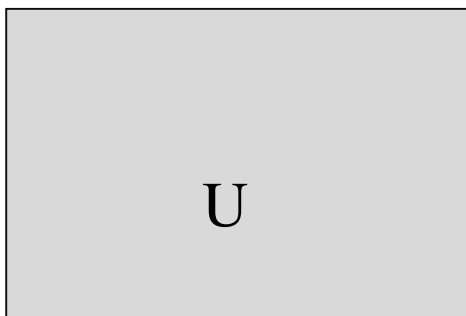


500-700 ms: Darbietung des Rahmens



unbegrenzt: Zeit für die Reaktion

*Bei richtiger Reaktion:
nächster Reiz in 800 ms*



*Bei falscher Reaktion:
weiterhin grauer Bildschirm*

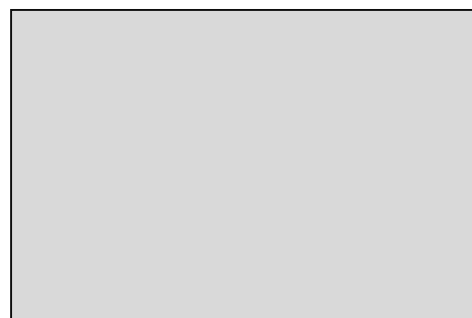


Abbildung 7

Die Stimuli des ersten Experiments bestanden, wie schon beschrieben, aus Buchstaben (S1) und Farbrahmen (S2). Da der Oddball-Effekt auf S1 untersucht wurde, gab es hier einen häufigen und einen seltenen Reiz (Buchstabe X und U) im Verhältnis von 80/20. Die Rahmen waren blau oder gelb, ihre Häufigkeitsverteilung variierte je nach Aufgabenstellung (siehe Tabelle 4). Als Antwort auf den Reiz sollte mit dem rechten oder linken Zeigefinger eine Taste entsprechend rechts oder links gedrückt werden. Um eine balancierte Antwort für die rechte und linke Hand zu erhalten, wurde allen Versuchspersonen jede Aufgabe in zwei Versionen präsentiert, eine in denen der Buchstabe X der häufige und der Buchstabe U der seltene Stimulus war und andersherum. Im Folgenden werden die Aufgabenstellungen nur anhand einer Version erklärt.

Es gab drei verschiedene Aufgabenstellungen (siehe Tabelle 4): Die Oddball-Aufgabe des Experiments glich der bereits beschriebenen Standard Oddball-Aufgabe. Der einzige Unterschied lag in der verzögerten Reizbeantwortung welche durch S2 zustande kam. Der Buchstabe X forderte eine Reaktion mit links und U mit rechts (in der Version bei der X der häufige Stimulus war). Der zweite Stimulus diente als Start-Signal (Go), unabhängig davon welche Farbe der Rahmen hatte. Die Buchstaben traten in einem Verhältnis von 80/20 auf. Für die zwei verschiedenen Antwortmöglichkeiten (links oder rechts drücken) bedeutete dies, dass eine der beiden Antwortmöglichkeiten viermal häufiger (80%) auftrat, als die andere. Wenn also S1 erschien, dann konnte bereits jetzt schon mit einer 100% Wahrscheinlichkeit die richtige Antwort gegeben werden.

Die Kombinations-Aufgabe glich jener aus den Versuchen von Verleger et al. (2014 [b]), außer dass es hier keine unterschiedlichen Latenzen zwischen S1 und S2 gab. Zur Unterscheidung wurde deshalb die Aufgabe dieses Versuches umbenannt. Im Folgenden wird von Kombi_50 gesprochen, zum einen weil die beiden Stimuli (S1 und S2) für die Reizbeantwortung kombiniert werden mussten und zum anderen weil die Wahrscheinlichkeit für die beiden Antwortmöglichkeiten (rechts oder links drücken) bei je 50% lag. Zur Veranschaulichung: Wenn S1 erschien (z. B. X) konnte noch keine Entscheidung darüber getroffen werden, ob die rechte oder linke Taste gedrückt werden sollte. Nach S1 folgte nun in 50% der Fälle ein blauer Rahmen oder gelber Rahmen (S2). Durch die Kombination von S1 und S2 konnte eine Antwort (rechts oder links drücken) gegeben werden. Wenn also S1 erschien, dann konnte mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% die Antwort vorhergesagt werden, denn die Antwort konnte nur zusammen mit der Rahmenfarbe entschieden werden, welche in einem Verhältnis von 50/50 auftrat.

Die dritte Aufgabe wird im Folgenden Kombi_80 genannt. Die Zuordnung von Reiz und Reaktion war dieselbe wie bei der Kombi_50% (daher Kombi), aber die Rahmenfarben (S2) traten im Gegensatz zu den beiden anderen Aufgabenstellungen im Verhältnis von 80% zu 20% auf. Wenn also S1 präsentiert wurde, dann folgt zu 80% eine bestimmte Rahmenfarbe (S2), z. B. wenn U (S1) erschien, dann folgt zu 80% der blaue Rahmen (S2), welcher damit die Reaktion mit dem rechten Zeigefinger forderte.

Wenn die Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3b in der Kombination-Aufgabe von Verleger et al. (2014 [b]) durch unterschiedliche Vorhersagewahrscheinlichkeiten der Antworten auf S1 verursacht wurde, dann müsste sich aufgrund der unterschiedlichen Vorhersagewahrscheinlichkeiten in den drei Aufgaben eine Abstufung des Oddball-Effekt auf die P3b zeigen. Man würde erwarten, dass der Oddball-Effekt auf die P3b in der Oddball-Aufgabe durch die 100%-ige Vorhersagewahrscheinlichkeit der Antwort auf S1 am größten und in der Aufgabe Kombi_50 mit einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 50% am kleinsten sein würde. Der Oddball-Effekt auf die P3b der Aufgabe Kombi_80 mit einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 80% müsste dann kleiner sein als der Effekt der Oddball-Aufgabe und größer als der der Aufgabe Kombi_50.





| Aufgabe | Stimuli und HV. | | Kombination von S1 und S2 und HV. | | | |
|---------------------|-----------------|----------------------------------|---|--|---|---|
| | S1 | S2 | X  | X  | U  | U  |
| Oddball | U/X 80/20 | blau/gelb 80/20 irrelevant | ZF-li. 80% | | ZF-re. 20% | |
| Kombi 50 | U/X 80/20 | blau/gelb 50/50 | ZF-li. 40% | ZF-re. 40% | ZF-re. 10% | ZF-li. 10% |
| Kombi 80 | U/X 80/20 | blau/gelb 80/20 | ZF-li. 64% | ZF-re. 16% | ZF-re. 16% | ZF-li. 4% |

Tabelle 4: In der Tabelle ist das Studien-Design des ersten Experiments unter der Angabe der Häufigkeitsverteilung (HV) aufgeführt. Bei der Oddball-Aufgabe wurde der Prozentsatz der Stimuli für die linke und rechte Hand zusammengenommen, da hier der zweite Stimulus nicht relevant war. Jede Aufgabe wurde zweimal durchgeführt. In einer Version war der häufige Stimulus der Buchstabe X in der anderen U (präsentiert jeweils in der ersten und zweiten Hälfte des Experiments). Der Einfachheit halber ist hier nur die Version mit dem häufigen X dargestellt. Folgende Abkürzungen wurden verwendet: „HV.“ steht für Häufigkeitsverteilung „S1“ und „S2“ für Stimulus 1 und 2, „blau“ und „gelb“ stehen für die jeweilige Rahmenfarbe von S2, „ZF“ steht für Zeigefinger, „re.“ für rechts und „li.“ für links.

Bei der Kombinations-Aufgabe in den Versuchen von Verleger et al. (2014 [b]) trat, wie bereits beschreiben, eine Negativität auf, die durch S2 hervorgerufen wurde und im Zusammenhang mit der schwierigen Antwortauswahl durch den seltenen S1 stand (je schwieriger die Antwortauswahl, desto größer die Negativität). Es wurde erwartet, dass sich diese Negativität replizieren und ebenfalls durch die unterschiedlichen S-R Links beeinflussen lässt. Da die Antwortauswahl der Kombi_80 durch die Vorhersagewahrscheinlichkeit vermutlich einfacher sein würde als bei der Kombi_50, wurde angenommen, dass hier die Negativität reduziert werden würde.

2.2.4 Datenverarbeitung

Die allgemeine Datenanalyse und Verarbeitung wird im Folgenden anhand des ersten Experiments erläutert. Die gewonnenen Daten bildeten die Grundlage für die statistische Auswertung.

2.2.4.1 Verarbeitung der EEG Daten

Die Datenverarbeitung des EEGs erfolgte mithilfe des Programms „Brain Vision Analyser“ (Version 2, Brain Products GmbH, München). Als erstes wurde, wie in dem Kapitel „EEG-Ableitung“ bereits erwähnt, die auf der Nasenspitze befindliche Elektrode als neue Referenzelektrode bestimmt. Danach wurde die Datenmenge gefiltert. Der „High Cutoff“ (Tiefpass)-Filter wurde mit einer Grenzfrequenz von >25 Hz festgelegt. Alle Daten über 25 Hz wurden somit eliminiert. Zusätzlich wurde anschließend der „Notch“ (Kerb)-Filter genutzt, der selektiv die (Wechselstrom-)Frequenz von 50 Hz abschwächte. Da nur die ereignisbezogenen Potentiale relevant für die spätere Auswertung waren, wurde die EEG-Aufzeichnung in einzelne Segmente unterteilt. Jedes Segment begann 100 ms vor dem ersten Stimulus (Präsentation des Buchstabens) und endete 1200 ms danach.

Die nächsten Schritte dienten dazu, Artefakte der EEG-Daten zu erkennen und zu beheben. Artefakte entstanden z. B., wenn die Probanden während des Versuchs stark schwitzten, sich bewegten oder blinzeln. Als erstes wurde die „Baseline“ (Grundlinie) korrigiert. Dazu wurde der Mittelwert der ersten 100 ms eines jeden Segments bestimmt und auf $0 \mu\text{V}$ gesetzt. Danach wurden Segmente mit groben Artefakten aus der Wertung genommen. Dies betraf jene Segmente, in denen eine Spannungsänderung zwischen zwei digitalisierten Datenpunkten von mehr als $50 \mu\text{V}$ vorkam oder deren Differenz zwischen dem Spannungsmaximum und dem Spannungsminimum $250 \mu\text{V}$ überschritt. Danach wurden die Blinzelartefakte korrigiert. Zunächst wurde das horizontale Elektrookulogramm (hEOG) bestimmt, welches die Differenz der Elektrode des linken und rechten Auges war. Das vertikale EOG (vEOG) ergab sich aus der Differenz der oberen und unteren Elektrode des rechten Auges. Durch das Blinzeln entstanden Amplituden im EOG die sich auch in den EEG-Ableitung der Elektroden auf dem Kopf niederschlugen. Diese Artefakte wurden mittels linearer Regression von den EEG-Daten der Elektroden auf dem Kopf abgezogen. Nach diesem Schritt erfolgte eine erneute Bestimmung der Grundlinie, da sich die Grundlinie durch die Korrektur der Blinzelartefakte verschoben haben könnte. Zum Abschluss wurden alle Segmente auf feine Artefakte untersucht. Aus der Wertung wurden hierbei Intervalle genommen, deren Amplitude den Betrag $\pm 150 \mu\text{V}$ überschritten.

2.2.4.2 Verarbeitung der Verhaltensdaten

Das Verhalten während des Versuchs wurde mit dem Programm „Presentation“ (Version 14.5) auf dem Steuerungscomputer in Log-Files aufgezeichnet. Anschließend wurden die Log-Files in das Programm „Excel“ (Windows, Version 2010) eingefügt und mit einer Prozedur (geschrieben von Prof. Dr. Verleger) ausgewertet.

Die Reaktionszeiten (RZs) der richtigen Antworten zwischen 50 ms und 1000 ms nach S2 wurden getrennt nach den Versuchspersonen und den drei Aufgaben gemittelt. Innerhalb der Aufgaben wurde getrennt nach den vier verschiedenen Reizen gemittelt. Um sicherzustellen, dass die Effekte auf die Verhaltensdaten durch die Häufigkeitsverteilung (häufiger, seltener S1) und nicht durch die Präsentation zweier verschiedener Buchstaben zustande kamen, wurden die Daten nach dem häufigen (bzw. seltenen) X und häufigen (bzw. seltenen) U (S1) gemittelt.

In gleicher Weise wurden die Prozentsätze der falschen Antworten (FQ) ermittelt (einschließlich der zu späten Antworten > 1000 ms).

2.2.4.3 Verarbeitung der EKP-Daten

Bei der Verarbeitung der EKP-Daten wurden nur die Durchgänge berücksichtigt, bei denen die Versuchspersonen richtig reagiert hatten. Die Durchgänge wurden getrennt gemittelt nach den Versuchspersonen und den drei Aufgaben und innerhalb dieser nach den vier verschiedenen Reizen. Die Daten wurden ebenfalls über die Blöcke mit dem häufigen X und U, bzw. seltenen X und U (S1) gemittelt.

Für die Verarbeitung der P3b-Daten wurden diese zusätzlich über S2 gemittelt, da dieser bei der S1-evozierten P3 keine Rolle spielte. Die durchschnittliche Anzahl der einbezogenen Durchgänge für den seltenen S1, getrennt für jede Aufgabe, war 75 mit einem Minimum von 49. Danach wurde die Differenz zwischen den Mittelwerten des seltenen und des häufigen S1 gebildet (selten minus häufig) um den Oddball-Effekt auf die P3b zu verdeutlichen. Anschließend wurde die Amplitude der P3b in dem Zeitraum, in dem sie auftrat, in den Kurven (seltener minus häufiger S1) gemessen. Dieser betrug 300 ms bis 600 ms nach S1. In den Kombinations-Aufgaben gab es im Gegensatz zu der Oddball Aufgabe keine klaren Spitzen, daher war es sinnvoller, die P3b als mittlere Amplitude über diesen Zeitraum zu messen als durch Bestimmung der Amplitude zu einem Gipfelzeitpunkt.

Für die Verarbeitung der Daten der Negativität wurden diese zusätzlich getrennt gemittelt für den gelben und blauen S2, da bei der S2-evozierten Negativität der zweite Stimulus bedeutsam war und dieser sich in der Aufgabe Kombi_80 in seiner

Häufigkeitsverteilung unterschied. Es wurde erwartet, dass die durch die Negativität reflektierte Antwortauswahl in der Aufgabe Kombi_80 bei dem seltenen (gelb) S2 schwieriger sein würde als bei dem häufigen (blau) S2. Die durchschnittliche Anzahl der einbezogenen Durchgänge für die Kategorie mit der kleinsten Wahrscheinlichkeit (4% bei: seltener S1 gefolgt von seltenem S2) war in der Oddball Aufgabe 17 und in der Aufgabe Kombi_80 14 mit einem Minimum von 12 und 8. In der Aufgabe Kombi_50 war die kleinste Wahrscheinlichkeit 10%, die durchschnittliche Anzahl der einbezogenen Durchgänge betrug 33 mit einem Minimum von 22. Die Amplitude der Negativität wurde als mittlere Amplitude in dem Zeitraum der Negativität in den Kurven (seltener minus häufiger S1) gemessen, welcher zwischen 250-450 ms nach S2 (750-950 ms nach S1) lag.

Als Lokalisation für alle Messdaten wurden die sieben Elektroden an der Mittellinie ausgewählt (Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz).

2.2.4.4 Statistische Analyse

Die Datenauswertung mittels Varianzanalyse (ANOVA) erfolgte mithilfe des Statistikprogramms „SPSS Statistics“ (Version 20 IBM Ehningen). Es wurden zwei unterschiedliche ANOVAs durchgeführt. Eine, in der die Aufgaben Oddball und Kombi_50 miteinander verglichen wurden, um die Ergebnisse aus den Versuchen von Verleger et al. (2014 [b]) zu replizieren. Und eine zweite ANOVA, in der die Aufgaben Kombi_50 und Kombi_80 miteinander verglichen wurden, um zu testen, ob die unterschiedlichen Vorhersagewahrscheinlichkeiten von S1 auf die Antwort die Reduktion des Oddball-Effekts beeinflussen konnten. Im Folgenden sind die durchgeführten Analysen mit ihren Faktoren dargestellt.

Für die Analyse der Reaktionszeit und der Fehlerquote waren folgende Faktoren wichtig:

- *Aufgabenfaktor*
 - Unterscheidet sich die Reaktionszeit / die Fehlerquote der verschiedenen Aufgaben untereinander?
 - Oddball vs. Kombi_50%
 - Kombi_50% vs. Kombi_80%
- *Häufigkeitsfaktor S1*
 - Unterscheidet sich die Reaktionszeit / die Fehlerquote abhängig davon ob ein häufiger oder seltener Reiz präsentiert wird?
 - Häufig (80%) vs. selten (20%)

- *Farbfaktor S2*
 - Unterscheidet sich die Reaktionszeit / die Fehlerquote von S2 abhängig davon ob ein blauer oder ein gelber Rahmen präsentiert wurde?
 - S2 blauer Rahmen vs. S2 gelber Rahmen

Für die Analyse der P3 waren folgende Faktoren wichtig:

- *Aufgabenfaktor* (siehe oben)
- *Ableitungsort*
 - Unterscheidet sich die P3 in Abhängigkeit vom Ableitungsort, bzw. wo ist die größte P3 lokalisiert?
 - Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz

Für die Analyse der Negativität waren folgende Faktoren wichtig:

- *Aufgabenfaktor* (siehe oben)
- *Ableitungsort* (siehe oben)
- *Farbfaktor S2* (siehe oben)

Um die Wechselwirkungen zu interpretieren, wurden die ANOVAs separat für jede Stufe der beteiligten Faktoren durchgeführt. Exemplarisch sind hier die Wechselwirkungen für die Analyse der Reaktionszeit im Detail dargestellt:

Für die Analyse der Reaktionszeit und der Fehlerquote

Wechselwirkungen zwischen *Aufgabe und Häufigkeit S1*

Wechselwirkung zwischen *Aufgabe und Farbe S2*

Wechselwirkung zwischen *Häufigkeit S1 und Farbe S2*

Wechselwirkung zwischen *Aufgabe, Häufigkeit S1 und Farbe S2*

Für die Analyse der P3

Wechselwirkung zwischen *Aufgabe und Ableitungsort*

Für die Analyse der Negativität

Wechselwirkung zwischen *Aufgabe und Ableitungsort* (s.o.)

