

Aus der Universitätsklinik für Psychiatrie und Psychotherapie  
Tübingen

Abteilung Allgemeine Psychiatrie und Psychotherapie mit  
Poliklinik

**Frühe neuronale Signaturen von Leistungsfeedback  
innerhalb einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von**

**Ziegler, Lukas**

**2020**

Dekan:

Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter:

Professor Dr. C. Plewnia

2. Berichterstatter:

Professor Dr. M. Wilke

Tag der Disputation:

11.09.2020

Meinen Eltern, Großeltern  
und S.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	5
1.1	Feedback und dessen Nutzen zur Adaption zielgerichteten Verhaltens.....	5
1.2	Feedback als emotionaler Stimulus .....	6
1.3	Neuronale Signaturen auf die Präsentation von Feedback .....	7
1.3.1	Neurophysiologische Grundlagen .....	7
1.3.2	Elektroenzephalografie (EEG) .....	8
1.3.3	Ereigniskorrelierte Potentiale (ERP) .....	9
1.3.4	Komponente N1 .....	11
1.3.5	Komponente P2 .....	12
1.3.6	Die Rolle des Paced Auditory Serial Task (PASAT) .....	13
1.4	Ziele der Arbeit und Hypothesen .....	14
2	Material und Methoden .....	15
2.1	Stichprobe.....	15
2.2	Ethische Aspekte .....	16
2.3	Voruntersuchungen und Diagnostik.....	16
2.3.1	Anamnesebogen .....	16
2.3.2	Edinburgh Handedness Inventory (EHI) .....	16
2.3.3	Zahlen nachsprechen (ZNT) .....	17
2.3.4	Trail Making Test A/B (TMT-A/B).....	17
2.3.5	Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest (MWT-B).....	18
2.4	Die abhängigen Variablen.....	18
2.4.1	Subjektive Leistungseinschätzung (SLE).....	18
2.4.2	Paced Auditory Serial Task (PASAT).....	18
2.4.3	Aufzeichnung des EEG .....	21
2.5	Ablauf der Studie .....	23
2.5.1	Vorbereitung und Diagnostik.....	23
2.5.2	Erfassung der abhängigen Variablen.....	25
2.6	Datenverarbeitung und statistische Analyse.....	26
2.6.1	Elektrophysiologische Datenverarbeitung.....	26
2.6.2	Statistische Analyse .....	30
3	Ergebnisse.....	31
3.1	Deskription der Daten .....	31

3.1.1	Matheleistung.....	31
3.1.2	Neuropsychologische Fragebögen .....	31
3.1.3	PASAT-Leistung.....	31
3.2	Ergebnisse der abhängigen Variablen.....	32
3.2.1	Subjektive Leistungseinschätzung .....	32
3.2.2	Ereigniskorrelierte Potentiale im Überblick .....	34
3.2.3	Komponente N1 .....	37
3.2.4	Komponente P2 .....	40
4	Diskussion .....	43
4.1	Interpretation der deskriptiven Ergebnisse .....	43
4.2	Subjektive Leistungseinschätzung.....	44
4.3	Komponente N1 .....	45
4.4	Komponente P2 .....	48
4.5	Grenzen der Arbeit.....	50
4.6	Schlussfolgerung und Ausblick .....	54
5	Zusammenfassung .....	56
6	Literaturverzeichnis.....	58
7	Erklärungen zum Eigenanteil.....	64

## Abkürzungsverzeichnis

μV	Mikrovolt, Einheit der Stromspannung
Abb.	Abbildung
ACC	Anteriorer Cingulärer Kortex
bzw.	beziehungsweise
CCE	kognitive Kontrolle von Emotionen
dIPFC	Dorsolateraler Präfrontaler Kortex
EEG	Elektroenzephalografie oder Elektorenzephalogramm
EHI	Edinburgh Handedness Inventory
EKG	Elektrokardiogramm
EOG	Elektrookulografie
EPSP	Exzitatorisches postsynaptisches Potential
ERP	Event-Related Potential, Ereigniskorreliertes Potential, Ereigniskorrelierte Potentiale (Plural)
FB	Feedback
FBO	Kontrollbedingung Feedback only (nur Feedback)
fMRI	funktionaler Magnetresonanztomografie
FRN	Feedback-Related Negativity, ERP Komponente
GA	Grand Averages
HRV	Herzratenvariabilität
ICA	Independent Component Analysis
IPSP	Inhibitorisches postsynaptisches Potential
IQ	Intelligenzquotient
ISI	Interstimulusintervall
LPP	Late Positive Potential, ERP Komponente
ms	Milisekunden, Einheit der Zeit
MWT-B	Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest
noFB	Kontrollbedingung no Feedback (kein Feedback)
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
PASAT	Paced Auditory Serial Task
SLE	Subjektive Leistungseinschätzung

Tab.	Tabelle
tDCS	Transcranial Direct Current Stimulation
TMT-A/B	Trail Making Test A/B
z.B.	zum Beispiel
ZNT	Test Zahlen nachsprechen