Wechselwirkungen zwischen *Aufgabe und Farbe S2* (s.o.)

Wechselwirkung zwischen *Ableitungsort und Farbe S2*

Wechselwirkungen zwischen *Aufgabe, Ableitungsort und Farbe S2*

Wechselwirkungen zwischen Aufgabe und Häufigkeit S1

- Gibt es einen Häufigkeitseffekt auf die Reaktionszeit in jeder Aufgabe?
 - Häufigkeit S1 = signifikant in Oddball 1/4?
 - Häufigkeit S1 = signifikant in Kombi 1/1?
 - Häufigkeit S1 = signifikant in Kombi_2/1?
- Gibt es einen Aufgabeneffekt auf die Reaktionszeit bei jeder Häufigkeit?
 - Aufgabe = signifikant für häufigen S1?
 - Aufgabe = signifikant für seltenen S1?

Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Farbe S2

- Gibt es einen Effekt der Farbe auf die Reaktionszeit in jeder Aufgabe?
 - Farbe S2 = signifikant in Oddball_1/4?
 - Farbe S2 = signifikant in Kombi_1/1?
 - Farbe S2 = signifikant in Kombi_2/1?
- Gibt es einen Aufgabeneffekt auf die Reaktionszeit bei jeder Farbe?
 - Aufgabe = signifikant für gelben S2?
 - Aufgabe = signifikant für blauen S2?

Wechselwirkung zwischen Häufigkeit S1 und Farbe S2

- Gibt es einen Farbeffekt auf die Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Häufigkeit?
 - Farbe S2 = signifikant für häufigen S1?
 - Farbe S2 = signifikant für seltenen S1?
- Gibt es einen Häufigkeitseffekt auf die Reaktionszeit bei jeder Farbe?
 - Häufigkeit S1 = signifikant für blauen S2?
 - Häufigkeit S1 = signifikant für gelben S2?

Wechselwirkung zwischen Aufgabe, Häufigkeit S1 und Farbe S2

- Gibt es einen Häufigkeits- und Farbeffekt auf die Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Aufgabe?
 - Häufigkeit x Farbe = signifikant in Oddball_1/4?
 - Häufigkeit x Farbe = signifikant in Kombi_1/1?
 - Häufigkeit x Farbe = signifikant in Kombi_2/1?
- Gibt es einen Aufgabeneffekt und Farbeffekt auf die Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Häufigkeit?
 - Aufgabe x Farbe = signifikant für seltenen S1
 - Aufgabe x Farbe = signifikant für häufigen S1

- Gibt es einen Aufgaben- und Häufigkeitseffekt auf die Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Farbe?
 - Aufgabe x Häufigkeit = signifikant für blauen S2?
 - Aufgabe x Häufigkeit = signifikant für gelben S2?

Die Freiheitsgrade wurden für den Faktor Ableitungsort mit der Greenhouse-Geisser Methode korrigiert, da dieser mehr als zwei Stufen hatte. Die Ergebnisse der Varianzanalyse werden angegeben mit „F“ und „p“. „F“ gibt hierbei ein Verhältnis an. „F“ ist der Quotient aus der interessierenden Varianz (z. B. beim Häufigkeitseffekt die Differenz der über alles gemittelten Werte des häufigen und des seltenen Reizes) geteilt durch ihre Fehlervarianz (Streuung dieser Differenz zwischen den einzelnen Versuchspersonen). Durch die Bestimmung von „F“ kann gezeigt werden, dass das Ergebnis kein zufälliges ist. „P“ steht für Probability, zu Deutsch Wahrscheinlichkeit. Der p-Wert bezieht sich immer auf „F“ und sagt aus, wie wahrscheinlich es ist, dass dieser F-Wert zufällig zustande gekommen ist. Wenn $p < 5\%$, definiert man konventioneller Weise, dass das Ergebnis nicht zufällig und damit signifikant ist.

2.3 ERGEBNISSE

2.3.1 S1-evozierte P3b

Die gemittelten Potentiale, die vom häufigen und seltenen S1 ausgelöst wurden, sind in den Abbn. 8a und b dargestellt.

Der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3b war in der Oddball-Aufgabe deutlich größer als in der Aufgabe Kombi_50 (Haupteffekt der Aufgabe in der Analyse Oddball gegenüber Kombi_50: $F_{1,11} = 25.7$, $p < .001$). Von entscheidender Bedeutung ist, dass sich der Oddball-Effekt zwischen den Aufgaben Kombi_50 und Kombi_80 nicht signifikant unterschied (Haupteffekt der Aufgabe in der Analyse: Kombi_50 gegenüber Kombi_80: $F_{1,11} = 0.0$, n. s.).

Der Oddball-Effekt auf die P3b war an der Elektrodenposition Pz am größten (vgl. topografische Verteilung der P3bs in Abb. 8b, Haupteffekt des Ableitungsortes in der Analyse Oddball gegenüber Kombi_50: $F_{6,66} = 16.3$, $p < .001$ und in der Analyse Kombi_50 gegenüber Kombi_80: $F_{6,66} = 8.1$, $p = .001$).

Das topographische Profil unterschied sich zwischen den Aufgaben Oddball und Kombi_50 voneinander (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Ableitungsort in der Analyse Oddball gegenüber Kombi_50: $F_{6,66} = 8.7$, $p = .002$). Ob diese Verschiedenheit wirklich durch einen echten Unterschied in der Topographie oder durch den großen Amplitudenunterschied zwischen den beiden Aufgabenstellungen zustande kam ist schwer zu sagen, jedoch verschwand dieser Effekt nach einer Normalisierungs-Prozedur (vector scaling), was gegen eine wahren Unterschied der Topographien zwischen den beiden Aufgaben sprechen würde ($F_{6,66} = 0.4$, n. s.). Zwischen den beiden Kombinations-Aufgaben gab es keinen signifikanten Unterschied des topographischen Profils des Oddball-Effekts (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Ableitungsort in der Analyse Kombi_50 gegenüber Kombi_80: $F_{6,66} = 0.8$, n. s.)

2.3.2 S2-evozierte Negativität

Die Potentiale des Oddball-Effekts auf die S2-evozierte Negativität sind in Abb. 8b dargestellt.

2.3.2.1 Oddball vs. Kombi_50

In beiden Aufgaben war das Potential der S2-evozierten Negativität anterior größer als posterior (vgl. Potentiale des Oddball-Effekts auf die Negativität in Abb. 8b,

Ableitungsort: $F_{6,66} = 5.4$, $p = .008$). In der Oddball-Aufgabe waren die Potentiale der Negativität begrenzt auf die Elektrodenpositionen Fz und FCz, in der Aufgabe Kombi_50 hingegen erstreckten sie sich von der Position Fz bis zu Pz (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Ableitungsort: $F_{6,66} = 3.8$, $p = .02$). Das negative Potential war an den Positionen Cz, CPz und Pz in der Aufgabe Kombi_50 größer als in der Oddball-Aufgabe (Effekt der Aufgabe in separaten Analysen für diese Ableitungsorte: $F_{1,11} \geq 6.2$, $p \leq .03$).

Die verschiedenfarbigen Rahmen von S2 hatten keinen Effekt auf die Negativität ($F \leq 2.1$, $p \geq .13$).

2.3.2.2 Kombi_50 vs. Kombi_80

Das negative Potential unterschied sich zwischen den Aufgaben (Haupteffekt der Aufgabe: $F_{1,11} = 9.7$, $p = .01$) und wurde durch den Farbeffekt beeinflusst (Haupteffekt der Farbe (S2) $F_{1,11} = 9.2$, $p = .01$). Der Farbeffekt auf die Negativität war jedoch in den Aufgaben unterschiedlich (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Farbeffekt: $F_{1,11} = 9.6$, $p = .01$). In der Aufgabe Kombi_80% war das Potential der S2-evozierten Negativität deutlich größer nach dem seltenen (gelben) S2 (Wahrscheinlichkeit 20%) als nach dem häufigen (blauen) S2 (Wahrscheinlichkeit 80%) (Effekt von Farbe separat in dieser Aufgabe $F_{1,11} = 14.9$, $p = .003$). Dieses Potential (häufiger S2 in Kombi_80) unterschied sich nicht signifikant von dem Potential der S2s der Aufgabe Kombi_50 (Wahrscheinlichkeit 50%), weder zum blauen S2 ($F_{1,11} = 0.2$, $p = .68$) noch zum gelben S2 ($F_{1,11} = 0.1$, $p = .75$).

Die Negativität unterschied sich in den verschiedenen Ableitungsorten (Haupteffekt des Ableitungsort: $F_{6,66} = 6.3$, $p = .002$) und dies in Abhängigkeit von der Rahmenfarbe (S2) (Wechselwirkung zwischen Ableitungsort und Farbe (S2): $F_{6,66} = 3.3$, $p = .03$) wie folgt: Die Negativität erstreckte sich ohne klares topografisches Maximum von der Elektrodenposition Fz bis Pz bei den blauen S2s (häufige) und hatte dagegen bei den gelben S2s (seltene) deutlich erhöhte Potentiale, vor allem in den Elektrodenpositionen FCz bis Pz. Dieser Effekt unterschied sich nicht zwischen den Aufgaben (Wechselwirkung zwischen: Ableitungsort und Aufgabe $F_{6,66} = 1.1$, $p = .35$ und Ableitungsort, Farbe und Aufgabe $F_{6,66} = 1.1$, $p = .38$).

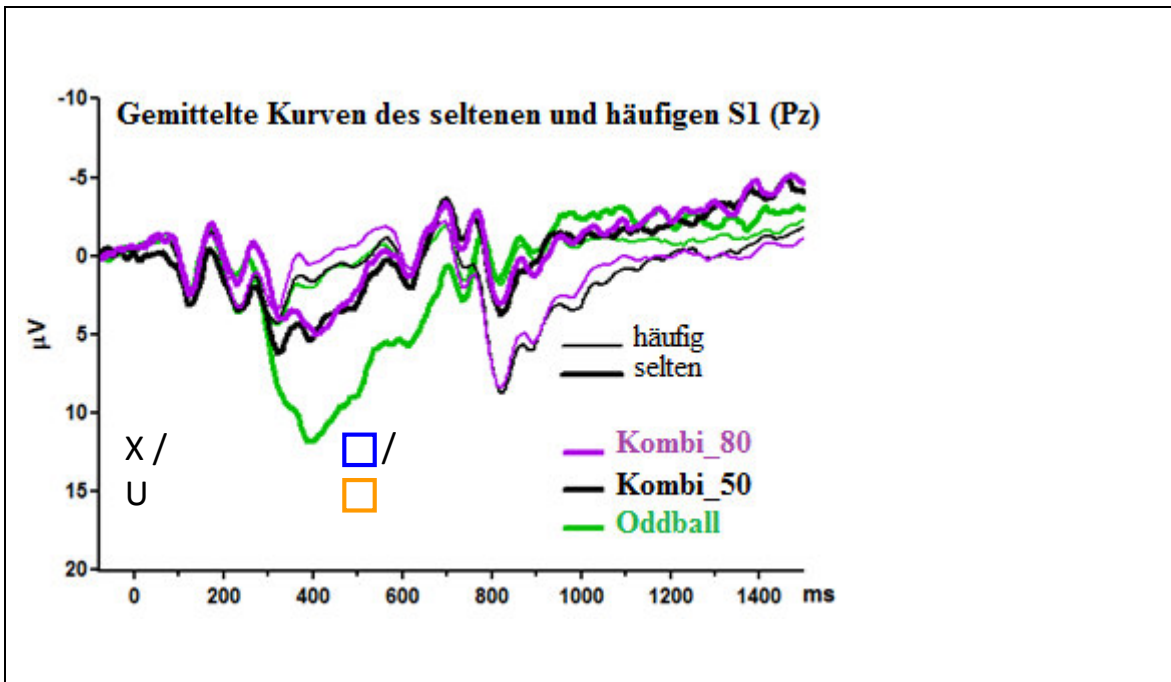


Abbildung 8a:

Dargestellt sind die gemittelten Potentiale, die vom seltenen und häufigen S1 ausgelöst wurden, in der jeweiligen Aufgabe des ersten Experiments in der Elektrodenposition Pz. Auf der X-Achse ist die Zeit in ms und auf der Y-Achse der Ausschlag der Potentiale in μV angegeben. S1 (X oder U) wird im Zeitraum von 0 bis 200 ms und S2 (gelber oder blauer Farbrahmen) im Zeitraum von 500 bis 700 ms präsentiert. Die Daten der Oddball-Aufgabe werden durch grüne Linien gekennzeichnet, die der Kombi_50 Aufgabe durch schwarze Linien und die der Kombi_80 durch lila Linien. Die Daten wurden separiert für den seltenen (alle dicken Linien) und den häufigen S1 (alle dünnen Linien) dargestellt.

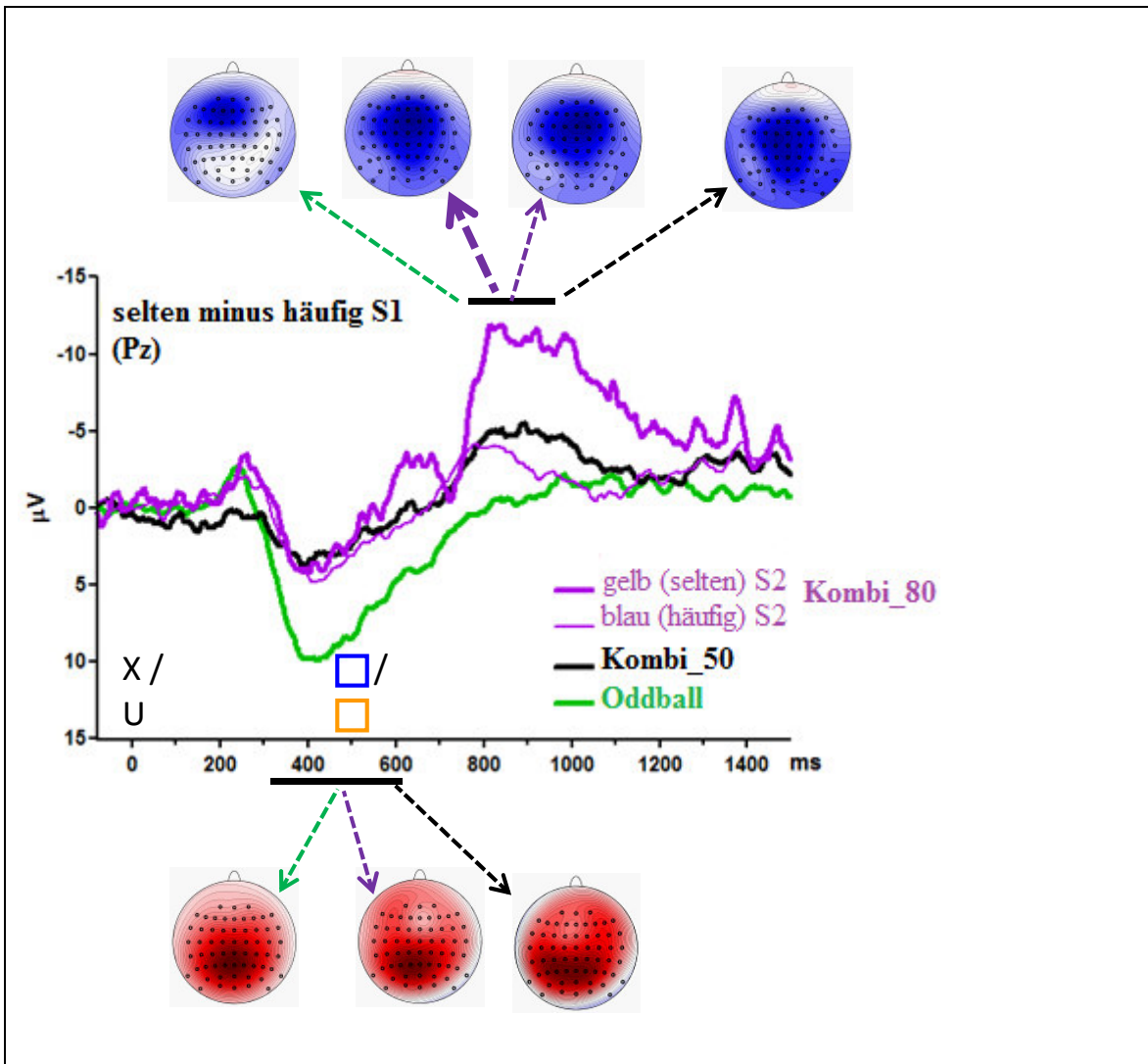


Abbildung. 8b:

Dargestellt sind in dieser Grafik die gemittelten Potentiale vom seltenen und häufigen S1, wobei die Potentiale der häufigen von den seltenen Reizen (S1) der jeweiligen Aufgaben des ersten Experiments subtrahiert wurden. Die Einteilung der X- und Y-Achse sowie die farbliche Zuordnung ist dieselbe wie in der Grafik davor. Die topographischen Unterschiede der verschiedenen Maxima der gemittelten Potentiale befinden sich 300-600 ms nach S1 (positiv) und 250-450 s nach S2 (negativ). Die Lokalisation der Maxima wird durch die abgebildeten Köpfe verdeutlicht (Sicht von oben auf den Kopf), wobei Rot für eine positive und Blau für eine negative Polarität steht. Die verschiedenfarbigen Pfeile zeigen die Zuordnung zu der jeweiligen Aufgabe an.

2.3.3 Reaktionszeit und Fehlerquote

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten (RZ) und Fehlerquoten (FQ) des ersten Experiments sind in der Abb. 9 zu sehen.

2.3.3.1 Oddball vs. Kombi_50

In der Aufgabe Kombi_50 waren die Reaktionszeiten viel länger und die Fehlerquote viel höher als in der Oddball-Aufgabe (Aufgabenfaktor Oddball gegenüber Kombi_50: $F_{1,11} = 84.4$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 32.0$, $p < .001$ für FQ).

Die Reaktionszeit und die Fehlerquote unterschieden sich generell abhängig davon, ob ein häufiger oder seltener Reiz präsentiert wurde (Haupteffekt der Häufigkeit (S1): $F_{1,11} = 57.2$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 32.2$, $p < .001$ für FQ). Dieser Häufigkeitseffekt auf die Reaktionszeit und die Fehlerquoten unterschied sich zwischen den Aufgaben Oddball und Kombi_50 (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Häufigkeit: $F_{1,11} = 59.0$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 24.8$, $p < .001$ für FQ). Um diese Wechselwirkungen genauer zu untersuchen wurde der Häufigkeitseffekt der beiden Aufgaben in getrennten ANOVAs untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass sich in der Oddball-Aufgabe Reaktionszeit und Fehlerquote nicht durch die Präsentation eines seltenen oder häufigen Stimulus (S1) beeinflussen ließen (Häufigkeitseffekt (S1) in der Oddball-Aufgabe: $F_{1,11} = 0.2$, n.s für RZ und FQ). In der Aufgabe Kombi_50 hingegen war der Häufigkeitseffekt auf die Reaktionszeit und Fehlerquote signifikant (Häufigkeitseffekt (S1) in der Aufgabe Kombi_50%: $F_{1,11} = 89.0$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 29.3$, $p < .001$ für FQ). Bei dem seltenen Reiz (S1) waren die Antworten langsamer (um ca. 100 ms) und es wurden mehr Fehler gemacht (ca. 16%).

Die unterschiedlichen Farben (S2) hatten einen ähnlichen Effekt auf die Reaktionszeit wie der Häufigkeitsfaktor (S1), denn auch hier unterschied sich bei der Aufgabe Kombi_50 die Reaktionszeit in Abhängigkeit vom Stimulus (hier Farben von S2). Bei einem gelben Farbrahmen war die Reaktion langsamer (ca. 25 ms) als bei einem blauen Farbrahmen. Dieses Ergebnis wurde durch die ANOVAs bestätigt, signifikant waren: Haupteffekt der Farbe (S2): $F_{1,11} = 8.9$, $p = .01$, Wechselwirkungen zwischen Aufgabe und Farbe: $F_{1,11} = 6.9$, $p = .02$ und Farbeffekt (S2) in der Aufgabe Kombi_50: $F_{1,11} = 8.7$, $p = .001$.

In der Oddball-Aufgabe wurde die Reaktionszeit vom Farbeffekt nicht beeinflusst (Farbeffekt (S2) in der Oddball-Aufgabe: $F_{1,11} = 0.6$, n. s.).

Die Farbe des Rahmens von S2 hatte generell keinen Einfluss auf die Fehlerquote (Haupteffekt und Wechselwirkung zwischen Farbe (S2) und Fehlerquote: $F_{1,11} \leq 1.7$, $p \geq .22$).

2.3.3.2 *Kombi_50 vs. Kombi_80*

In der ANOVA der beiden Kombinations-Aufgaben war der oben beschriebene Farbeffekt auf die Reaktionszeit ebenfalls vorhanden, wobei er in der Aufgabe Kombi_80 größer war als in der Kombi_50. Wurde ein gelber Farbrahmen (S2) in der Aufgabe Kombi_80 präsentiert, so brauchten die Versuchspersonen im Durchschnitt 84 ms länger als bei einem blauen Farbrahmen. Bei der Aufgabe Kombi_50% betrug die Differenz nur 25 ms. Einen ähnlichen Einfluss hatte der Farbeffekt auch auf die Fehlerquote. Diese Ergebnisse waren signifikant und werden reflektiert durch folgende ANOVA-Effekte: Haupteffekt der Farbe (S2): $F_{1,11} = 34.4$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 14.6$, $p = .003$ für FQ, Wechselwirkungen zwischen Aufgabe und Farbe: $F_{1,11} = 28.7$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 11.2$, $p = .007$ für FQ und großer Effekt der Farbe in der Aufgabe Kombi_80%: $F_{1,11} = 44.4$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 23.7$, $p < .001$ für FQ. Dieser große Effekt der Farbe auf die Aufgabe Kombi_80 äußerte sich darin, dass bei dieser Aufgabe schneller reagiert wurde und weniger Fehler gemacht wurden als in der Aufgabe Kombi_50, wenn ein blauer Farbrahmen (S2) präsentiert wurde (siehe Abb. 9) (zur Erinnerung: Die Häufigkeitsverteilung des blauen Rahmens lag bei der Kombi_80-Aufgabe bei 80% und bei der Kombi_50-Aufgabe bei 50%). Dies wird auch durch separate ANOVAs für jede Farbe getrennt bestätigt, in denen der Haupteffekt der Aufgabe bei blauem Farbrahmen signifikant waren ($F_{1,11} = 23.5$, $p = .001$ für RZ; $F_{1,11} = 5.6$, $p = .04$ für FQ), beim gelben hingegen nicht ($F_{1,11} \leq 0.6$, n. s., für RZ und FQ).

Es gab Wechselwirkungen zwischen diesem Aufgabeneffekt, dem blauen Rahmen und dem Häufigkeitseffekt (S1). Bei der Aufgabe Kombi_80 war die Reaktionszeit 67 ms schneller bei der Kombination *häufiger S1 mit blauem/häufigem S2* als bei der Kombination: *häufiger S1 mit gelben/seltenen S2*. Die Kombination seltener S1 mit blauen/häufigen S2 war nur 38 ms schneller als die Kombination seltener S1 mit blauem/häufigem (S2). Dass Farbe und Häufigkeit der verschiedenen Aufgaben generell einen signifikanten Effekt auf die Reaktionszeit hatten, wurde durch die ANOVA bestätigt (Wechselwirkung zwischen Häufigkeit (S1), Farbe (S2) und Aufgabe: $F_{1,11} = 18.3$, $p = .001$ für RZ). Dass nur die blauen Farbrahmen mit dem Häufigkeitseffekt und Aufgabentyp interagierten und die Reaktionszeit signifikant beeinflussten, wurde festgestellt, indem die dreifache Wechselwirkung zwischen Häufigkeit (S1), Farbe (S2) und Aufgabe separiert wurde für die unterschiedlichen

Rahmenfarben: (Wechselwirkung zwischen Häufigkeit (S1), blauer Rahmen (S2) und Aufgabe: $F_{1,11} = 5.5$, $p = .04$ für RZ) und Wechselwirkung zwischen Häufigkeit (S1), gelber Rahmen (S2) und Aufgabe: S2, $F_{1,11} = 1.7$, n. s. für RZ).

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass die Reaktionszeit und die Fehlerquote der beiden Kombinations-Aufgaben sich je nach dem unterschieden, ob ein häufiger oder seltener S1 präsentiert wurde (Haupteffekt der Häufigkeit (S1): $F_{1,11} = 133.9$, $p < .001$ für RZ; $F_{1,11} = 50.7$, $p < .001$ für FQ).

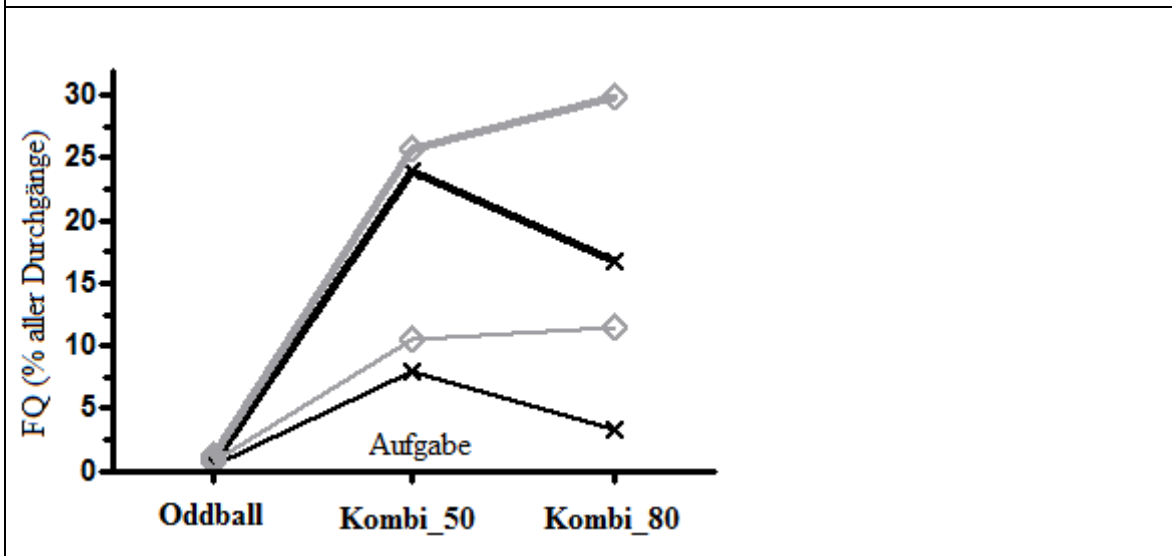
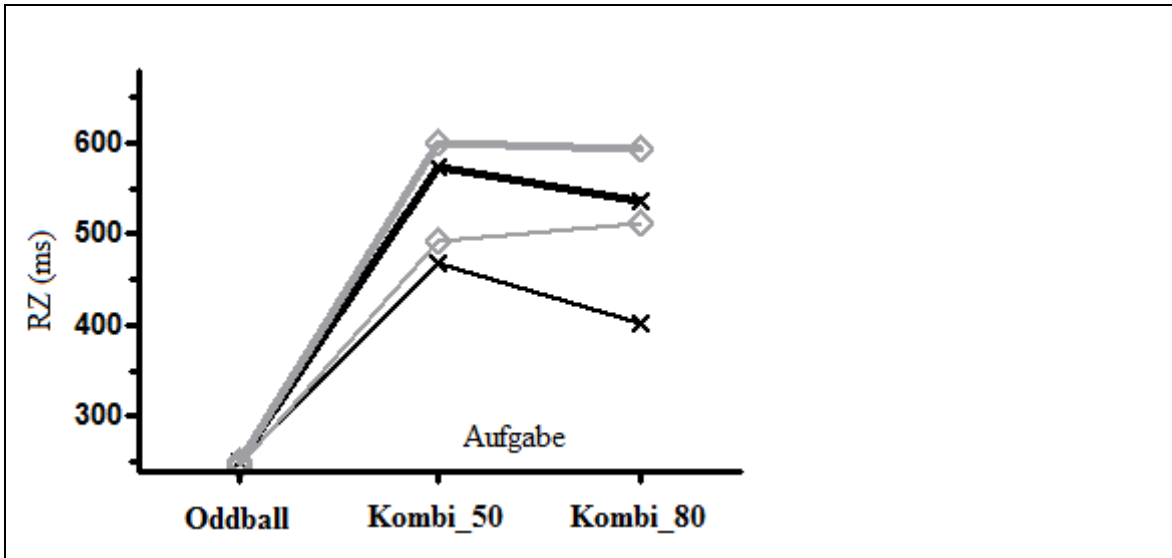


Abbildung 9: In der oberen Grafik sind die mittleren Reaktionszeiten und in der unteren Grafik die mittleren Fehlerquoten des ersten Experiments dargestellt. Auf der X-Achse sind die Aufgaben des Experiments und auf der Y-Achse die Reaktionszeit in ms, bzw. die Fehlerquote in Prozent angegeben. Dicke und dünne Linien unterscheiden zwischen seltenem (dick) und häufigem (dünn) S1. Der zweite Stimulus wird durch die Farben symbolisiert, wobei grau für den gelben (seltenen) S2 und schwarz für den blauen (häufig) S2 steht. Die Bezeichnung seltener und häufiger S2 bezieht sich hierbei nicht auf die Stimuli der Aufgabe Kombi_50, da hier der gelbe und blaue S2 in einem Verhältnis von 50 zu 50 präsentiert wurden.

Schwarz dick: selten S1, blau (häufig) S2

Schwarz dünn: häufig S1 blau (häufig) S2

Grau dick: selten S1, gelb (selten) S2

Grau dünn: häufig S1, gelb (selten) S2

2.4 DISKUSSION

Durch die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit einer Farbe von S2 in der Aufgabe Kombi_80 konnte im Vergleich zu der Aufgabe Kombi_50, die Reaktionszeit beschleunigt und die Fehlerquote gesenkt werden. Da die Antworten auf die Farbe eher durch die spezifischen S1-S2 (Buchstabe-Farbrahmen) Kombination bestimmt wurden als nur durch die Farbe S2, zeigt dieses Ergebnis, dass es eine gut ausgebildete Assoziation zwischen dem Buchstaben S1 und der Antwort in der Aufgabe Kombi_80 gab. Dennoch, der durch S1-evozierte Oddball-Effekt auf die P3 war in der Aufgabe Kombi_80 genauso reduziert wie in der originalen Kombinations-Aufgabe (Kombi_50). Deshalb wurden keine Beweise für die Annahme gefunden, dass die Reduktion des Oddball-Effekts in der Kombinations-Aufgabe deswegen hervorgerufen wurde, weil es keine Assoziation zwischen S1 Stimuli und den Antworten gab.

Unerwarteter Weise gab es auch in der Aufgabe Kombi_50 einen, wenn auch viel kleineren Effekt der Farbe (S2) auf die Reaktionszeit. Hier waren die Antworten schneller beim blauen als beim gelben Farbrahmen. Dieser Effekt könnte hervorgerufen werden durch die Instruktion der Aufgabe, da die Versuchsteilnehmer für den zweiten Stimulus immer erst die Anleitung für den blauen Rahmen und danach für den gelben Rahmen erhielten (z. B. „X und blauer Rahmen bedeutet links drücken, X und gelber Rahmen bedeutet rechts drücken“). Alternativ könnte der Effekt entstanden sein, dass wenn die Aufgabe Kombi_80 der Aufgabe Kombi_50 vorausging, die Aufgabenstellung von Kombi_80 auf die folgende Kombi_50 übertragen wurde. Um diese zweite Möglichkeit zu testen, wurden zusätzliche Analysen gemacht, in denen die Versuchspersonen, welche die Aufgabe Kombi_80 vor der Kombi_50 hatten, mit den Probanden verglichen wurden, in denen die Aufgaben anders herum präsentiert wurden. Außerdem wurde untersucht, ob sich die zwei verschiedenen Versionen der Kombi_50 voneinander unterschieden (erste Version in den ersten drei Blöcken und zweite Version in den letzten drei Blöcken, genaueres siehe Aufgabenstellung Tbl. 4). Aber keiner dieser Faktoren interagierte mit dem Farbfaktor (S2). Folglich war wohl nicht die Reihenfolge der Kombinations-Aufgaben, sondern die Instruktion der Aufgabe (blauer Rahmen wurde immer vor gelben Rahmen zugeordnet) entscheidend für diesen Effekt.

EXPERIMENT 2

3.1 EINLEITUNG

In dem Folgenden Experiment sollte untersucht werden, ob die Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3b in der Kombinations-Aufgabe von Verleger et al. (2014 [b]) evoziert wurde durch die Komplexität der Zuordnung von Stimulus und Antwort (S-R mapping), die hervorgerufen wurde durch die Überlappung und Unabhängigkeit von S1 und S2 bei der Definierung der Antwort. Drei Aufgaben wurden konzipiert, die immer weniger von diesen Faktoren der Kombinations-Aufgabe beinhalteten. Durch die schrittweise Reduzierung dieser Faktoren über die Aufgaben sollte erreicht werden, den Oddball-Effekt graduell wieder herzustellen. Genutzt wurden die gleichen Reize wie im ersten Experiment. Anders als im ersten Experiment war die Häufigkeitsverteilung der Rahmenfarben (S2) in allen Aufgaben gleich (50/50). Die Wahrscheinlichkeiten aller Stimuli waren somit identisch über die vier Finger (zwei pro Hand) verteilt.

3.2 MATERIAL UND METHODEN

Es werden nur Unterschiede zum ersten Experiment beschrieben.

3.2.1 Versuchspersonen

An dem zweiten Experiment nahmen 15 Probanden teil. In die Auswertung gelangten von den 15 Probanden 12. Es nahmen 7 weibliche und 5 männliche Probanden im Alter von 19 bis 26 Jahren teil. Das Durchschnittsalter betrug 23 Jahre (22,6), Standardabweichung 2,0. Hiervon waren alle Studenten. Die Probanden wurden nach den gleichen Kriterien ausgewählt wie beim ersten Experiment. Ein besonderer Anreiz sollte dadurch erzielt werden, dass die Probanden pro richtige Lösung 1 Cent verdienen konnten. Die Aufwandsentschädigung betrug im Durchschnitt 20 €. Bei dem Edinburgh Händigkeitstest erreichten die 12 Probanden bei Werten von 80 bis 100 einen Mittelwert von 88,33 mit einer Standardabweichung von 9,40, was sie somit als Rechtshänder auswies. Acht Probanden waren normalsichtig. Vier Probanden trugen eine Brille oder Kontaktlinsen, die einen normalen Visus gewährleisteten.

Aus der Studie ausgeschlossen wurden zwei Probanden aufgrund von technischen Fehlern, sowie eine weitere Versuchsperson, die in einem Block eine Fehlerquote von 100% aufwies, da die Aufgabenstellung nicht verstanden worden war.

3.2.2 EEG-Ableitung

Die Methoden sind dieselben wie im ersten Experiment.

3.2.3 Stimuli und Prozedere

Die Rahmenbedingungen des Versuchsaufbaus sind die gleichen wie bei dem ersten Experiment.

Im zweiten Experiment gab es vier verschiedene Aufgaben. Die Kombinationsaufgabe von Verleger et al. (2014 [b]) und aus dem ersten Experiment dieser Doktorarbeit (Kombi_50) gab es auch in diesem Versuch. Sie wird im Folgenden Kombi_4:2 genannt, weil vier Kombinationsmöglichkeiten von S1 mit S2 zu zwei Antworten (zwei Finger stehen zur Reizbeantwortung zur Verfügung) gebündelt wurden. Wenn z. B.: X und ein blauer Rahmen oder U und ein gelber Rahmen präsentiert wurden, dann musste die Versuchsperson mit der rechten Hand reagieren. Erschien ein X und ein gelber Rahmen oder ein U mit einem blauen Rahmen, musste mit der linken Hand geantwortet werden. Um diese Aufgabe besser mit den anderen Aufgaben des Experiments zu vergleichen zu können, wurden einmal die

Daumen und einmal die Mittelfinger zur Beantwortung genutzt. Die Aufgabe erschien den Probanden also zweimal während des Versuchs.