## 1 Einleitung

Der Mensch als hoch entwickeltes Lebewesen nimmt stets, bewusst und unbewusst, Sinnesreize aus seiner Umwelt wahr. Reize mit emotionaler Bedeutung haben dabei einen starken Einfluss auf eine Vielzahl kognitiver Funktionen wie Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Erinnerung, Lernvermögen und Entscheidungsfindung (Dolan 2002). Als Anpassung und Schutz vor den Gefahren des Lebens hat sich eine besondere Sensibilität für negative Reize herausgebildet (Rozin & Royzman 2001), denn Negatives schnell wahrzunehmen und ebenso schnell darauf reagieren zu können, ist ein entscheidender Vorteil in der Evolution. Letztendlich muss dieser Hang zum Negativen jedoch gut reguliert und kontrolliert werden. Denn kognitive Ressourcen sollten gerade in fordernden Situationen für zielorientiertes Handeln zur Verfügung stehen und nicht von diesem durch eine zu starke Auseinandersetzung mit Negativem abgelenkt sein. Es gilt also eine gesunde Balance zu finden zwischen nützlicher und schädlicher Wirkung der erhöhten Aufmerksamkeit auf Negatives.

Die Idee dieser Arbeit ist, mehr Licht in das Dunkel der frühen Verarbeitung von emotional bedeutenden, ablenkenden Reizen zu bringen, indem zugrundeliegende Hirnaktivitäten untersucht werden sollen. Mit diesem Ziel werden mittels *Elektroenzephalografie* (EEG), während der Bearbeitung einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe in Abhängigkeit von der Präsentation eines emotional bedeutenden *Feedbacks* (FB), *Ereigniskorrelierte Potentiale* (ERP) erstellt und analysiert.

1.1 Feedback und dessen Nutzen zur Adaption zielgerichteten Verhaltens  
*Feedback* (FB), also die Rückmeldung über eine ausgeführte Handlung, während oder nach der Bearbeitung einer Aufgabe, ist ein entscheidender Faktor um Verhalten und Leistung entsprechend den gegebenen Anforderungen anpassen zu können (Locke u. a. 1981). FB ist relevant für das Erlernen und die Verbesserung bzw. die Adaption von zielgerichtetem Verhalten durch Rückversicherung und Bestätigung. Es hat jedoch während der Bearbeitung einer Aufgabe eine ablenkende, kognitiv und affektiv zusätzlich fordernde Komponente, welche sich nicht nur positiv auf die Leistung auswirkt (Kluger &



Denisi 1996). Kluger und Denisi zeigten in ihrer großen Meta-Analyse, dass in einem Drittel der Fälle sich FB negativ auf die Leistung auswirkte. Die FB-Präsentation kann durch Aufmerksamkeitsbindung und kognitive Verarbeitung der Information, als *Distraktor* und damit ablenkend wirken. Die Fähigkeit, sich auf aufgabenrelevante Stimuli zu fokussieren und aufgabenirrelevante Distraktoren zu unterdrücken, ist allerdings wichtig für die Anpassung des Menschen und zielorientiertem Verhalten (Lavie u. a. 2004). Der Einfluss und das Nutzen von FB auf Verhalten stellt sich folglich als komplexes und vielschichtiges Phänomen dar, welches noch immer nur zum Teil verstanden wird.

## 1.2 Feedback als emotionaler Stimulus

FB lässt sich qualitativ in positives und negatives FB einteilen. Vereinfacht enthält dieses dann die Information, ob eine Handlung richtig oder falsch war. Positives FB erzeugt dabei positive, negatives FB typischerweise negative Affekte. Es ist davon auszugehen, dass negatives FB im Vergleich zu positivem die Leistung stärker beeinflusst: in der psychologischen Forschung gibt es vielfach übereinstimmende Befunde, dass bei Tieren und Menschen ein *negativity bias* (Negativitätsverzerrung), also eine stärkere emotionale Distraction und Reaktion, hervorgerufen durch negative Reize, existiert (Rozin & Royzman 2001). Die Leistungsfähigkeit ist in diesem Fall eng gekoppelt mit der Fähigkeit der *kognitiven Kontrolle von Emotionen (CCE)*, welche wiederum von großer Bedeutung für die Anpassung des Menschen ist (Ochsner & Gross 2005). Eine hohe CCE kann den negativen Einfluss eines negativen Stimulus verringern (Jackson u. a. 2000), z.B. durch die Kontrolle der Aufmerksamkeit auf diesen Stimuli oder durch dessen kognitive Neubewertung.