In den anderen drei Aufgaben wurden vier Finger statt zwei Finger für die Beantwortung der Reize genutzt. Sie sind Modifikationen der Aufgabe Kombi_4:2. Am ähnlichsten zu der Aufgabe Kombi_4:2 ist die Aufgabe Kombi_4:4. Der entscheidende Unterschied der Aufgabe lag darin, dass hier jede S1-S2 Kombination eine eigene Antwort hatte, da für die vier verschiedenen S1-S2 Kombinationen vier Finger zur Auswahl standen (Daumen und Mittelfinger beider Hände). Damit gab es hier keine Überlagerung der Antworten mehr. Wenn man davon ausgeht, dass der Oddball-Effekt auf die P3b in der Aufgabe Kombinations-Aufgabe von Verleger et al. (2014 [b]) reduziert wurde, weil der seltene S1 durch die Überlappung der Reizbeantwortung mit dem häufigen S1 nicht unabhängig im Arbeitsgedächtnis abgespeichert werden konnte, dann dürfte diese Reduktion bei der Aufgabe Kombi_4:4 nicht mehr auftreten, da hier jeder Reiz eine eigene Zuordnung besaß.

In der Aufgabe S1_Unabhängig liefert S1 eine eigenständige antwortrelevante Information. Z. B. wurde durch ein X eine Reaktion mit dem Mittelfinger gefordert und durch ein U eine Reaktion mit dem Daumen. Welche Hand reagieren sollte wurde durch den folgenden S2 definiert. Folglich mussten S1 und S2 weiterhin miteinander kombiniert werden. Des Weiteren gab es immer noch eine konträre Bedeutung für den seltenen gegenüber häufigen S1 in Verbindung mit S2: z. B. blauer S2 fordert eine Reaktion mit links nach X und eine Reaktion mit rechts nach U). Wenn man davon ausgeht, dass die Reduktion des Oddball-Effekts auf die P3b in der Kombinations-Aufgabe hervorgerufen wurde, weil der seltene S1 keine unabhängige Information enthielt, dann dürfte es diese Reduktion nicht in der Aufgabe S1_Unabhängig geben.

Alle bisher beschriebenen Aufgaben des Experiments hatten eine Gemeinsamkeit: S2 forderte immer eine gegensätzliche Reaktion in Kombination mit S1. Diesen Gegensatz gab es in der Aufgabe S1&S2_Unabhängig nicht mehr. Hier liefern S1 und S2 unabhängige Informationen. Wenn zum Beispiel S1 den Finger definierte (z. B. bei X immer Mittelfinger, bei U immer Daumen), dann sagte S2 etwas über die Hand aus (z. B. bei einem blauen Rahmen immer linke Hand, bei einem gelben Rahmen immer rechte Hand). Bei den anderen Aufgaben konnte man keine unabhängigen Aussagen nur durch S1 oder S2 gewinnen. Es mussten immer beide Informationen kombiniert werden. Wenn nun der Oddball-Effekt auf die P3b in der Kombinations-Aufgabe reduziert wurde, weil die Information vom seltenen

S1 immer noch für zukünftige Kombinationen mit S2 gespeichert werden musste, dann dürfte die Reduktion in der Aufgabe S1&S2_Unabhängig nicht mehr auftreten.

Die vier beschriebenen Aufgaben wurden in zwei verschiedenen Versionen (Finger oder Hand, siehe Tbl. 5) innerhalb einer Versuchsreihe präsentiert und hatten je vier verschiedenen Reize. Für die Eingabe der Reize wurden folgende Zuordnung von Fingern und Tasten genutzt: Mittelfinger links: [Tab]-Taste links, Daumen links: [Strg]-Taste links, Mittelfinger rechts: [Eingabe]-Taste, Daumen rechts [Strg]-Taste rechts. Wie schon beschrieben wurden alle vier Finger in den Aufgaben Kombi_4:4, S1_Unabhängig und S1&S2_Unabhängig genutzt, so dass jede S1-S2 Kombination eine Lösungsmöglichkeit hatte. Die Aufgabe Kombi_4:2 nutzt entweder die Mittelfinger oder die Daumen und so diente ein Finger zur Beantwortung von zwei Reizen.

Der Ablauf des zweiten Experiments war vom Prinzip derselbe wie der des ersten Experiments. Jedoch fand vor jedem Block ein Übungsdurchlauf mit 10 Ereignissen statt. Hier wurde nur die Reaktion auf den häufigen Buchstaben abgefordert. Nach diesem Durchgang erschien auf dem Bildschirm, wie viele richtige und falsche Antworten die Probanden gegeben hatten. So konnten die Versuchspersonen sich selbst kontrollieren. Daraufhin erschien noch einmal die Zuordnung der Lösungsmöglichkeiten und der Block konnte gestartet werden. Nach jeweils 50 Ereignissen wurde der Punktestand (richtige und falsche Lösungen) den Probanden angezeigt, um die Motivation zu fördern.





| Aufgabe | Wahlkriterium | Reiz 1 | Reiz 2 | Reiz 3 | Reiz 4 |
|---------------------------------------|---|---|---|---|---|
| | ungerade Vp-Nr: | HV.: 40% | HV.: 40% | HV.: 10% | HV.: 10% |
| | S1 und S2 | X  | X  | U  | U  |
| Kombi 4:2 | S1 bestimmt weder | 3-li | 3-re | 3-re | 3-li |
| | Finger noch Hand | 1-li | 1-re | 1-re | 1-li |
| Kombi 4:4 | S1 beeinflusst Entscheidung über Finger | 3-li | 1-re | 1-li | 3-re |
| | S1 beeinflusst Entscheidung über Hand | 3-li | 1-re | 3-re | 1-li |
| S1 Unabhängig | S1 best. Finger | 3-li | 3-re | 1-re | 1-li |
| | S1 best. Hand | 3-li | 1-li | 1-re | 3-re |
| S1&S2 Unabhängig | S1 best. Finger | 3-li | 3-re | 1-li | 1-re |
| | S1 best. Hand | 3-li | 1-li | 3-re | 1-re |

Tabelle 5: In der Tabelle ist das Studien-Design des zweiten Experiments mit der Häufigkeitsverteilung (HV) aufgeführt. Dargestellt sind die vier Aufgaben mit ihren beiden Blöcken und die erforderlichen Reaktionen. Jede Aufgabe wurde also zwei Mal pro Versuchsperson durchgeführt. Die eine Hälfte der Versuchspersonen hatte X als häufigen und U als seltenen Stimulus, bei der anderen Hälfte war es umgekehrt. Der Einfachheit halber ist hier nur die Version mit dem häufigen X dargestellt (für ungerade Versuchspersonen-Nummern. Die Abkürzung „Vp-Nr“ steht für Versuchspersonen-Nummer, „HV.“ steht für Häufigkeitsverteilung, „li“ und „re“ stehen für linke und rechte Hand, „3“ und „1“ stehen für den dritten (Mittel-) und ersten Finger (Daumen), „best.“ steht für bestimmt.

Die Personen mit ungeraden Versuchsnummern hatten als häufigen Buchstaben X und als seltenen Buchstaben U. Bei Probanden mit geraden Versuchsnummern war es umgekehrt. Des Weiteren hatten die Versuchspersonen mit ungeraden Teilnehmernummern zuerst die „Finger-Version“ und dann die „Hand-Version“, bzw. die „Daumen-Version“ bei

der Aufgabe Kombi_4:2. Die andere Hälfte (gerade Nummer) hatte zuerst die „Hand- (Daumen-) Version“ und dann die „Finger-Version“. Ein Block bestand aus 250 Ereignissen, wenn man die Übungsdurchgänge mit jeweils 10 Ereignissen vernachlässigt. Ein Versuch bestand aus 8 Blöcken (je 2 Blöcke pro Aufgabe). Die Reihenfolge der sechs Blöcke der Aufgaben Kombi_4:4, S1_Unabhängig und S1&S2_Unabhängig wurden permutiert und 12 mögliche Reihenfolgen festgelegt (siehe Tbl. 6). Die Blöcke der Aufgabe Kombi_4:2 befanden sich dabei immer in der Mitte.

| Versuchsperson | Reihenfolge | Versuchsperson | Reihenfolge |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| 01 | 1,2,3,4,5,6 | 07 | 4,3,6,5,2,1 |
| 02 | 1,2,5,6,3,4 | 08 | 4,3,2,1,6,5 |
| 03 | 2,1,4,3,6,5 | 09 | 5,6,1,2,3,4 |
| 04 | 2,1,6,5,4,3 | 10 | 5,6,3,4,1,2 |
| 05 | 3,4,5,6,1,2 | 11 | 6,5,2,1,4,3 |
| 06 | 3,4,1,2,5,6 | 12 | 6,5,4,3,2,1 |

Tabelle 6: Reihenfolge der Aufgabenblöcke des zweiten Experiments.

3.2.4 Datenverarbeitung

Es wird im Folgenden nur über Methoden berichtet, die sich gegenüber dem Vor-Experiment geändert haben.

3.2.4.1 Verarbeitung der EEG Daten

Die Methoden sind dieselben wie im ersten Experiment.

3.2.4.2 Verarbeitung der Verhaltensdaten

Bei diesem Experiment wurden die Reaktionszeiten und die Fehlerquoten der zwei Versionen einer Aufgabe zusammengefasst, da ein signifikanter Effekt des Aufgabenfaktors bei acht Blöcken schwierig zu interpretieren sein würde. Tatsächlich konnte ohne einen wesentlichen Informationsverlust gemittelt werden, da in Voranalysen der Versionsfaktor bei keiner Aufgabe einen signifikanten Effekt auf die Reaktionszeit und die Fehlerquote hatte.

Die Daten der Reaktionszeit und der Fehlerquote wurden nach den gleichen Kriterien ausgewählt und gemittelt wie im ersten Experiment. Innerhalb der Aufgaben wurde nach

dem häufigen und seltenen S1 getrennt gemittelt, im Unterschied zum ersten Experiment wurden die Daten über S2 gemittelt (über S2 konnte hier gemittelt werden, da die Häufigkeitsverteilung von S2 nach demselben Buchstaben (X oder U) S1 immer gleich war).

3.2.4.3 Verarbeitung der EKP Daten

Wie auch die Verhaltensdaten dieses Experiments wurden die EKP-Daten innerhalb der Aufgabe nach dem häufigen und seltenen S1 getrennt gemittelt. Diese Daten wurden dann über S2 und die zwei verschiedenen Versionen einer Aufgabe gemittelt.

Die Verarbeitung der P3b-Daten war dieselbe wie im ersten Experiment. Die durchschnittliche Anzahl der einbezogenen Durchgänge für den seltenen S1 betrug, getrennt für jede Aufgabe 71, mit einem Minimum von 34. Der Zeitraum der S1-evozierten P3b wurde von 350 ms bis 600 ms nach S1 gemessen.

Die Daten der Negativität wurden im Gegensatz zum ersten Experiment nicht noch zusätzlich nach blauen und gelben S2 getrennt gemittelt, da hier S2 in allen Aufgaben dieselbe Häufigkeitsverteilung und damit keine unterschiedliche Funktion hatte. Der Zeitraum der S2-evozierten Negativität unterschied sich nicht vom ersten Experiment.

3.2.4.4 Statistische Analyse

Die Varianzanalyse für die Reaktionszeit und die Fehlerquote berücksichtigte den Häufigkeitsfaktor S1 (häufig gegenüber selten) und den Aufgabenfaktor (Kombi_2:4, Kombi_4:4, S1_Unabhängig und S1&S2_Unabhängig). Die ANOVA für die P3 und für die Negativität beachtete die Faktoren Ableitungsort (Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz) und Aufgabenfaktor (siehe oben) in den Kurven des verrechneten S1 (selten minus häufig). Die Freiheitsgrade der Faktoren Aufgabe und Ableitungsort wurden nach der Greenhouse-Geisser Methode korrigiert.

3.3 ERGEBNISSE

3.3.1 S1-evozierte P3b

Die gemittelten Potentiale für den häufigen und den seltenen S1 der verschiedenen Aufgaben sind in den Abbn. 10a und b zu sehen. Der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 war in den Elektrodenpositionen Pz und POz am größten (Ableitungsort: $F_{6,66} = 9.8$, $p < .001$). Der Oddball-Effekt auf die P3s der vier Aufgaben unterschied sich weder in der Topografie noch in seiner Größe signifikant voneinander (Wechselwirkung zwischen Ableitungsort und Aufgabe: $F_{18,198} = 1.2$, n. s., Haupteffekt der Aufgabe: $F_{3,33} = 1.1$, n. s.).

3.3.2 S2-evozierte Negativität

Die Potentiale des Oddball-Effekts auf die S2-evozierte Negativität sind in Abb. 10b dargestellt. Das negative Potential war in den Elektrodenposition FCz und Fz am größten (Ableitungsort: $F_{6,66} = 5.7$, $p = .02$). Die Topografie der Negativität unterschied sich nicht signifikant in den verschiedenen Aufgaben (Wechselwirkungen zwischen Ableitungsort und Aufgabe: $F_{18,198} = 1.1$, n. s.). Von Interesse ist, dass sich allerdings die Größe der Negativität zwischen den Aufgaben signifikant unterschied (Haupteffekt der Aufgabe: $F_{3,33} = 3.7$, $p = .04$). Deshalb wurden in weiteren ANOVAs die einzelnen Aufgaben paarweise miteinander verglichen. Es konnte hierbei festgestellt werden, dass die Negativität in der Aufgabe Kombi_4:2 größer war als in den Unabhängigkeits-Aufgaben (Haupteffekt der Aufgabe in den zwei ANOVAs war mindestens: $F_{1,11} \geq 8.8$, $p \leq .01$) und sich von der Aufgabe Kombi_4:4 nicht signifikant unterschied ($F_{1,11} = 2.5$, $p = .14$). Wenn man die Abb. 10b betrachtet, sieht es zwar so aus, als wäre die Negativität in der Kombi_4:2 größer als in der Kombi_4:4, aber anscheinend gab es hier bei den Versuchspersonen eine sehr große Variabilität. Die Potentiale der Kombi_4:4 und der Unabhängigkeits-Aufgaben unterschieden sich nicht signifikant voneinander (Haupteffekt der Aufgabe in den drei ANOVAs war mindestens $F_{1,11} \leq 1.8$, $p \geq .21$).

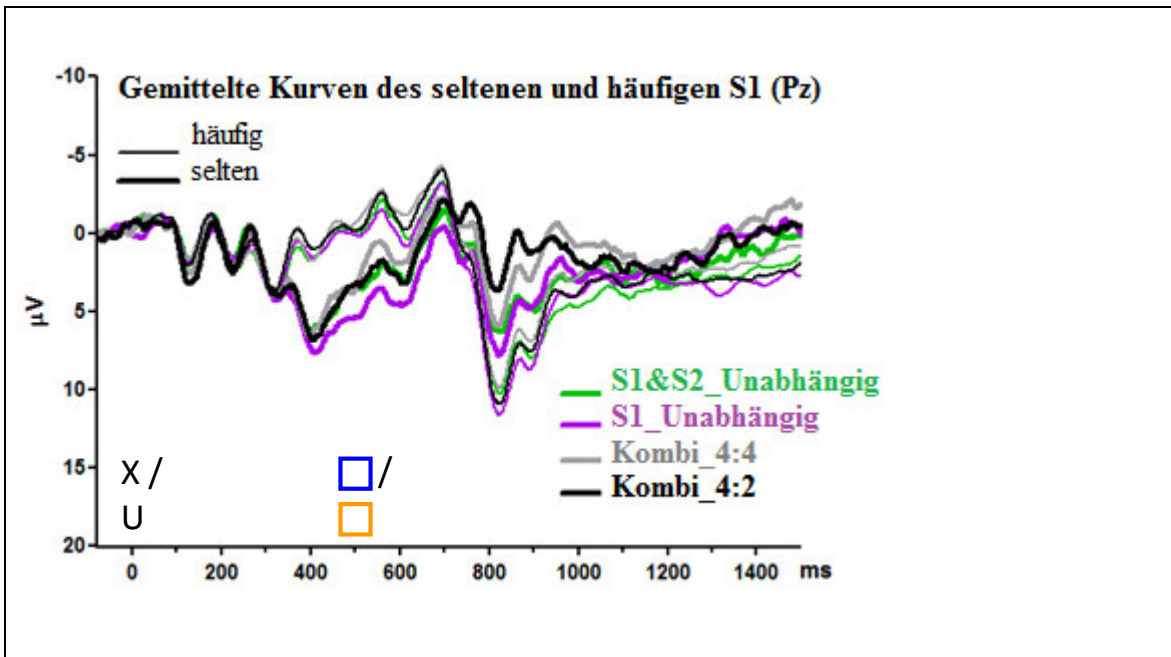


Abbildung 10a:

Dargestellt sind die gemittelten Potentiale, die vom seltenen und häufigen S1 ausgelöst wurden, in der jeweiligen Aufgaben des zweiten Experiments in der Elektrodenposition Pz. Auf der X-Achse ist die Zeit in ms und auf der Y-Achse der Ausschlag der Potentiale in μV angegeben. S1 (X und U) wird im Zeitraum von 0 bis 200 ms und S2 (gelber und blauer Farbrahmen) im Zeitraum von 500 bis 700 ms präsentiert. Die Daten der Aufgabe S1&S2_Unabhängig werden durch die grünen Linien gekennzeichnet, die der S1_Unabhängig durch die lila Linien, die der Kombi_4:4 durch die grauen Linien und die der Kombi_4:2 durch die schwarzen Linien. Die Daten wurden separiert für den seltenen (alle dicken Linien) und den häufigen (alle dünnen Linien) dargestellt.

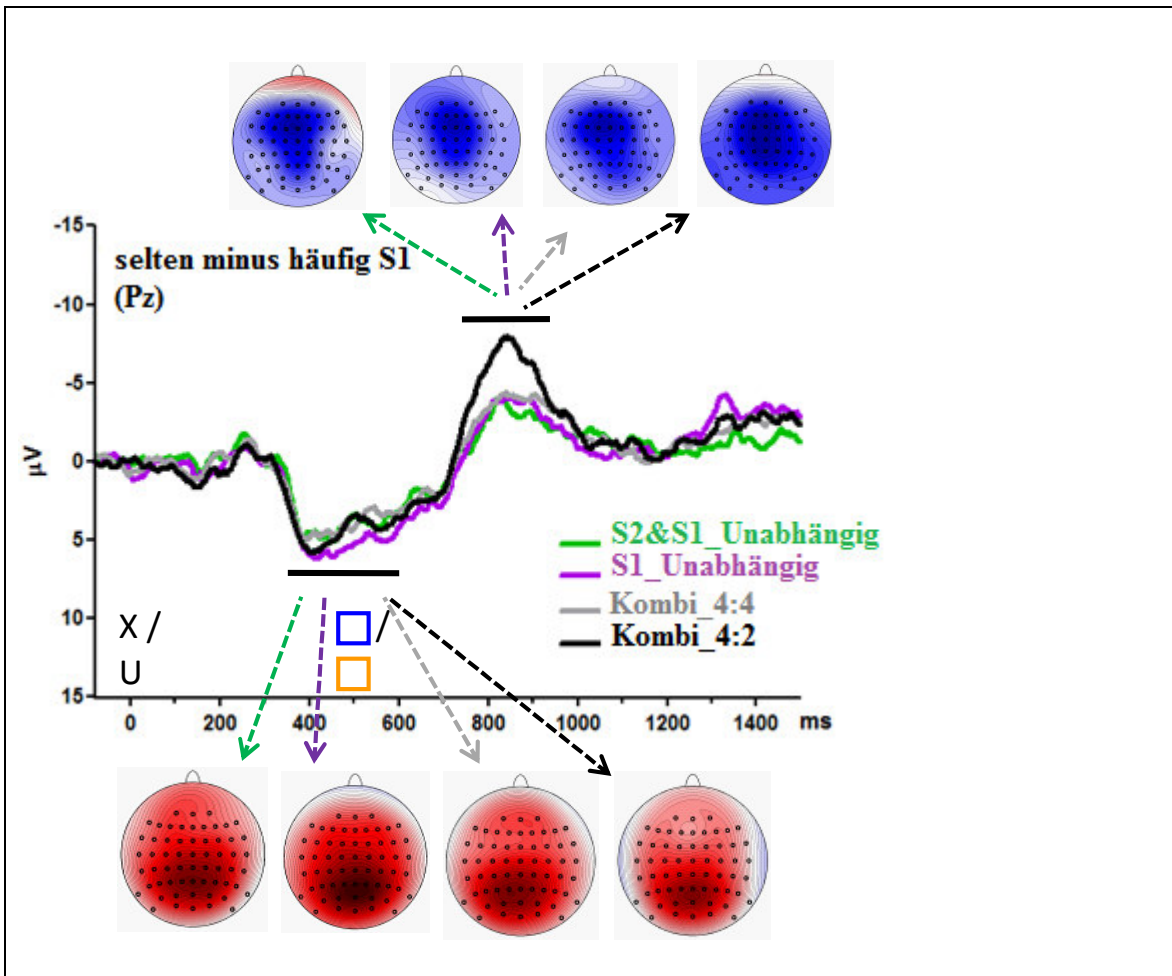


Abbildung 10b:

Dargestellt sind in dieser Grafik die gemittelten Potentiale vom seltenen und häufigen S1, wobei die Potentiale der häufigen von den seltenen Reizen (S1) der jeweiligen Aufgaben des zweiten Experiments subtrahiert wurden. Die Einteilung der X- und Y-Achse sowie die farbliche Zuordnung ist dieselbe wie in der Grafik davor. Die topographischen Unterschiede der verschiedenen Maxima der gemittelten Potentiale befinden sich 350-600 ms nach S1 (positiv) und 250-450 s nach S2 (negativ). Die Lokalisation der Maxima wird durch die abgebildeten Köpfe verdeutlicht (Sicht von oben auf den Kopf), wobei Rot für eine positive und Blau für eine negative Polarität steht. Die verschiedenfarbigen Pfeile zeigen die Zuordnung zu der jeweiligen Aufgabe an.

3.3.3 Reaktionszeit und Fehlerquote

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten und Fehlerquoten sind in der Abb. 11 zu sehen. Die Reaktionszeit war viel länger und es wurden mehr Fehler bei dem seltenen als bei dem häufigen S1 gemacht (Häufigkeitseffekt: $F_{1,11} = 220.9$, $p < .001$ für RZ und $F_{1,11} = 40.9$, $p < .001$ für FQ). Dieser Effekt unterschied sich zwischen den Aufgaben (Wechselwirkungen zwischen Häufigkeit und Aufgabe: $F_{3,33} = 7.0$, $p = .006$ für RZ und $F_{3,33} = 6.0$, $p = .01$ für FQ). Um diese Effekte zu lokalisieren, wurden die Daten der häufigen von den seltenen Reizen (S1) für jede Aufgaben einzeln subtrahiert. Diese Oddball-Effekte auf die Reaktionszeiten und Fehlerquoten wurden paarweise zwischen den Aufgaben durch den t-Test verglichen.

Der Oddball-Effekt auf die Reaktionszeit war am kleinsten in der Aufgabe S1&S2_Unabhängig (70 ms) ($t_{1,11} \geq 2.9$, $p \leq .015$) für die drei Vergleiche zu den anderen Aufgaben) und am größten in Aufgabe Kombi_4:2 (151 ms) ($t_{11} \geq 2.3$, $p \leq .04$). Er unterschied sich nicht signifikant zwischen den Aufgaben Kombi_4:4 (101 ms) und S1_Unabhängig (112 ms) ($t_{11} = 0.8$, n. s.).

Der Oddball-Effekt auf die Fehlerquote war relativ klein in den Aufgaben S1&S2_Unabhängig (8%) und Kombi_4:4 (12%) und relativ groß in den Aufgaben S1_Unabhängig (17%) und Kombi_4:2 (22%). Es gab keinen signifikanten Unterschied innerhalb dieser beiden Paare ($t_{11} \leq 1.6$, $p \geq .14$), allerdings unterschieden sich die einzelnen Aufgaben eines Paares signifikant von den Aufgaben des anderen Paares ($t_{11} \geq 2.4$, $p \leq .04$). Also z. B. unterschied sich die Aufgabe S1&S2_Unabhängig von den Aufgaben des anderen Paares (Kombi_4:4 und S1_Unabhängig).

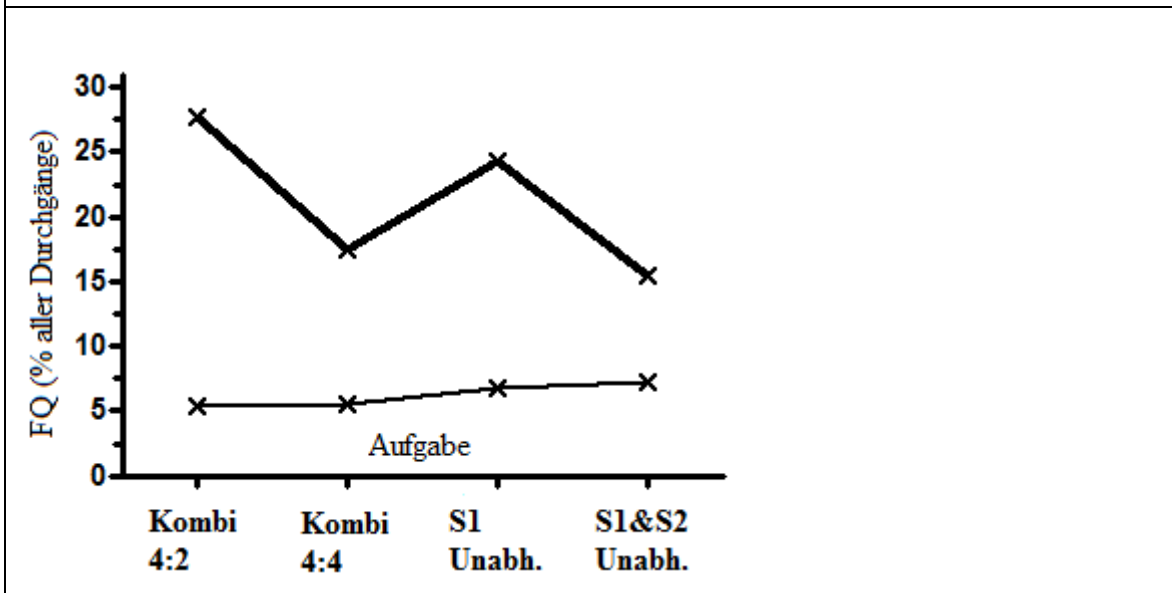
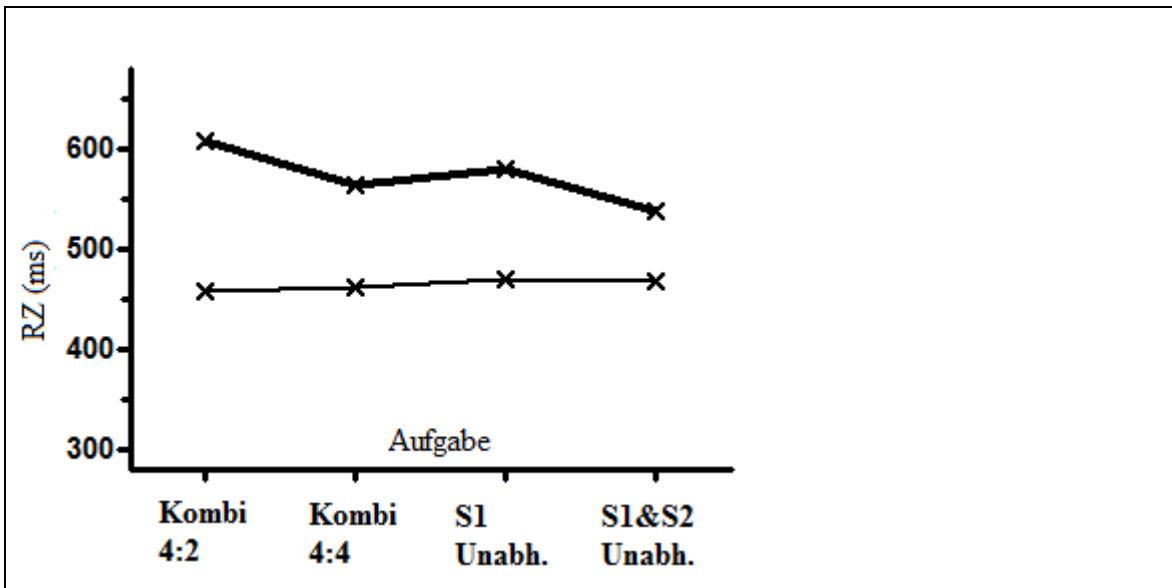


Abbildung 11:

In der oberen Grafik sind die mittleren Reaktionszeiten und in der unteren Grafik die mittleren Fehlerquoten des zweiten Experiments dargestellt. Auf der X-Achse sind die Aufgaben des Experiments und auf der Y-Achse die Reaktionszeit in ms, bzw. die Fehlerquote in Prozent angegeben. Dicke und dünne Linien unterscheiden zwischen seltenem (dick) und häufigem (dünn) S1.

Schwarz dick: seltener S1

Schwarz dünn: häufiger S1

3.4 DISKUSSION

Die vier Aufgaben des zweiten Experiments unterschieden sich in ihrer Art, wie auf die S1-S2 Kombination geantwortet werden sollte. Dadurch differenzierten sie sich in ihrer Schwierigkeit, die Antwort auszuwählen, wenn S1 selten war, welches durch folgende drei Parameter angezeigt wurde: verzögerte Reaktionszeit, Erhöhung der Fehlerquote und Erhöhung der durch S2-evozierten Negativität. Unter Beachtung dieser drei Parameter war die Kombinations-Aufgabe (hier Kombi_4:2 genannt) die schwierigste der vier Aufgaben. Trotzdem unterschied sich der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 nicht zwischen den Aufgaben. Deshalb könnte man schlussfolgern dass selbst die einfachste Aufgabe, welches die S1&S2_Unabhängig war (a priori und gemäß den Verhaltensdaten), den Faktor, der für die Reduktion des Oddball-Effekt der Kombinations-Aufgabe verantwortlich ist, enthielt. Es bleibt unklar, was dieser Faktor sein könnte.

EXPERIMENT 3

4.1 EINLEITUNG

Das Vorhaben durch die bisherigen Variationen der Kombinations-Aufgabe (Erhöhung der Vorhersagewahrscheinlichkeit, Reduzierung der Komplexität des S-R mappings und Reduzierung der Korrelation von S1 und S2) den Oddball-Effekt auf die P3 wenigstens in Teilen zu reduzieren schlug fehl.

All diese Faktoren, die in Bezug zur Aufgabenschwierigkeit stehen, waren vielleicht nicht die entscheidenden für die Reduzierung des Oddball-Effekts auf die P3b. Womöglich könnte es eher an dem allgemeinen Problem liegen, dass in der Oddball-Aufgabe S2 keine Rolle für die Antwortauswahl spielt, was im Kontrast zu all den anderen Aufgaben steht, die wir bis jetzt in den Experimenten genutzt haben. Deshalb wurde die Relevanz von S2 für die Antwortauswahl im dritten Experiment variiert. Hierfür wurde die Go/No-Go Aufgabe (Start/Stopp Aufgabe) eingesetzt, welche mit der Oddball- und Kombinations-Aufgabe verglichen wurde. In dieser Aufgabe sollte S2 keine Auswirkung auf die Entscheidung haben, die durch S1 veranlasst wird. Aber S2 sollte darüber bestimmen, ob die gewählte Antwort ausgeführt werden sollte (Go = Start) oder nicht (No-Go = Stopp).

In der Go/No-Go Aufgabe besaß S2 mehr Relevanz als in der Oddball- und weniger Relevanz als in der Kombinations-Aufgabe. Deshalb wird erwartet, dass der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3b in der Go/No-Go Aufgabe kleiner ist als in der Oddball-Aufgabe und größer ist als in der Kombinations-Aufgabe. Deshalb wurden in diesem Experiment die Oddball- und die Kombinations-Aufgabe als definierte Endpunkte verwendet (so wie auch im ersten Experiment) und mit zwei Versionen der Go/No-Go-Aufgabe verglichen.

Die eine Version nennen wir Oddball_Go/No-Go, die Bedeutung von S2 hing nicht von S1 ab, z. B. stand der blaue Rahmen (S2) immer für „Go“ (Start) und der gelbe Rahmen immer für „No-Go“ (Stopp).

Die andere Version nennen wir Kombination_Go/No-Go, hier ist die Bedeutung von S2 von S1 abhängig, ähnlich wie in den Kombinations-Aufgaben. Z. B. folgt nach dem Buchstaben X (S1) ein blauer Rahmen (S2), so bedeutet dies „Go“, folgt ein gelber Rahmen (S2), bedeute es „No-Go“. Folgt dem Buchstaben U (S1) ein blauer Rahmen (S2) bedeutet es hier „No-Go“ und folgt ein gelber Rahmen (S2) bedeutet es „Go“. Um die Versuchsteilnehmer mit der Aufgabe beschäftigt zu halten, war die Häufigkeitsverteilung der Go/No-Go-Aufgaben 80/20. Die gleiche Häufigkeitsverteilung für S2 wurde auch für die

Oddball und Kombinations-Aufgabe genutzt (wie auch in der Aufgabe Kombi_80 im ersten Experiment).

4.2 MATERIAL UND METHODEN

Es werden nur Unterschiede zu den vorausgegangenen Experimenten beschrieben.

4.2.1 Versuchspersonen

Im Januar 2014 wurden 13 Probanden untersucht. In die Auswertung gelangten von den 13 Probanden 12. Es nahmen 7 weibliche und 5 männliche Probanden im Alter von 23 bis 27 Jahren an der Studie teil. Das Durchschnittsalter betrug 25 Jahre, Standardabweichung 2,89. Hiervon waren 11 Studenten und eine Versuchsperson anderweitig tätig. Die Probanden wurden nach den gleichen Kriterien ausgewählt wie bei den vorherigen Experimenten. Das Experiment dauerte ca. 45 min und wurde mit 15 € entlohnt. Der Händigkeitsscore lag zwischen 50 und 100 und ergab einen Mittelwert von 90,84 mit einer Standardabweichung von 15,05, somit waren alle Probanden Rechtshänder. Bei diesem Experiment waren 7 Probanden normalsichtig. 5 Probanden trugen eine Brille oder Kontaktlinsen, die einen normalen Visus gewährleisteten.

Eine Versuchsperson wurde aus der Studie ausgeschlossen, da diese nicht auf den zweiten Stimulus wartete bevor er die Antworttaste drückte.

4.2.2 EEG Aufnahme

Die Methode ist dieselbe wie in den vorangegangenen Experimenten.

4.2.3 Stimuli und Prozedere

Die Rahmenbedingungen des Versuchsaufbaus sind dieselben wie in den vorausgegangenen Experimenten.

Um die Antwort einzugeben wurden die Tasten [Strg] rechts und links genutzt, die mit dem Zeigefinger der jeweiligen Hand gedrückt werden sollten. Es gab 20 Übungsdurchgänge vor jedem Block. Wie oben beschrieben, gab es vier Aufgaben: Oddball, Kombination, Oddball_Go/No-Go und Kombination_Go/No-Go (siehe Tbl. 7). Die Wahrscheinlichkeiten für X und U (S1) waren bei Versuchspersonen mit einer ungeraden Teilnehmernummer 80/20, wobei die linke Hand den häufigen Stimulus eingab, bei der anderen Hälfte der Versuchspersonen war U der häufige Stimulus und wurde mit der rechten Hand eingegeben. Die Wahrscheinlichkeiten für den blauen und gelben Farbrahmen (S2) waren 80/20 und für alle Versuchspersonen gleich, nicht aber für jede Aufgabe. In den Aufgaben: Oddball, Kombination und Oddball_Go/No-Go wurde der blaue und gelbe S2 mit einem Verhältnis von 80/20 präsentiert. In der Aufgabe Kombination_Go/No-Go folgte

einem X (S1) ebenfalls der blaue und gelbe S2 im Verhältnis von 80/20. Wurde in dieser Aufgabe jedoch ein U (S1) präsentiert, so war das Verhältnis von blauen und gelben S2 umgedreht, also 20/80. Dies war notwendig, um das Verhältnis der Go und No-Go Durchgänge bei 80/20 zu bewahren. Wir betrachteten dies als eine akzeptable Unregelmäßigkeit, weil der Fokus dieser Studie auf der S1-evozierten P3b lag und weniger auf dem Effekt der durch S2 hervorgerufen wird.





| Aufgabe | Wahlkriterium | Reize | | | |
|---------------------------------|--|---|---|---|---|
| | | X  | X  | U  | U  |
| Oddball | Nur S1 relevant S2 irrelevant | Links 80% | | Rechts 20% | |
| Kombination | Kombi S1 & S2 | Links 64% | Rechts 16% | Rechts 16% | Links 4% |
| Oddball Go/No-Go | S1: Re. od. Li. S2 Go/No-Go S1 & S2: orthogonal | Links Go 64% | Links No-Go 16% | Rechts Go 16% | Rechts No-Go 4% |
| Kombination Go/No-Go | S2 abhängig von S1 (S2 gekreuzten für Go/No-Go) | Links Go 64% | Links No-Go 16% | Rechts No-Go 4% | Rechts Go 16% |

Tabelle 7: In der Tabelle ist das Studien-Design des dritten Experiments mit der Häufigkeitsverteilung aufgeführt. Der Prozentsatz der Kombinationen mit X bzw. U wurden für die Oddball-Aufgabe zusammengenommen, da S2 hier keine Relevanz hatte. Die Hälfte der Versuchspersonen hatte X als häufigen und U als seltenen Stimulus (S1), bei der anderen Hälfte war es umgekehrt. Nur die Version mit dem häufigen X ist hier der Einfachheit halber dargestellt.