Bei psychischen Krankheiten wie der Depression findet sich eine gesteigerte Tendenz hin zum Negativen und eine verminderte Fähigkeit der CCE, um emotionale, aufgabenirrelevante Information zu unterdrücken (Roiser u. a. 2012 zit. in Clark u. a. 2009; Goschke 2014). Dies wiederum hat negative Auswirkungen auf Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis, da für diese Leistungen weniger Ressourcen zur Verfügung stehen. Untersuchungen der Feedbackverarbeitung von depressiven im Vergleich zu gesunden Individuen konnten zeigen, dass Depressive stärker vom negativity bias betroffen sind. Dies

konnte anhand einer verminderten Leistung in der Aufgabe nach negativem FB, sowie an einem höher gemessenen ERP, der *error-related negativity*, gezeigt werden (Holmes & Pizzagalli 2008). Den negativity bias zu beeinflussen, ist ein vielversprechender Ansatzpunkt zur Therapie psychischer Erkrankungen. Sowohl pharmakologisch (Warren u. a. 2015) als auch durch interventionelle Verfahren wie der nichtinvasiven Hirnstimulation mittels Gleichstrom (tDCS) (Plewnia, Schroeder & Wolkenstein 2015; Wolkenstein u. a. 2014) konnte gezeigt werden, dass Einfluss auf dieses Phänomen genommen werden kann.

Die Präsentation von FB befindet sich im Spannungsfeld zwischen nützlicher Information und Repräsentation eines emotional konnotierten Distraktors. Um diese gegenläufigen und interindividuell verschieden stark ausgeprägten Effekte genauer verstehen zu können, ist es sinnvoll, die zugrundeliegenden neuronalen Mechanismen zu untersuchen.

### 1.3 Neuronale Signaturen auf die Präsentation von Feedback

FB wird als Stimulus über die Sinnesorgane, bzw. Nervenzellen des Menschen erfasst und im Gehirn verarbeitet. Um *neuronale* (die Nerven betreffende) Signaturen auf die Präsentation von FB untersuchen zu können, braucht man eine Messmethode, welche im Stande ist, die Aktivität der *Neuronen* (Nervenzellen) genau ab dem Moment der Präsentation des FB zu messen. Inwiefern sich EEG und ERP dafür eignen, wird im Folgenden beschrieben.

#### 1.3.1 Neurophysiologische Grundlagen

Die Weiterleitung und Verarbeitung von Informationen findet im Nervensystem durch ein komplexes Zusammenspiel von Botenstoffen und elektrischen Potentialveränderungen statt. Elektrische Aktivitäten von Neuronen können durch Ableitungselektroden gemessen werden, was der Psychiater Hans Berger erstmals am Menschen zeigte (Berger 1929). Er nannte diese Messung Elektrenkephalogramm, welche später in Elektroenzephalogramm umbenannt wurde. Anfangs ging man davon aus, dass die gemessenen Potentialschwankungen spontanen, synchronen Aktionspotentialen einer Gruppe von *Ganglienzellen* (Anhäufung von Nervenzellkörper) des okzipitalen *Kortex* (Hirnrinde) entsprächen (Adrian & Matthews 1934; zit. in Zschocke &

Hansen 2011). Mit Voranschreiten der neurophysiologischen Forschung wurde klar, dass solche Aktionspotentiale mit bis zu zwei Millisekunden Dauer und einer lokal sehr begrenzten Spannungsdifferenz zwischen Innen- und Außenseite der Zellmembran, nicht für die gemessenen, trägen Potentialschwankungen verantwortlich sein können. Viel mehr sind es postsynaptischen Potentiale, der zur Kopfoberfläche vertikal gelegenen großen Pyramidenzellen des Kortex, die zu den auf der Haut messbaren Potentialschwankungen führen, wie in dem Standardwerk „klinische Elektroenzephalographie“ (Zschocke & Hansen 2011) ausgeführt wird: Durch eine Vielzahl von erregenden (EPSP) und hemmenden (IPSP) postsynaptischen Potentialen, die der Weiterleitung von Aktionspotentialen entsprechen, kommt es zu Ionenverschiebungen in den synaptischen Spalten. Tausende Synapsen der großen Pyramidenzellen des Kortex liegen *Apikal*, nahe der Schädeldecke. Ihre *Somata* (Nervenzellkörper) hingegen liegen in tieferen kortikalen Regionen. Kommt es zur Erregung der apikal gelegenen Synapsen der *Dendriten* (Nervenzellfortsätzen) der Pyramidenzellen, entsteht aufgrund der anatomischen Anordnung ein sog. *Kortikales Feldpotential*, welches *elektrischen Dipolen* entspricht. Der Bereich apikaler Dendriten wird nach Erregung durch Natriumeinstrom in die Zellen, relativ zum Extrazellularraum tiefer liegenden Somata, negativer. Da die senkrecht orientierten Pyramidenzellen ein Drittel aller Nervenzellen im Kortex ausmachen, sind es hauptsächlich deren, durch EPSP an den apikalen Dendriten ausgelösten Feldpotentiale bzw. Dipole, die im EEG messbar sind.

### 1.3.2 Elektroenzephalografie (EEG)

Das EEG erlaubt kortikale Feldpotentiale über die Kopfhaut abzuleiten. Stärken dieser Messmethode liegen in einer schnellen und vergleichsweisen kostengünstigen Möglichkeit, Hirnaktivität nichtinvasiv und mit nahezu keiner relevanten zeitlichen Verzögerung darzustellen. Nachteilig ist jedoch die schlechte räumliche Auflösung aufgrund der zwischen Neuronen und Ableitungselektroden liegenden isolierenden Gewebeschichten (vor allem Knochen und Haut), sowie die oben genannte Tatsache, dass nahezu ausschließlich nur großflächige Feldpotentiale paralleler Pyramidenzellen des Kortex gemessen werden. Ferner liegt nur ein Drittel der Hirnrinde nahe der

Schädeloberfläche, was bedeutet, dass der größere Teil durch Furchungen einer EEG-Ableitung nicht unmittelbar zugänglich ist (Zschocke & Hansen 2011).