Die Reihenfolge der vier Aufgaben war in folgender Weise über die 12 Versuchspersonen balanciert (siehe Tbl. 8): Die Hälfte der Versuchspersonen hatte die zwei Go/No-Go Aufgaben in der Mitte (Gruppe A), die andere Hälfte hatte je eine der beiden

Aufgaben am Anfang und am Schluss (Gruppe B). Dieselbe Gruppeneinteilung wurde für die Zuordnung der Reihenfolge der anderen zwei Aufgaben genutzt: Die eine Hälfte hatte die Oddball- vor der Kombinations-Aufgabe (Gruppe A) und die andere Hälfte andersherum (Gruppe B). Je vier Versuchspersonen dieser Gruppen hatten die Reihenfolge der Oddball_Go/No-Go und der Kombination_Go/No-Go in derselben Reihenfolge wie die Oddball- und Kombinations-Aufgabe (Gruppe A1 und B1), bei zwei Versuchspersonen jeder Gruppe war diese Reihenfolge umgekehrt (Gruppe A2 und B2).

| Reihen- Folge | Gruppe A1 (4 VPs) | Gruppe A2 (2 VPs) | Gruppe B1 (4 VPs) | Gruppe B2 (2 VPs) |
|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | Oddball | Oddball | Kombi- Go/No-Go | Oddball- Go/No-Go |
| 2 | Oddball- Go/No-Go | Kombi- Go/No-Go | Kombination | Kombination |
| 3 | Kombi- Go/No-Go | Oddball- Go/No-Go | Oddball | Oddball |
| 4 | Kombination | Kombination | Oddball- Go/No-Go | Kombi- Go/No-Go |

Tabelle 8: In der Tabelle ist die Reihenfolge der vier Aufgaben balanciert über die 12 Versuchspersonen dargestellt. „Kombi“ steht als Abkürzung für Kombination, „VPs“ steht für Versuchspersonen.

4.2.4 Datenverarbeitung

4.2.4.1 Verarbeitung der EEG Daten

Anders als bei den vorausgegangenen Experimenten war, dass es in diesem Experiment No-Go-Durchgänge gab, wobei die richtig beantworteten Durchgänge mit in die Auswertung genommen wurden. Sie wurde definiert als Durchgänge ohne Tastendruck. Ansonsten waren die Methoden der Analyse die gleichen wie im ersten Experiment.

4.2.4.2 Verarbeitung der Verhaltensdaten

Da in diesem Experiment in den Go/No-Go Aufgaben der seltene S2 immer ein No-Go Durchgang war (also ein Durchgang, wo keine Taste für die Beantwortung von S1 gedrückt werden sollte) gab es hier keine Reaktionszeiten und konnte nur für den häufigen

S2 ermittelt werden. Für die Fehlerquoten wurde bei den No-Go Durchgängen der Prozentsatz der fälschlich gedrückten Tasten (Fehlerquote) berücksichtigt.

Die Daten wurden wie im ersten Experiment innerhalb der Aufgabe getrennt nach den vier verschiedenen Reizen gemittelt.

4.2.4.3 Verarbeitung der EKP Daten

Die Daten wurden wie die Verhaltensdaten innerhalb der Aufgabe getrennt nach den vier verschiedenen Reizen gemittelt.

Die Daten der P3b wurden über S2 gemittelt. Die mittlere Anzahl der berücksichtigten Durchgänge für den seltenen S1 betrug 43, mit einem Minimum von 25. Die Zeiträume der S1-evozierten P3b und der S2-evozierten Negativität sind dieselben wie im zweiten Experiment.

4.2.4.4 Statistische Analyse

Die Faktoren der ANOVA waren die gleichen wie im zweiten Experiment. Der Aufgabenfaktor hatte hier ebenfalls vier Stufen. Allerdings wurde sein Effekt in diesem Experiment signifikant. Die a-priori Hypothesen wurden deshalb durch weitere ANOVAs nachgetestet.

4.3 ERGEBNISSE

4.3.1 S1-evozierte P3b

Die gemittelten Potentiale, die vom häufigen und seltenen S1 ausgelöst wurden, sind in den Abbn. 12a und b dargestellt. Der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 war an der Elektrodenposition Pz am größten (Ableitungsort: $F_{6,66} = 17.6$, $p < .001$) und unterschied sich zwischen den Aufgaben (Haupteffekt der Aufgabe: $F_{3,33} = 10.1$, $p < .001$; Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Ableitungsort: $F_{18,198} = 3.4$, $p = .02$).

Um diese Effekte genauer zu untersuchen, wurden die Aufgaben in weiteren ANOVAs paarweise miteinander verglichen. Wie zu erwarten, war der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 in der Oddball-Aufgabe größer als in der Kombinations-Aufgabe (Haupteffekt der Aufgabe in der ANOVA: Oddball- gegenüber Kombinations-Aufgabe: $F_{1,11} = 27.9$, $p = .001$). Von großem Interesse ist, dass der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 der zwei Go/No-Go Aufgaben zwischen den Oddball-Effekten der Oddball- und Kombinations-Aufgabe lag. Der Effekt war in den beiden Go/No-Go-Aufgaben kleiner als in der Oddball- und größer als in der Kombinations-Aufgabe (Haupteffekt der Aufgabe in der ANOVA: Oddball_Go/No-Go- gegenüber Oddball-Aufgabe: $F_{1,11} = 14.1$, $p = .003$; Kombination_Go/No-Go- gegenüber Oddball-Aufgabe: $F_{1,11} = 11.7$, $p = .006$; Oddball_Go/No-Go- gegenüber Kombinations-Aufgabe: $F_{1,11} = 14.1$, $p = .003$ und Kombination_Go/No-Go- gegenüber Kombinations-Aufgabe in Pz: Wechselwirkung Aufgaben und Ableitungsort: $F_{6,66} = 5.0$, $p = .02$, Aufgabeneffekt an Pz: $F_{1,11} = 6.4$, $p = .03$). Der Oddball-Effekt war zwischen den beiden No-Go-Aufgaben nicht signifikant verschieden (Oddball_Go/No-Go- gegenüber Kombination_Go/No-Go-Aufgabe: $F_{1,11} = 0.2$, n.s). Allerdings gab es Unterschiede in den Topografien (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Ableitungsort: $F_{6,66} = 3.7$, $p = .01$), hierbei waren die positiven Potentiale in der Oddball_Go/No mehr anterior als bei der Kombination_Go/No-Go-Aufgabe.

4.3.2 S2-evozierte Negativität

Die Potentiale der Oddball-Effekte auf die S2-evozierte Negativität sind in Abb. 12b dargestellt. Diese Negativität war an der Elektrodenposition FCz am größten, das topografische Profil unterschied sich nicht zwischen den Aufgaben (Ableitungsort: $F_{6,66} = 7.3$, $p = .008$, Wechselwirkung zwischen Ableitungsort und Aufgabe: $F_{18,198} = 1.4$, n.s). Allerdings unterschied sich die Negativität zwischen den Aufgaben signifikant voneinander (Haupteffekt der Aufgabe: $F_{3,33} = 8.7$, $p = .001$). Die Negativität war in der

Kombinations-Aufgabe am größten (Analysen, in der die Aufgabe mit den anderen drei paarweise verglichen wurde: $F_{1,11} \geq 15.3$, $p \leq .002$) und unterschied sich zwischen den anderen drei Aufgaben nicht signifikant ($F_{1,11} \leq 0.5$, $p \geq .49$).

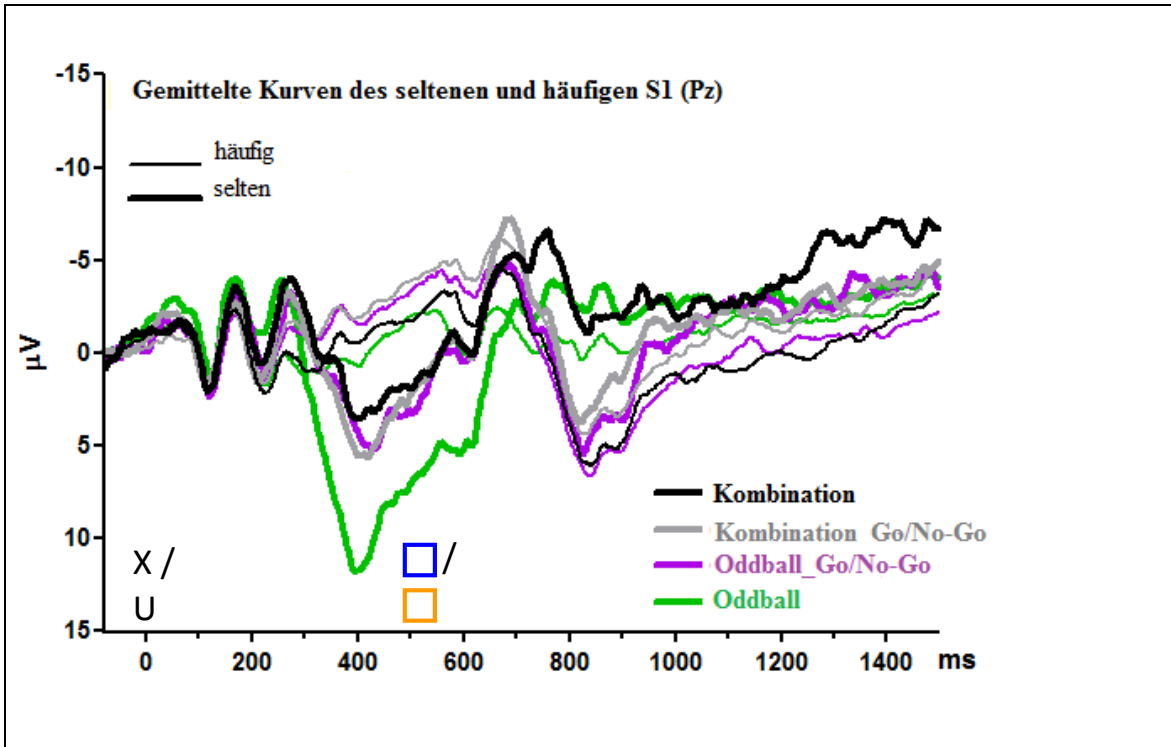


Abbildung 12a:

Dargestellt sind die gemittelten Potentiale, die vom seltenen und häufigen S1 ausgelöst wurden, in der jeweiligen Aufgabe des dritten Experiments in der Elektrodenposition Pz. Auf der X-Achse ist die Zeit in ms und auf der Y-Achse der Ausschlag der Potentiale in μV angegeben. S1 (X und U) wird im Zeitraum von 0 bis 200 ms und S2 (gelber und blauer Farbrahmen) im Zeitraum von 500 bis 700 ms präsentiert. Die Daten der Oddball-Aufgabe werden durch grüne Linien gekennzeichnet, die der Oddball_Go/No-Go durch lila Linien, die der Kombination_Go/No-Go durch graue Linien und die der Kombinations-Aufgabe durch schwarze Linien. Die Daten wurden separiert für den seltenen (alle dicken Linien) und den häufigen (alle dünnen Linien) S1 dargestellt.

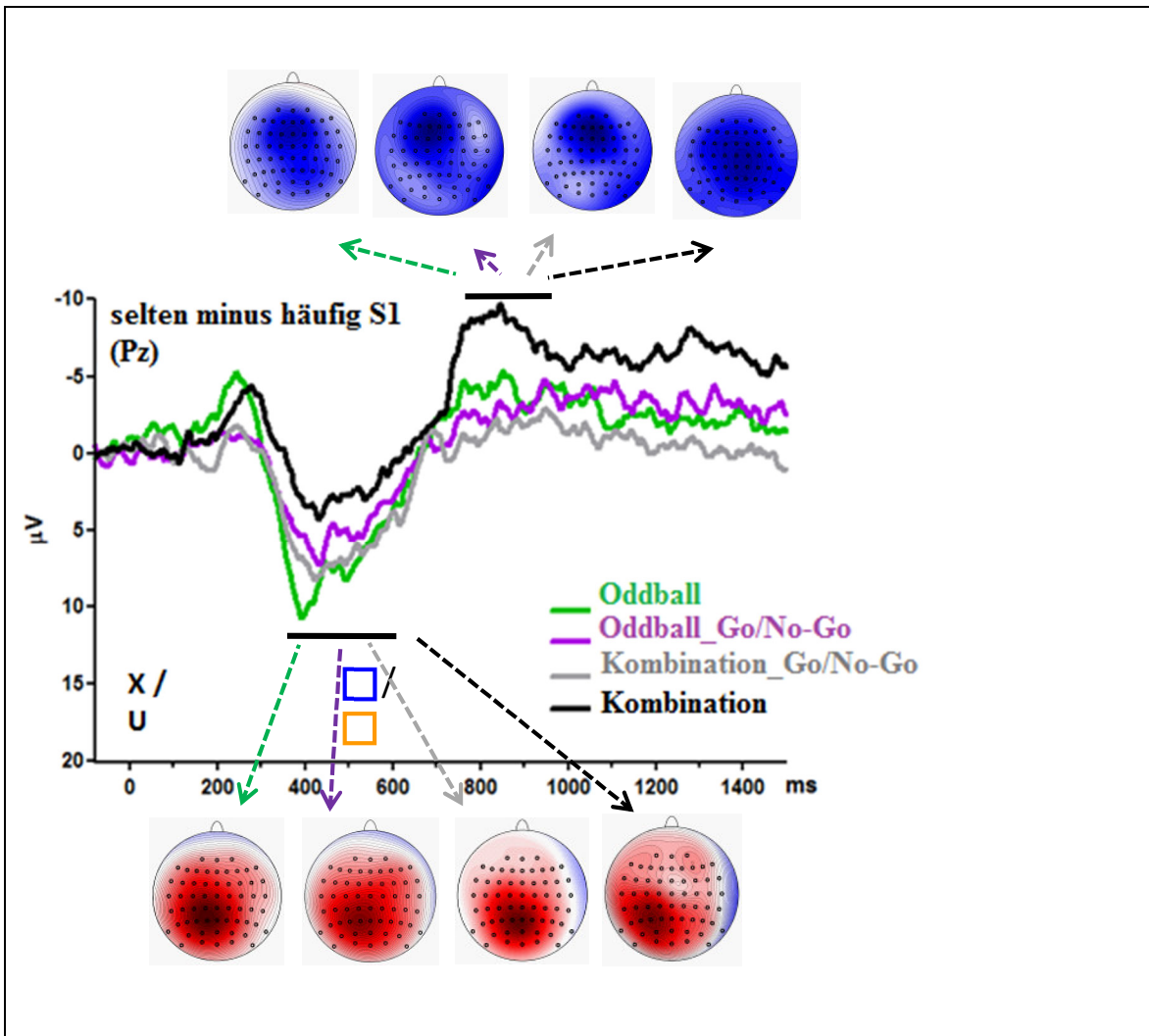


Abbildung 12b:

Dargestellt sind in dieser Grafik die gemittelten Potentiale vom S1 seltenen und häufigen S1, wobei die Potentiale der häufigen von den seltenen Reizen (S1) der jeweiligen Aufgaben des dritten Experiments subtrahiert wurden. Die Einteilung der X- und Y-Achse sowie die farbliche Zuordnung ist dieselbe wie in der Grafik davor. Die topographischen Unterschiede der verschiedenen Maxima der gemittelten Potentiale befinden sich 350-600 ms nach S1 (positiv) und 250-450 ms nach S2 (negativ). Die Lokalisation der Maxima wird durch die abgebildeten Köpfe verdeutlicht (Sicht von oben auf den Kopf), wobei Rot für eine positive und Blau für eine negative Polarität steht. Die verschiedenfarbigen Pfeile zeigen die Zuordnung zu der jeweiligen Aufgabe an.

4.3.3 Reaktionszeit und Fehlerquote

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten (RZ) und Fehlerquoten (FQ) sind in der Abb. 13 zu sehen

4.3.3.1 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit unterschied sich zwischen den Aufgaben (Haupteffekt der Aufgabe: $F_{3,33} = 51.3$, $p < .001$). Sie war in der Oddball-Aufgabe am schnellsten (Haupteffekt der Aufgabe in ANOVAs, in denen Aufgaben paarweise verglichen wurden: Oddball-Aufgabe gegenüber den drei anderen Aufgaben: $F_{1,11} \geq 51.3$, $p < .001$), in der Kombinations-Aufgabe am langsamsten (Kombinations-Aufgabe gegenüber den drei anderen Aufgaben: $F_{1,11} \geq 28.0$, $p < .001$) und unterschied sich nicht zwischen beiden Go/No-Go Aufgaben (Oddball_Go/No-Go gegenüber Kombination_Go/No-Go: $F_{1,11} = 0.6$, n. s.), die mit ihrer Reaktionszeit zwischen den anderen beiden Aufgaben lagen.

Die Antworten waren langsamer, wenn S1 selten war (Häufigkeit (S1): $F_{1,11} = 58.1$, $p < .001$). Dieser Häufigkeitseffekt unterschied sich zwischen den Aufgaben (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Häufigkeitseffekt S1: $F_{3,33} = 24.8$, $p < .001$). Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurden die Daten der häufigen von den seltenen Reizen (S1) einer jede Aufgabe subtrahiert. Die Oddball-Effekte auf die Reaktionszeit wurden gegenüber Null und paarweise zwischen den Aufgaben durch den t-Test verglichen. Alle Oddball-Effekte unterschieden sich von Null: 16 ms in der Oddball-Aufgabe ($p = .03$), 33 ms und 39 ms in der Oddball_Go/No-Go- und in der Kombination_Go/No-Go Aufgabe ($p = .004$ und $p < .001$) und 174 ms in der Kombinations-Aufgabe ($p < .001$). Der Effekt war am größten in der Kombinations-Aufgabe (Kombination-Aufgabe gegenüber den anderen drei Aufgaben: $p \leq .001$) und am kleinsten in der Oddball-Aufgabe (Oddball-Aufgabe gegenüber der Kombinations- und Kombinations-Go/No-Go-Aufgabe: $p \leq .007$). Die Oddball-Aufgabe unterschied sich nicht signifikant von der Oddball_Go/No-Go-Aufgabe ($p = .13$), diese wiederum unterschied sich nicht signifikant von der Kombination_Go/No-Go-Aufgabe ($p = .55$).

4.3.3.2 Fehlerquote

Die Fehlerquote unterschied sich zwischen den Aufgaben (Haupteffekt der Aufgabe: $F_{3,33} = 16.3$, $p = .001$). Sie war am höchsten in der Kombinations-Aufgabe (Haupteffekt der Aufgaben in paarweiser Analyse: Kombinations-Aufgabe gegenüber den anderen drei Aufgaben: $F_{1,11} \geq 16.6$, $p \leq .002$) und unterschied sich nicht zwischen den anderen drei Aufgaben ($F_{1,11} \leq 3.6$, $p \geq .09$). Es wurden mehr Fehler bei dem seltenen als bei dem häufigen S1 gemacht (Haupteffekt der Häufigkeit: $F_{1,11} = 14.0$, $p = .003$). Dieser Effekt unterschied sich zwischen den Aufgaben (Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Häufigkeit: $F_{3,33} = 16.3$, $p = .001$). Deshalb wurde, wie auch bei der Reaktionszeit beschrieben, der Effekt weiter durch den t-Test untersucht. Der Oddball-Effekt auf die Fehlerquoten unterschied sich nur in der Kombinations-Aufgabe von Null (15%, $p = .002$) und war somit größer als in den anderen drei Aufgaben ($p \leq .002$), welche sich weder von Null ($p \geq .08$) noch voneinander unterschieden ($p \geq .10$).

Die Fehlerquote in den No-Go-Durchgängen (gedrückte Tasten als fehlerhafte Reaktion; grau gestrichelte Linien in Abb. 13) war beim seltenen S1 höher als beim häufigen (Häufigkeitsfaktor: $F_{1,11} = 10.6$, $p = .008$), ohne dass sie sich zwischen den Aufgaben unterschied (Haupteffekt der Aufgabe und Wechselwirkung zwischen Aufgabe und Häufigkeit $F_{3,33} < 1.6$, $p > .23$, n. s.).

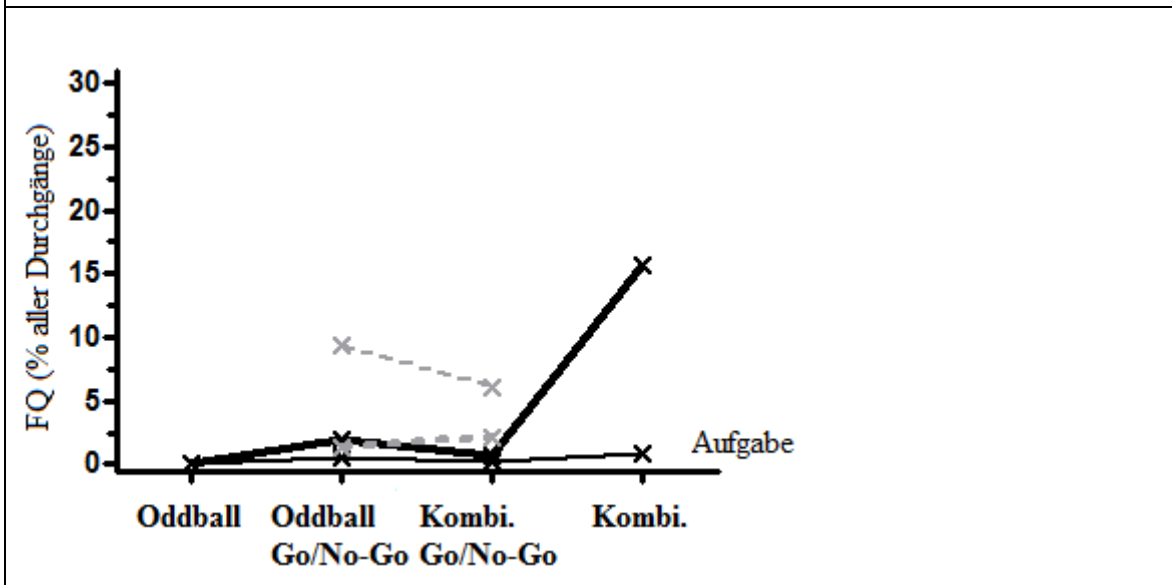
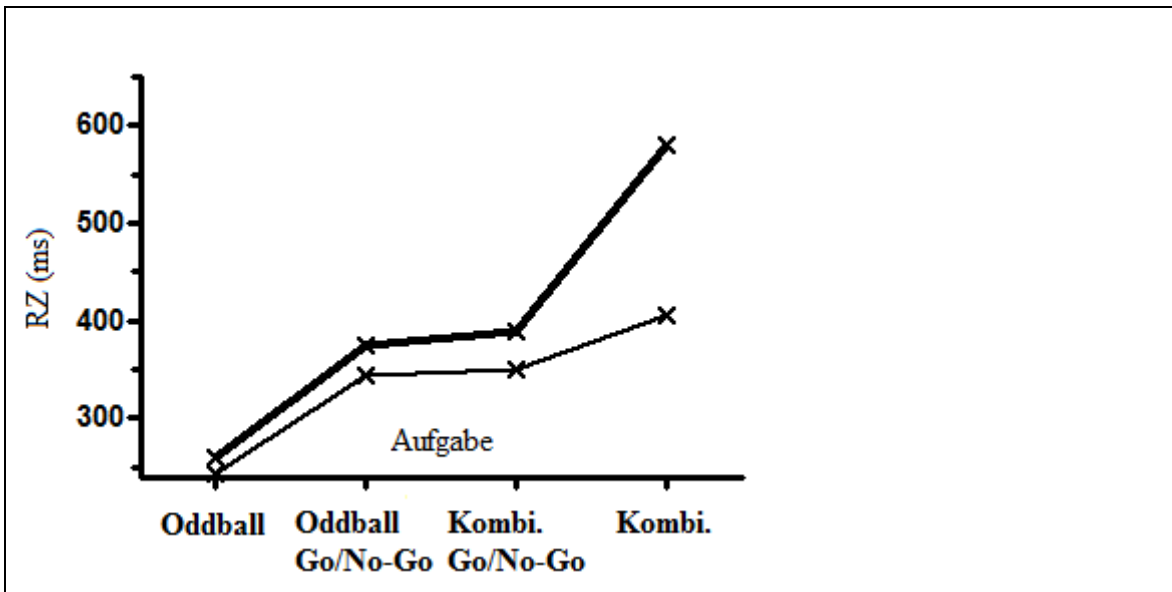


Abbildung 13: In der oberen Grafik sind die mittleren Reaktionszeiten und in der unteren Grafik die mittleren Fehlerquoten des dritten Experiments dargestellt. Auf der X-Achse sind die Aufgaben des Experiments und auf der Y-Achse die Reaktionszeit in ms, bzw. die Fehlerquote in Prozent angegeben. Dicke und dünne Linien unterscheiden zwischen seltenem (dick) und häufigem (dünn) S1. Die grau gestrichelten Linien in der Grafik, welche die Fehlerquoten darstellt, stellen die Fehlerrate in den No-Go Durchgängen dar (das bedeutet, in diesen Durchgängen wurde fälschlicherweise gedrückt); dabei steht die dünne grau gestrichelte Linie für den häufigen und die dicke für den seltenen S1.

Schwarz dick: selten S1, blau (häufig) S2

Schwarz dünn: häufig S1 blau (häufig) S2

Grau dick: selten S1 in den No-Go Durchgängen

Grau dünn: häufig S1 in den No-Go Durchgängen

4.4 DISKUSSION

Dieses Experiment konnte erfolgreich einen Oddball-Effekt herstellen, der zwischen dem großen Effekt der Oddball-Aufgabe und dem kleinen Effekt der Kombinations-Aufgabe lag. Mit diesem Resultat wird sich im Folgenden die Allgemeine Diskussion befassen.

Außer diesem Ergebnis wurde festgestellt, dass sich die beiden Versionen der Go/No-Go Aufgaben in den anterioren Anteilen der Topografie ihrer P3 Oddball-Effekte unterschieden (der Effekt war in der Oddball_Go/No-Go- mehr anterior lokalisiert als in der Kombination_Go/No-Go-Aufgabe).

Man könnte vermuten, dass eine verstärkte anteriore Lokalisation von P3-Amplituden eher durch einen No-Go als durch einen Go Stimulus hervorgerufen werden, wie es z. B. in den Arbeiten von Pfefferbaum et al. 1985 oder Verleger et al. 2006 beschrieben wird. Allerdings wurde in unserem Experiment der No-Go Stimulus durch S2 und nicht durch den seltenen S1 bestimmt, wie es in den genannten Arbeiten der Fall war.

Eine andere Idee wäre, die Topografien der Go/No-Go-Aufgaben mit einer anderen zu vergleichen, z. B. mit der Topografie des Oddball-Effekts auf die P3 der Oddball-Aufgabe. Allerdings sind die Potentiale der Oddball-Effekte auf die P3 der drei Aufgaben sehr unterschiedlich, sodass ein Vergleich nur möglich wäre, wenn man die Amplituden durch eine Normalisierungs-Prozedur angleichen könnte. Diese wird jedoch kritisiert (Urbach und Kutas 2006). Somit bleibt es unklar, was der Grund für diese veränderten Topografien in Reaktion auf S1 war.

ALLGEMEINE DISKUSSION

In den Versuchen von Verleger (2014 [1] und [2]) wurde die S-R Link Hypothese vorgeschlagen, welche davon ausgeht, dass die P3b die Aktivierung von etablierten, aber zurzeit nicht aktiven S-R Links widerspiegelt. Es wurde angenommen dass in der Oddball-Aufgabe der häufige S-R Link (z. B. S1 ist X und fordert eine Reaktion mit links) keine Reaktivierung benötigt, weil dieser S-R Link sowieso die meiste Zeit benutzt wird und deshalb immer in einem aktiven Zustand ist. Im Gegensatz dazu wird der seltene S-R Link (z. B. S1 ist U und fordert eine Reaktion mit rechts) nicht die meiste Zeit benutzt und ist deshalb in einem nicht aktiven Zustand, weshalb dieser eine Reaktivierung benötigt, wenn der seltene Stimulus (S1) präsentiert wird. Diese Reaktivierung wird durch die P3b angezeigt, weshalb bei dem seltenen Link eine große P3 und bei dem häufigen Link keine P3 zu sehen ist.

Dieses Ergebnis konnte durch die Versuche in dieser Studie repliziert werden. In den Versionen der Oddball-Aufgabe im ersten und dritten Experiment (siehe Tbl. 4 und 7) gab es im Gegensatz zu der Standard Oddball-Aufgabe (siehe Tbl. 2) noch einen zweiten Reiz, der als Go Signal fungierte. Es konnte somit zwar nicht direkt auf S1 reagiert werden, da aber S2 immer als Go-Signal fungierte und sich nicht veränderte, konnten die Versuchspersonen sicher sein, dass sie nach S2 immer die Antwort auf S1 eingeben konnten. Deshalb macht es Sinn, dass bereits bei der Wahrnehmung von S1 der S-R Link (zwischen S1 und der Antwort) aktiviert wurde. Somit kann man annehmen, dass dies die Erklärung dafür ist, warum in den Oddball-Aufgaben bei dem seltenen Link eine große P3 evoziert wurde.

Bei den Go/No-Go Aufgaben ist die Situation etwas anders, da S2 sowohl als Start (Go) als auch als Stopp Signal (No-Go) fungiert. Somit kann sich die Versuchsperson nicht sicher sein, ob in der vorliegenden Aufgabe die Antwort auf S1 ausgeführt werden soll (Go) oder nicht (No-Go). Deshalb kann hier durch die Wahrnehmung von S1 keine vollständige Aktivierung stattfinden (beim seltenen Link) oder vorhanden sein (beim häufigen Link), so wie es bei der Oddball-Aufgabe der Fall ist. Jedoch könnte durch S1 eine Vor-Aktivierung der S-R Links stattfinden, wie es in der Arbeit von Verleger et al. (2006) diskutiert wird. Dieses mittlere Aktivierungs-Level könnte dann entweder durch ein „Go“-Signal (S2) aktiviert oder durch ein „No-Go“-Signal (S2) deaktiviert werden. Dieses Szenario passt zu den Ergebnissen der Go/No-Go Aufgaben, bei denen die durch den seltenen Link evozierte P3 mittelgroß war. Für den häufigen Link der Go/No-Go Aufgaben ist keine Vor-Aktivierung

notwendig, da dieser Link häufig genutzt wird und daher immer in einem vor-aktiven Zustand ist. Deshalb gibt es hier, wie auch beim häufigen Link in der Oddball-Aufgabe, keine S1-evozierte P3. Bei den Go/No-Go Aufgaben gibt es auch eine durch S2-evozierte P3, denn nach einem Go Signal muss der S-R Link von dem vor-aktiven in einen voll-aktiven Zustand überführt werden, um eine Antwort ausführen zu können. Diese Differenz vom vor-aktiven zum voll-aktiven Stadium wird durch die S2-evozierte P3 reflektiert, weil diese vollständige Aktivierung nur durch S2 (als Go Signal) erreicht werden kann. Diese durch S2-evozierte P3 ist bei den Durchgängen mit dem seltenen und häufigen S1 gleich groß, weil für beide der vor-aktivierte Zustand in einen voll-aktivierten Zustand überführt werden muss (siehe Positivierung ab ca. 800 ms in der Grafik 12a). Nach dem No-Go Signal wird eine parietale P3b in ähnlichem Ausmaß wie bei den Go-Signalen und eine frontozentrale-Positivierung evoziert. Die P3b könnte, wie auch bei dem Go-Signal, eine Aktivierung der Bedeutung des vor-aktiven zum voll-aktiven S-R Link sein. Nun kann der Proband den Stimulus interpretieren und ihm eine Antwort zuordnen. Hier also z. B. gelber Rahmen bedeutet: „ich darf nicht drücken“. Die frontozentrale-Positivierung wird nur bei den No-Go Signalen beobachtet. Diese nogo-P3 kann man als Deaktivierung des vor-aktiven S-R Links interpretieren, da die Reaktion auf den Stimulus ausbleibt.

Auch in der Kombinations-Aufgabe werden S-R Links wahrscheinlich bereits durch die Wahrnehmung von S1 vor-aktiviert. Im Unterschied zu der Go/No-Go Aufgabe gibt es hier allerdings nicht mehr nur einen definierten S-R Link der vor-aktiviert werden kann, sondern zwei. In der Go/No-Go Aufgabe forderte z. B. X (häufiger S1) immer eine Reaktion mit links und U (seltener S1) eine Reaktion mit rechts. Deshalb gab es hier nur eine Antwortmöglichkeit für den häufigen bzw. seltenen S-R Link. In der Kombinations-Aufgabe kann durch X (S1) eine Reaktion mit rechts oder mit links gefordert werden, welches von der Kombination mit S2 abhängt: Z. B. fordert die Kombination X (S1) mit blauem Rahmen (S2) eine Reaktion mit links und X (S1) mit gelbem Rahmen (S2) eine Reaktion mit rechts.

Bei den häufigen S-R Links der Kombinations-Aufgabe mag es noch gelingen, dass diese in einem vor-aktivierten Zustand vorliegen, was auch dadurch angezeigt wird, dass durch S1 keine P3 evoziert wurde. Aber bei den seltenen S-R Links der Kombinations-Aufgabe wird hier wahrscheinlich die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses erreicht, da es zu schwierig ist vier verschiedene S-R Links im Arbeitsgedächtnis zu behalten. Das ist wahrscheinlich auch der Grund warum die S1-evozierte P3 der seltenen S1 in der Kombinations-Aufgabe kleiner ist als in der Go/No-Go Aufgabe.

Die häufigen S-R Links werden, ebenso wie die in der Go/No-Go Aufgabe, leicht durch S2 voll-aktiviert.

Im Gegensatz dazu können die nicht vor-aktivierten seltenen S-R Links der Kombinations-Aufgabe nicht einfach durch S2 voll-aktiviert werden, sondern müssen erst neu zusammengesetzt werden. Dies wird durch die S2-evozierte Negativität angezeigt, welche größer wird, je schwieriger die Kombination von S1, S2 und der Antwort ist.

All diese Überlegungen untermauern die S-R Link Hypothese, da sich die Ergebnisse durch sie erklären lassen. Betrachten wir noch einmal alternative Theorien der P3b und überprüfen sie auf die uns nun vorliegenden Ergebnisse:

Auf der einen Seite wurde die P3 verstanden als Reflektion der Reizverarbeitung. Die bedeutsamste These war hierbei die Context Updating Hypothese (Donchin 1981, Donchin und Coles 1988, Kamp et al. 2013) (genaueres siehe Einleitung). Diese kann auf der einen Seite sicherlich den Oddball-Effekt in der einfachen Oddball-Aufgabe erklären, denn ein unerwarteter Reiz (seltener Stimulus) evoziert hier eine große P3b. Auf der anderen Seite behauptet sie jedoch, dass die P3 nur durch die Reizbewertung, nicht aber durch einen Prozess der an der Antwortauswahl auf den aktuellen Stimulus beteiligt ist, beeinflusst wird. Folgt man dieser Logik, so ist es ziemlich schwierig, die Ergebnisse des dritten Experiments zu erklären, in dem sich der Oddball-Effekt auf die P3b je nach Wichtigkeit von S1 in Abhängigkeit von S2 verändert. Nach der Context Updating Hypothese und ähnlichen Theorien, wie z. B. der Template Updating Theorie (Gonsalvez et al. 2007, Steiner et al. 2013) würde der Oddball-Effekt auf die P3b immer gleich groß sein, unbeeinflusst davon, wie auf den S1 zu reagieren sein würde.