Außerdem ist das EEG anfällig für technische oder biologische *Artefakte* (Störungen), da Ströme im Mikrovoltbereich gemessen werden. Durch hochwertige Geräte und eine gute Forschungsumgebung können technische Störungen auf ein Minimum reduziert werden. Biologische Störungen jedoch wie Muskelartefakte, Elektrokardiogrammartefakte, Lid-, Bulbus- oder Schwitzartefakte können oft nur begrenzt verhindert werden. Bei einem Experiment wie dem hier durchgeführten, in welchem Aufgaben bearbeitet werden müssen, treten biologische Artefakte definitiv auf. Hier spielen moderne Methoden der Nachbearbeitung der Daten wie die Artefaktkorrektur mittels *Independent Component Analysis* (ICA), eine wichtige Rolle, um verwertbare Daten zu erhalten (siehe Kapitel 2 Material und Methoden).

Das EEG stellt eine Standarduntersuchung in der klinischen Diagnostik dar, z.B. bei Epilepsie-Patienten. In der neuropsychiatrischen Forschung sind EEG-Messungen verbreitet, da auf nichtinvasive Weise praktisch in Echtzeit Hirnreaktionen aufgezeichnet werden können. Trotz der Einschränkungen wie der schlechten räumlichen Messgenauigkeit ist das EEG eine kostengünstige Alternative zur *Magnetenzephalographie* (Messung der magnetischen Aktivität des Gehirns, MEG), welche als einzig anderes Verfahren eine vergleichbar hohe zeitliche Auflösung bietet.

### 1.3.3 Ereigniskorrelierte Potentiale (ERP)

Die Rohdaten des EEG sind für kognitiv-neurowissenschaftliche Fragestellungen ohne weitere technische Verarbeitung nur schlecht zu verwerten, da die eventuellen, durch kognitive Prozesse hervorgerufenen Potentialveränderungen, durch das EEG-Grundrauschen und von biologischen und technischen Artefakten überdeckt werden. Um aus den EEG-Daten überhaupt Rückschlüsse auf neuronale Potentialveränderungen als Reaktion auf diverse Stimuli ziehen zu können, wurde die Methode des Erzeugens von *Ereigniskorrelierten Potentialen* (ERP) entwickelt.

ERP sind gemittelte Wellenformen, erzeugt aus denen des EEG, welche mit sensorischen, motorischen oder kognitiven Prozessen korrelieren (Luck 2014).

Indem mehrere EEG-Kurven mit dem gleichen zeitlichen Abstand zu einem Stimulus gemittelt werden, fallen die ereignisunabhängigen Potentialveränderungen weniger ins Gewicht. Potentiale, welche mit dem Ereignis bzw. Stimulus korrelieren, werden sichtbar. Biologische oder technische Artefakte verlieren an Bedeutung. Die Amplituden der so erzeugten ERP liegen im Bereich von bis zu 10  $\mu\text{V}$  und sind damit deutlich niedriger als die Signale des Spontan-EEG mit Ausschlägen von bis zu 100  $\mu\text{V}$ .

Seit die ERP-Forschung in den 1970er Jahren durch Digitalisierung der EEG-Daten ermöglicht wurde, gab es Beschreibungen vieler verschiedener sog. *Komponenten*. Diese Komponenten entsprechen einzelnen positiven oder negativen *Peaks* (Hoch- und Tiefpunkte) bzw. Kurvenverläufen, die nach ihrem zeitlichen Auftreten und dem Ort ihrer maximalen Ausprägung eingeteilt werden. Eine genaue Eingrenzung ihres neuronalen Ursprungs ist jedoch nicht möglich, da ein gemessenes ERP aus unzähligen Quellen generiert worden sein kann, welche technisch nicht zweifelsfrei lokalisiert werden können (Luck 2014). Lediglich die frühen, sog. *exogenen* Potentiale sind einer eindeutigen Hirnregion, nämlich dem Hirnstamm, zuordenbar. Ein Beispiel hierfür sind die akustisch evozierten Potentiale, welche innerhalb der ersten 10 ms nach einem akustischen Stimulus auftreten und die Aktivitäten der Hörbahn im Hirnstamm widerspiegeln. Solche exogenen Potentiale, wie es auch visuell oder motorisch evozierten Potentiale sind, können nicht durch psychologische Faktoren verändert werden und sind intra- und interindividuell sehr stabil (Buchner & Noth 2005). Ab 50 ms nach dem Stimulus treten Potentiale mit *endogenen* Anteilen auf, welche zur Untersuchung von kognitiven Prozessen von Interesse sind (Näätänen & Picton 1987). Diese sind abhängig von der Informationsverarbeitung und den psychologischen Eigenschaften der Person und spiegeln diese wider. Deshalb sind die endogenen Komponenten gegensätzlich der frühen exogenen Potentiale interindividuell sowie beispielsweise abhängig vom Studiensetting recht variabel. Die Potentiale sind normalerweise benannt nach ihrer Polarität. P steht für positive, N für negative Peaks, gefolgt von einer Nummerierung, entweder von eins aufwärts, oder nach der *Latenzzeit* (dem zeitlichen Abstand zum Stimulus) in Millisekunden. Daraus

ergeben sich unterschiedliche Namen für gleiche Komponenten, wie z.B. N1 oder N100 für den ersten negativen Peak mit dem Maximum 100 ms nach dem Stimulus. Die Polarität einer Komponente kann, analog zum in Kapitel 1.3.1. erklärten neurophysiologischen Prinzip, interpretiert werden: einem negativen Potential liegt eine Erregung der Pyramidenzellen im Kortex zu Grunde, einem positiven Potential eine Hemmung derselben.

Die ERP-Erstellung ist aus mehreren Gründen ein geeignetes und häufig angewandtes Verfahren für neurowissenschaftliche Untersuchungen. Die Messung bietet eine hohe zeitlichen Auflösung, ist nichtinvasiv, also nicht schmerzhaft sowie vergleichsweise kostengünstig mit der Möglichkeit einer flexiblen Anwendung, sodass z.B. während der EEG-Aufzeichnung Aufgaben am Computer bearbeitet werden können. Aus diesen Gründen wurde das Verfahren in der vorliegenden Arbeit gewählt, um die frühen neuronalen Signaturen auf die Präsentation von FB während der Bearbeitung einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe zu untersuchen.

#### 1.3.4 Komponente N1

Die N1 zeigt sich als negative Amplitude mit Peak zwischen 75 bis 200 ms nach einem Stimulus. Vor allem wird sie nach auditorischen (Näätänen & Picton 1987) und visuellen Reizen, jedoch auch nach somato-sensorischen Stimuli (Liang u. a. 2008) beobachtet. Hierbei zeigen sich verschiedene Subkomponenten der N1, welche sich in räumlicher und zeitlicher Ausdehnung etwas unterscheiden. Zur Untersuchung neuronaler Signaturen von visuell präsentiertem FB ist in dieser Arbeit folglich die visuelle N1 von Interesse. Die visuelle N1 kann ebenso in mehrere Subkomponenten unterteilt werden. Die früheste N1 Subkomponente ist mit einem Maximum an anterioren Ableitungselektroden zu finden (Luck & Hillyard 1993). Es existieren mindestens zwei Subkomponenten mit etwas später auftretenden Maxima an posterioren Elektroden sowie eine vom parietalen und eine vom lateralen okzipitalen Kortex ausgehende (Luck 2014).

Wie bereits in Kapitel 1.3.3 erwähnt, beginnen sich endogene Anteile, also von übergeordneten Hirnarealen ausgehende neuronale Aktivitäten, ab etwa 50 ms nach Stimuluspräsentation zu zeigen. Hillyard und Kollegen konnten erstmals zeigen, dass die auditorisch evozierte N1 endogene Anteile der selektiven

Aufmerksamkeit widerspiegelt (Hillyard u. a. 1973). Somit ist die N1 eine der ersten ERP-Komponenten, welche endogene Anteile, als Abbild übergeordneter kognitiver Prozesse, beinhaltet. Ähnliche Phänomene zeigten sich nach visuellen Reizen, als die N1 Amplitude für erwartete Farben und ihrer räumlichen Erscheinung höher ausschlug (Hillyard & Münte 1984; Clark & Hillyard 1996). Zudem konnte in mehreren Studien gezeigt werden, dass die N1 unterschiedlich auf emotionale Inhalte von visuellen Stimuli reagiert und negativer erscheint für emotional bedeutende Stimuli. (Weinberg & Hajcak 2010; Foti u. a. 2009; Keil u. a. 2001; Keil u. a. 2002; Yuan u. a. 2007).

#### 1.3.5 Komponente P2

Die P2 Komponente wird im Oxford Handbook für ERP Komponenten (Luck & Kappenman 2013) als positive Auslenkung mit Peak nach etwa 180 ms unter fronto-zentralen Elektroden beschrieben, welche häufig Überschneidungen mit Anteilen der P1 oder N1, sowie der nachfolgenden N2, zeigt. Sie stellt, wie auch die N1, ein Indikator für selektive Aufmerksamkeit dar (Luck & Hillyard 1994), ist jedoch auch positiver nach visuellen Stimuli, welche emotional relevant sind (Herbert u. a. 2006).