Auf der anderen Seite wurde die P3b als Teil eines Prozesses zwischen Stimulus und Antwort verstanden, wie z. B. in der Decision Making (Entscheidungs-Findungs-) Hypothese (Kelly und O'Connell 2013). Auch sie kann leicht den Oddball-Effekt in der einfachen Oddball-Aufgabe erklären, indem sie behauptet, dass leichte Entscheidungen (bei seltenen Oddball-Stimuli) von größeren P3-Amplituden begleitet werden als einfaches Abwarten (bei häufigen Stimuli). Wenn man so weiter denkt, dann müssten schwierigere Entscheidungen eine größere P3 hervorrufen als die leichten. In den Experimenten dieser Studie haben jedoch wirklich schwere Entscheidungen (z. B. in den Kombinations-Aufgaben) nur sehr kleine P3s hervorgerufen. Größer wurde hierbei eher die S2-evozierte Negativität.

Ebenfalls mit der Wahrnehmung von Stimuli beschäftigt sich die Consciousness (Bewusstseins-) Hypothese (Dehaene, Sergent und Changeux 2003). Sie besagt, dass die Fähigkeit Stimuli wiederzugeben sinkt, wenn es sich um zwei aufeinander folgende Stimuli handelt. Es wäre so, als würde die Aufmerksamkeit kurz aussetzen. Während dieser Aussetzer evoziert der zweite Stimulus keine P3 mehr. Die Studie bezog sich allerdings nicht auf die einfache Oddball-Aufgabe und es ist zu bezweifeln, dass die beiden Stimuli (häufiger und seltener Reiz) unterschiedlich bewusst wahrgenommen werden, was laut dieser Hypothese der Fall sein müsste, da sich die P3b-Amplituden stark voneinander unterscheiden. Ebenfalls müsste der seltene Stimulus der Oddball-Aufgabe bewusster wahrgenommen werden als der seltene Stimulus der Kombinations-Aufgabe und die bewusste Wahrnehmung der seltenen Stimuli der Go/No-Go-Aufgaben müsste dazwischen liegen.

Es scheint, dass diese alternativen Hypothesen sich bis jetzt nicht eignen, um die Daten dieser Studie zu erklären. Sie benötigen hierfür noch einen Feinschliff, um sie auf diese komplexen Aufgaben anwenden zu können.

Die S-R Link Hypothese scheint hier schon spezifizierter zu sein. Trotzdem bleiben weiterhin viele Fragen offen, z. B. in wie weit und ob generell die seltenen Stimuli in der Kombinations-Aufgabe vor-aktiviert werden können oder ob durch das No-Go-Signal des zweiten Stimulus der S-R Link von einem vor-aktivierten in einen inaktiven Zustand kommt oder vielleicht vor-aktiviert bleibt. Dies könnten weitere Studien zeigen.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Oddball-Paradigma ist ein experimentelles Design, das in der Forschung von ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) angewendet wird. Bei dem Experiment sollen Versuchspersonen auf häufige und seltene Reize (in unseren Versuchen visuelle) adäquat reagieren (in unseren Versuchen durch Drücken einer dem Stimulus zugeordneten Taste auf einer Computertastatur). Es wurde festgestellt, dass ca. 300 ms nach den Präsentationen der seltenen Stimuli jeweils eine große parietale Positivierung (P3b) im abgeleiteten EEG evoziert wurde. Dieser unterschiedliche Effekt seltener gegen häufige Stimuli auf die P3b wird Oddball-Effekt genannt.

In der kürzlich veröffentlichten Studie von Verleger et al. (2014 [b]) wurde berichtet, dass der Oddball-Effekt auf die P3b erheblich reduziert werden kann, wenn zwei Stimuli, "S1" und "S2" miteinander kombiniert werden müssen, um eine Entscheidung für die Auswahl der adäquaten Reaktion auf S1 zu treffen. Die hier vorliegende Studie zielte darauf ab zu klären, welcher Aspekt der Kombinations-Aufgabe aus der Studie von Verleger et al. (2014 [b]) dafür verantwortlich war.

Das erste Experiment unserer Studie überprüfte die Hypothese, ob der verantwortliche Faktor die fehlende Assoziation zwischen dem S1 und der Antwort war. Doch obwohl in der Aufgabe Kombi_80 durch Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von S2 eine gute Assoziation zwischen S1 und der Antwort geschaffen werden konnte, war der Oddball-Effekt genauso reduziert wie in der ursprünglichen Kombinations-Aufgabe.

Das zweite Experiment überprüfte die Hypothese, ob der entscheidende Faktor die Komplexität der Zuordnung der Antwort zum Stimulus war. Aber weniger komplexe Stimulus-Reaktions-Verbindungen ergaben eine gleich große Reduzierung des Oddball-Effekts auf die P3 wie in der ursprünglichen Kombinations-Aufgabe.

Das dritte Experiment überprüfte die Hypothese, ob der bestimmende Faktor für die Reduzierung des Oddball-Effekts die erhöhte Relevanz von S2 war. Tatsächlich war es so, wenn S2 nur als „go“- oder „no-go“-Signal fungierte, dass der Oddball-Effekt auf die P3 zwischen dem stark reduzierten Oddball-Effekt der Kombinations-Aufgabe und dem großen Oddball-Effekt der Oddball-Aufgabe lag.

Folglich scheint es, dass der Oddball-Effekt auf die S1-evozierte P3 mit der Wichtigkeit von S1 relativ zu S2 bei der Definierung der Antwort im Zusammenhang steht: Dieser Effekt ist groß, wenn Antworten vollständig durch S1 bestimmt werden, aber wird immer kleiner, je mehr Relevanz S2 erhält.

Literaturverzeichnis

- Callaway, E. (1983):** *The pharmacology of human information processing.* Psychophysiology, 20:359-370.
- Chatrian G.E., Lettich E., Nelson P.L. (1985):** *Ten percent electrode system for topographic studies of spontaneous and evoked EEG activity.* American journal of EEG Technology, 25:83-92.
- Compston A. (2010):** *From the Archives: The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes of man, by Adrian E. and Matthews B. (1934), Brain 57:355-387.* Brain 133:3- 66.
- Berger H. (1929):** *Über das Elektroenzephalogramm des Menschen.* Aus: Lücking H. (2004): *Über das Elektroenzephalogramm des Menschen.* Deutsche Gesellschaft für Klinische Neurophysiologie: 41-84.
- Bernard J., Réthoré J., Kelemen J., Castillo J., Withalm G. (2004):** *Das EEG als Zeichensystem.* Institute for Socio-Semiotic Studies (Wien), 16-1: 12-15.
- Birbaumer N., Schmidt R. (2010):** *Biologische Psychologie.* Springer, 7:478-483.
- Debener S., Makeig S., Delorme A., Engel A.K. (2005):** *What is novel in the novelty oddball paradigm? Functional significance of the novelty P3 event-related potential as revealed by independent component analysis.* Cognitive Brain Research, 22:309-321.
- Dehaene S., Sergent C. and Changeux J. P. (2003):** *A neuronal network model linking subjective reports and objective physiological data during conscious perception.* Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A., 100:8520–8525.
- Dien J., Spencer K.M., Donchin E. (2004):** *Parsing the late positive complex: Mental chronometry and the ERP components that inhabit the neighborhood of the P300.* Psychophysiology, 41:665-678.
- Dochin E. und Coles M.G.H. (1988):** *Ist he P300 component a manifestation of context updating?* Behavioral and Brain Sciences, 11:357-374.
- Dochin E. (1981):** *Surprise! ... Surprise?.* Psychophysiology, 18-5:493-513.
- Duncan C.C., Barry R.J., Connolly J.F., Fischer C., Michie P.T., Näätänen 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.* Clinical Neurophysiology, 120: 1883-1908.

- Duncan-Johnson C.C., Donchin E. (1977):** *On quantifying surprise: The variation of event-related potentials with subjective probability.* *Psychophysiology*, 14:456-467.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J. und Hoormann, J. (1994):** Time pressure effects on late components of the event-related potential. *Journal of Psychophysiology*, 8:22-30.
- Gaeta H., Friedman D., Hunt G. (2003):** *Stimulus characteristics and task category dissociate the anterior and posterior aspects of novelty P3.* *Psychophysiology*, 4:198-208.
- Gonsalvez C.J., Barry R.J., Rushby J.A., Polich J. (2007):** *Target-to-target interval, intensity and P300 from an auditory single-stimulus task.* *Psychophysiology*, 44: 245-250.
- Hillyard S.A., Kutas M. (1983):** *Electrophysiology of cognitive processing.* *Annual Review of Psychology*, 34: 33-61.
- Jasper H.H. (1958):** *The ten-twenty electrode system of the International Federation.* *Electroencephalography and clinical neurophysiology*.10:371–375.
- Johnson, R., Jr. und Donchin, E. (1980):** P300 and stimulus categorization: Two plus one is not so different from one plus one. *Psychophysiology*, 17:167-178.
- Kamp S.-M., Brumback T., Donchin E. (2013):** *The component structure of ERP subsequent memory effects in the Von Restorff paradigm and the word frequency effect in recall.* *Psychophysiology*, 50:1079-1093.
- Kelly S.P. und O'Connell R.G. (2013):** Internal and external influences on the rate of sensory evidence accumulation in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, 33:19434-19441.
- Kopp B., Lange F. (2013):** *Electrophysiological indicators of surprise and entropy in dynamic task-switching environments.* *Frontiers in Human Neuroscience*, 7: 300.
- Maurer K., Lang N., Eckert J. (2005):** *Praxis der evozierten Potentiale.* Steinkopff Verlag (Darmstadt) 2:119, 252.
- Minow F., Svojanovsky A. (o.J.) (2014):** *Easycap, EEG Recording Caps and Related Products, 74-Channel Electrode Arrangement of EC80 (Montage No. 1).* Die graue Markierung, sowie die Zahlen 5 und 6 bei FC5 und FC6 wurden nachträglich zur Grafik ergänzt.
- Neundörfer B. (2002):** *EEG-Fibel, Das EEG in der ärztlichen Praxis.* Urban und Fischer Verlag (München, Jena), 5:1.

- Nieuwenhuis S., Aston-Jones G., Cohen J.D. (2005):** *Decision making, the P3, and the locus coeruleus norepinephrine system.* Psychological Bulletin, 131:510-532.
- O'Connell R.G., Dockree P.M., Kelly S.P. (2012):** *A supramodal accumulation-to-bound signal that determines perceptual decisions in humans.* Nature Neuroscience, 15 :1729-1735.
- Oldfield R. (1971):** *The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory.* Neuropsychologia, 9:97-113.
- Oostenveld R., Praamstra P. (2001):** *The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements.* Clinical Neurophysiology, 112: 713-719
- Petsche H. (1970):** *EEG und bioelektrische Hirntätigkeit.* EEG-EMG, 1:125-133.
- Poli R., Cini C., Citi L., Sepulveda F. (2010) :** *Reaction-time binning: A simple method for increasing the resolving power of ERP averages.* Psychophysiology, 47:467-485.
- Polich J. (2007):** *Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b.* Clinical Neurophysiology, 118: 2128-2148.
- Schandy R. (2003):** *Biologische Psychologie.* Beltz PVU. Weinheim – Basel – Berlin, 3:565-569.
- Seifert J. (2005):** *Ereigniskorrelierte EEG-Aktivität.* Pabst Science Publishers. Lengerich, 5:32-33.
- Spillane J. (1974):** *A Memorable Decade in the History of Neurology 1874-84 -II.* British Medical Journal, 4:757-759.
- Steiner G.Z., Brennan M.L., Gonsalvez C.J., Barry R.J. (2013):** *Comparing P300 modulations: Target-to-target interval versus infrequent nontarget-to-nontarget interval in a three-stimulus task.* Psychophysiology, 50: 187-194.
- Squires N.K., Squires K.C., Hillyard S.A. (1975):** *Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man.* Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 38:387-401.
- Trepel M. (2008):** *Neuroanatomie, Struktur und Funktion.* Elsevir (München), 4: 240-243.
- Verleger R., Metzner M.F., Ouyang G., Śmigasiwicz K., Zhou C. (2014 [a]):** *Testing the stimulus-to-response bridging function of the oddball-P3 by delayed response signals and residual iteration decomposition (RIDE).* NeuroImage, 100:271-280.

- Verleger R. Baur N., Metzner M.F., Śmigasiewicz K. (2014 [b]):** *The hard oddball: effects of difficult response selection on stimulus-related P3 and on response-related negative potentials.* *Psychophysiology*, 51:1089-1100
- Verleger R., Jaśkowski P., Wascher E. (2005):** *Evidence for an integrative role of P3b in linking reaction to perception.* *Journal of Psychophysiology*, 19: 165-181.
- Verleger R. (1997):** *On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry.* *Psychophysiology*, 34: 131-156.
- Verleger R. (1988):** *Event-related potentials and cognition: A critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of P3.* *Behavioral and Brain Sciences*, 11: 343-356.
- Zschocke S. (2002):** *Klinische Elektroenzephalographie.* Springer (Berlin, Heidelberg), 2:539- 46

Anhang: Ethikantrag



Universität zu Lübeck

Medizinische Fakultät - Der Vorsitzende der Ethikkommission

Dekanat der Medizinischen Fakultät der Universität zu Lübeck
Ratzeburger Allee 160, D-23538 Lübeck

Herrn
Prof. Dr. med. Verleger
Klinik für Neurologie

Bearbeiter: Frau Erdmann
Telefon: (0451) 500- 4639
Fax: (0451) 500- 3026
email: erdmann@zuv.uni-luebeck.de

im Hause

Datum: 21.03.2005

Aktenzeichen:
(immer angeben!) 05-043

nachrichtlich:
Herr Prof. Kömpf
Direktor der Klinik für Neurologie

Sitzung der Ethik-Kommission am 15. März 2005
Antragsteller: Herr Prof. Verleger / Herr Prof. Kömpf
Titel: EEG-Potentiale bei PINK I

Sehr geehrter Herr Prof. Verleger,

der Antrag wurde unter berufsethischen, medizinisch-wissenschaftlichen und berufsrechtlichen Gesichtspunkten geprüft.


Die Kommission hat nach folgenden Ergänzungen keine Bedenken: Die Aufklärung ist laienverständlich zu formulieren. Das Wort „anonymisiert“ ist durch „pseudonymisiert“ zu ersetzen. Unter Punkt 3.1 ist das Kreuz bei „Medizin-Geräte-Verordnung“ ersatzlos zu streichen, da es sich hier nicht um eine Medizinprodukte-Studie handelt. Zukünftig werden Studien bei gleichem Protokoll als Studierweiterung von der Kommission akzeptiert. Solche Erweiterungen sind schriftlich anzuzeigen. Gibt es vom bisherigen Protokoll abweichende Interventionen oder Patienten-/Probandengruppen, ist ein neuer Ethik-Antrag zu stellen.

Bei Änderung des Studiendesigns sollte der Antrag erneut vorgelegt werden. Über alle schwerwiegenden oder unerwarteten und unerwünschten Ereignisse, die während der Studie auftreten, muß die Kommission umgehend benachrichtigt werden.

Nach Abschluß des Projektes bitte ich um Übersendung eines knappen Schlussberichtes (unter Angabe unseres Aktenzeichens), aus dem der Erfolg/Misserfolg der Studie sowie Angaben darüber, ob die Studie abgebrochen oder geändert bzw. ob Regressansprüche geltend gemacht wurden, ersichtlich sind.

Die ärztliche und juristische Verantwortung des Leiters der klinischen Prüfung und der an der Prüfung teilnehmenden Ärzte bleibt entsprechend der Beratungsfunktion der Ethikkommission durch unsere Stellungnahme unberührt.

Mit freundlichem Gruß und den besten Wünschen für den weiteren Verlauf Ihrer Forschung bin ich
Ihr


Prof. Dr. med. Lucas Wessel
Stellv. Vorsitzender

anwesende Kommissionsmitglieder:

Prof. Dr. Dr. H.-H. Raspe
(Sozialmedizin, Vorsitzender der EK)
 Prof. Dr. F. Hohagen
(Psychiatrie)
Prof. Dr. Dominiak
(Pharmakologie)

Frau H. Müller
(Pflege)
 Prof. Wessel
(Kinderchirurgie, Stellv. Vorsitzender der EK)
 Herr Fieber
(Richter am Landgericht Lübeck)
 Prof. Schwinger
(Humangenetik)

Herr Prof. Dr. H. L. Fehm
(Medizinische Klinik I)
 Frau Prof. Dr. M. Schrader
(Plastische Chirurgie)
 Herr Dr. Schultz
(Pädiatrie)
 Herr D. Stojan
(Präsident des Amtsgerichtes Lübeck)

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Thomas F. Münte, der mir die Möglichkeit gab, die Dissertation in seiner Abteilung anzufertigen und mir alle erforderlichen Mittel zur Verfügung stellte.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. phil. Rolf Verleger für die Themenstellung, die ausgezeichnete Betreuung, die überaus kompetente Unterstützung bei der Analyse der Ergebnisse und der immer sehr zeitnahen Beantwortung meiner Fragen bedanken.

Dr. Kamila Śmigasiewicz danke ich für die Einarbeitung und Unterstützung bei den Experimenten und der Erhebung der EEG-Daten, sowie für Ihre sehr hilfreichen Ratschläge. Ihr und Dr. Dariusz Asanowicz danke ich für die wertvollen Anregungen während meiner Arbeit.

Ein großer Dank gilt meinen Eltern und meinem Freund, die mich immer in meinen Vorhaben unterstützen.

Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN

Name, Vorname Hamann, Lin Marlana
Geburtsdatum, -ort 29.05.1987, Hamburg



SCHULAUSBILDUNG UND STUDIUM

02/2015 Manuskript: “Testing the S-R link hypothesis of P3b: The oddball Effect on S1-evoked P3 gets reduced by increased task relevance of S2” wurde vom Biological Psychology zur Veröffentlichung akzeptiert.

04 - 12/2014 Schriftliche Anfertigung der Dissertation

10/2013 – 02/2014 Experimente

10/2013 Staatsexamen, Universität zu Lübeck

08/2012 – 07/2013 Praktisches Jahr, in Schleswig-Holstein, Mexiko und China
Promos-Stipendium

09/2010 – 09/2011 Studienaufenthalt, Universidad de Murcia, Spanien
Erasmus-Stipendium

09/2009 Physikum, Universität zu Lübeck

10/2007 – 10/2013 Studium der Humanmedizin, Universität zu Lübeck

06/2007 Allgemeine Hochschulreife, Goethe-Schule-Harburg, Hamburg