Befunde legen nahe, dass erhöhte P2-Amplituden einen Indikator für Aufmerksamkeitsprozesse in Verbindung mit dem negativity bias darstellen. Es wurden visuell emotionale negative, positive und neutrale Bilder mit jeweils hohem Wert von *Arousal* (Erregung, Aktivierung, ohne emotionale Komponente) präsentiert, wobei die P2-Amplituden 150 -250 ms fronto-zentral nach negativen Stimuli höher waren, im Vergleich zu positiven und neutralen Bildern (Carretié u. a. 2001). In Folgestudien wurde darauf geschlossen, dass die P2 die mittlere Phase der Aufmerksamkeitslenkung auf negative Stimuli abbildet, wo die anfänglich erhöhte und schneller einsetzende Mobilisierung der Aufmerksamkeit in Richtung negativer Stimuli wieder abnimmt (Carretié u. a. 2004).

Die P2 stellt eine neuronale Signatur für die frühe Aufmerksamkeitsverarbeitung dar und bildet die automatische Aufmerksamkeitslenkung in Richtung emotional negativer Reize ab (Delplanque u. a. 2004; Huang & Luo 2006; Carretié u. a. 2006; Yuan u. a. 2007; Olofsson & Polich 2007).

### 1.3.6 Die Rolle des Paced Auditory Serial Task (PASAT)

Als Modell zur Untersuchung früher neuronaler Signaturen von Leistungsfeedback innerhalb einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe mit hohen Anforderungen an die CCE, wurde in der für diese Promotionsarbeit zugrundeliegenden Studie der *Paced Auditory Serial Task* (PASAT) verwendet. Die ursprüngliche Version des PASAT wurde konzipiert, um Konzentration und Aufmerksamkeit zu bewerten (Deary u. a. 1991). Weiterentwicklungen beinhalteten eine automatische Anpassung des Zeitintervalls, wodurch eine individuelle Adaption an die Leistung erfolgte und die Bearbeitungsgeschwindigkeit als Marker derer gemessen werden konnte (Lejuez u. a. 2003). In einer Studie über frustrationsinduzierten negativen Affekt und kognitive Kontrollfähigkeiten (Plewnia, Schroeder, Kunze, u. a. 2015) wurde diese adaptierte Version des PASAT verwendet und als effektives Messinstrument kognitiver Leistungsfähigkeit, bei Ablenkung durch negativen emotionalen Stress in Zusammenhang mit Frustration, beschrieben. Dies bestätigt vorhergegangene Befunde, die zeigen, dass der PASAT negativen Stress erzeugt (Holdwick & Wingefeld 1999) sowie Besorgnis und Frustration, welche die Leistung beeinflussen (Tombaugh 2006).

Eine weiter erschwerte Version des PASAT (*2-back PASAT*) wurde mit dem Ziel entwickelt, kognitive Kontrollfunktionen junger leistungsfähiger Probanden noch stärker zu fordern und Frustration zu erzeugen (Weller 2017; Wiegand u. a. 2019), indem der Proband sich fortlaufend zwei Zahlen merken und die erste davon mit einer dritten neuen Zahl addieren muss. Zeitgleich zur akustischen Präsentation der nächsten Zahl wird visuell als FB eine rote oder grüne Farbe auf einem Bildschirm präsentiert, welches wie in Kapitel 1.1 und 1.2 ausgeführt, ablenkend wirken kann. Wiegand und Kollegen kombinierten die Bearbeitung des 2-back PASAT mit der Anwendung *transkranieller Stimulation mittels Gleichstrom* (tDCS) des *dorsolateralen präfrontalen Kortex* (dlPFC), da dieses kortikale Areal erhöhte Aktivitäten bei der Bearbeitung des PASAT während fMRI (funktioneller Magnetresonanztomografie) zeigte (Audoin u. a. 2005). Diese aktivierten Areale stehen unter anderem in Verbindung mit dem zentralen exekutiven System des Arbeitsgedächtnisses (D'Esposito u. a. 2000) sowie der



kognitiven Kontrolle von distraktiver Information während auditorischer Aktivität des Arbeitsgedächtnisses (Chao & Knight 1998). Tatsächlich konnte gezeigt werden, dass die Stimulation des dlPFC, die Leistung im PASAT und somit die kognitive Kontrolle im Sinne effektiver Informationsverarbeitung, verbessert (Plewnia, Schroeder, Kunze, u. a. 2015; Wiegand u. a. 2019). Die verbesserte Leistung war assoziiert mit einer gleichzeitigen Stabilisierung des Affekts.

Zusammenfassend verlangt der 2-back PASAT zeitgleich nach einer hohen Arbeitsgedächtnisleistung sowie einer CCE, da ein emotional und ablenkend wirkendes FB im Moment des Arbeitsgedächtnis *Updatings*, der Aktualisierung und Anpassung der Arbeitsgedächtnisinhalte, auftritt. Deshalb eignet sich der Test, um die Verarbeitung von emotional bedeutendem FB mit Hilfe der dazugehörigen neuronalen Signaturen, während fortlaufend fordernder Arbeitsgedächtnisleistung, zu untersuchen.

#### 1.4 Ziele der Arbeit und Hypothesen

Diese Arbeit möchte sich genauer mit der zeitlichen Phase der sehr frühen neuronalen Verarbeitung von Leistungsfeedback beschäftigen. Wie zeigen sich neuronale Signaturen in der Zeit des Aufleuchtens des FB bis 200 ms danach? Und wie könnten diese frühen ERP mit der Arbeitsgedächtnisleistung assoziiert sein?

Mit N1 und P2 bestehen frühe ERP-Komponenten, welche die Verarbeitung visuell präsentierter emotionaler Inhalte abbilden. Die beiden Komponenten können als neuronale Signaturen von Leistungsfeedback innerhalb einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe angesehen werden. Deren Zusammenhang mit kontinuierlicher Arbeitsgedächtnisleistung, speziell im Hinblick auf die emotional hohe Bedeutung des negativen FB und dessen distraktive Wirkung, lohnt sich zu untersuchen, da anzunehmen ist, dass N1 und P2 als Abbild des negativity bias unterschiedliche Amplituden für rotes und grünes FB zeigen könnten. Eine erhöhte Aktivität nach negativem FB würde dabei am ehesten der zum aktuellen Forschungsstand passenden Erwartung entsprechen.

Die späteren Phasen der FB-Verarbeitung (nach 200 ms) sollen in einer weiteren Veröffentlichung untersucht werden.

Ergänzend soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob eine subjektive emotionale Beeinflussung während der Bearbeitung des 2-back PASAT mit FB vorliegt, wie stark diese ist und inwiefern sie zu den bisherigen Daten und Erkenntnissen zum 2-back PASAT passt. Hierzu wird ein selbstentwickelter *Fragebogen zur subjektiven Leistungseinschätzung* (SLE) verwendet.

## 2 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden Material und Methoden der für diese Promotionsarbeit zugrundeliegenden Studie vorgestellt.

### 2.1 Stichprobe

Die Stichprobe bestand aus 25 Probanden, die online über ein soziales Netzwerk rekrutiert wurden. Eine Versuchsperson wurde aufgrund zu artefaktreicher EEG-Messung von der Auswertung ausgeschlossen (siehe Kapitel 2.6.1 Elektrophysiologische Datenverarbeitung). Die restlichen Teilnehmer waren im Alter von 20 bis 37 Jahren ( $M = 23.71$ ,  $SD = 4.06$ ), davon 16 weiblich (66.7 %) und 8 männlich (33.3 %). Die Versuchspersonen waren zum Zeitpunkt der Testung psychisch und physisch gesund. Laut *Edinburgh Handedness Inventory* (EHI) (Oldfield 1971) waren 21 Rechtshänder, ein Beidhänder und zwei Linkshänder Teilnehmer der Studie. Als Schulabschluss hatten 23 Personen das Abitur und ein Proband die mittlere Reife angegeben. Der Prozentsatz von Personen in Berufsausbildung betrug 58.3 % ( $N = 14$ ), 20.8 % ( $N = 5$ ) hatten einen akademischen Abschluss, 16.7 % ( $N = 4$ ) einen Ausbildungs-Berufsabschluss und 4.2 % ( $N = 1$ ) keinen Berufsabschluss.

Es wurde anamnestisch überprüft, dass keine der Versuchspersonen zu Beginn der Testung unter Einfluss von Alkohol, Drogen oder Medikamenten stand. Lediglich sechs Personen waren Raucher (25 %): Hier wurde erfragt, ob gerade ein Verlangen nach Zigaretten bestehe, was verneint wurde.

Weitere Ausschlusskriterien waren ein Alter unter 18 oder über 40 Jahren, hirnorganische Fehlbildungen, Operationen oder tiefe Hirnstimulation, erworbene Hirnschädigungen oder Erkrankungen des zentralen Nervensystems, aktuelle oder in der Vergangenheit aufgetretene neurologische Erkrankungen sowie Farbenblindheit.

Die Teilnahme an der Studie wurde mit 8 € pro Stunde vergütet.

## 2.2 Ethische Aspekte

Ein Antrag zur Beurteilung ethischer und rechtlicher Fragen des medizinischen Forschungsvorhabens wurde bei der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Universität Tübingen vor Beginn der Testungen beantragt und mit der Projektnummer 675/2016BO2 bewilligt.

Alle Probanden willigten schriftlich der Teilnahme und der Weiterverarbeitung ihrer pseudonymisierten Daten ein.

## 2.3 Voruntersuchungen und Diagnostik

Im Folgenden sind die in der Studie benutzten Fragebögen und neuropsychologischen Tests aufgeführt, die alle in ihren deutschsprachigen Versionen verwendet wurden.

### 2.3.1 Anamnesebogen

Der selbst zusammengestellte Anamnesebogen diente in erster Linie zur Erfassung demografischer Daten wie Alter, Geschlecht und Schulbildung. Des Weiteren wurden Screening-Fragen gestellt, um psychisch oder neurologisch erkrankte Personen zu erkennen. Es folgten Fragen zum Drogen-, Alkohol-, Koffein- und Nikotinkonsum sowie zur Medikamenteneinnahme. Bei Frauen wurde nach dem ersten Tag der letzten Periode gefragt. Alle Probanden sollten ihre Mathematik-Abschlussnoten in der Schule bzw. in der Schulabschlussprüfung angeben und auf einer 7-Punkte Likert-Skala ihre aktuelle Matheleistung subjektiv einschätzen.

### 2.3.2 Edinburgh Handedness Inventory (EHI)

Die Händigkeit der Testpersonen wurde durch eine überarbeitete Version des EHI (Oldfield 1971) geprüft, indem zehn Items bzw. Tätigkeiten der präferierten Hand zugeordnet werden mussten. Gefragt wurde „*Welche Hand benutzen Sie?*“ zur Antwort standen „*links*“, „*rechts*“ und „*beide*“ sowie „*Benutzen Sie jemals die andere Hand?*“ mit den Antworten „*ja*“ und „*nein*“. Benutzte die Person ausschließlich eine Hand, wurden zwei Punkte vergeben, bei Nutzung beider Hände jeweils ein Punkt für Rechts (R) und Links (L). Der *Lateralitätsquotient* (LQ) wurde aus den Gesamtpunkten für R und L nach der Formel  $(R - L) / (R +$

L) berechnet. Bei einem LQ über 0.5 wurde der Teilnehmer als Rechtshänder bezeichnet, bei einem LQ zwischen -0.5 und 0.5 als Beidhänder und unter -0.5 als Linkshänder. Zudem wurden die Probanden befragt, ob sie sich als Rechts- oder Linkshänder bezeichnen würden oder „umgelernte“ Linkshänder seien.

### 2.3.3 Zahlen nachsprechen (ZNT)

Eine angepasste Version des Subtests *Zahlen nachsprechen* (ZNT) aus der Wechsler Adult Intelligence Scale, Fourth Edition (Wechsler 2008), wurde zur Erfassung des Arbeitsgedächtnisses verwendet. Die Probanden bekamen in jeweils zwei Versuchen Zahlenspannen von drei bis acht Zahlen im Abstand von etwa einer Sekunde genannt. Diese Zahlenreihe sollte anschließend in gleicher Reihenfolge wiedergegeben werden. Für jede korrekt wiederholte Zahlenspanne wurde ein Punkt vergeben. Der Test wurde beendet, sobald die Versuchsperson beide Versuche einer Zahlenreihenlänge falsch beantwortete. Bei den Zahlenspannen rückwärts wurden jeweils zwei Zahlenreihen von zwei bis sieben Zahlen genannt, welche vom Teilnehmer in umgekehrter Reihenfolge wiederholt werden sollten. Ebenso wurde hier für jede korrekte Wiedergabe ein Punkt gegeben.

### 2.3.4 Trail Making Test A/B (TMT-A/B)

Der *Trail Making Test* (TMT-A/B) (zu Deutsch Pfadfindertest) in Version A und B gilt als sehr guter allgemeiner Intelligenztest (Reitan 1958; Reitan 1992; Tombaugh 2004). Teil A besteht darin, auf einem DIN A4-Blatt zufällig verteilte Zahlen von 1 bis 25 mit einem Stift in aufsteigender Reihenfolge zu verbinden. Dies soll so schnell wie möglich erledigt werden, ohne den Stift dabei abzusetzen, mit geraden Linien und bis zur letzten Zahl, an der „Ende“ steht. Der Versuchsleiter stoppt dabei die Zeit. Anhand eines Übungsbeispiels bekamen die Probanden die Aufgabe erklärt. Sowohl im Probe- als auch im endgültigen Durchgang wurde vom Versuchsleiter sofort auf Fehlen hingewiesen, sodass der Teilnehmer den Fehler korrigieren konnte, während die Zeit weiterlief.

In Teil B müssen Zahlen (1 bis 13) und Buchstaben (A bis L) in abwechselnder, aufsteigender Reihenfolge verbunden werden. Dabei sind die Regeln wie in Teil A zu beachten.

### 2.3.5 Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest (MWT-B)

Der *Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest* (MWT-B) wurde konzipiert, um das allgemeine Intelligenzniveau mit möglichst geringem Aufwand zu messen (Lehrl 2005). Hierzu gibt es 37 Wortzeilen, die jeweils ein umgangs-, bildungs-, oder wissenschaftssprachlich bekanntes Wort und vier sinnlose Wörter beinhalten. Die Testpersonen sollen das richtige Wort herausfinden und durchstreichen. Zeitlich gibt es keine Limitierung und mit jeder Zeile steigt die Schwierigkeit. Anhand einer Normentabelle ergeben sich aus der Anzahl der richtigen Antworten Prozentränge mit zugeordneten Intelligenzstufen.

## 2.4 Die abhängigen Variablen

### 2.4.1 Subjektive Leistungseinschätzung (SLE)

Um die subjektive kognitive Anforderung und Einschätzung der Leistung im PASAT sowie die gedankliche Beeinflussung bzw. Distraction durch das FB während Bearbeitung des PASAT zu messen, wurde die selbstentwickelte *subjektive Leistungseinschätzung* (SLE) erhoben. Die Teilnehmer wurden gebeten, am Computer mit der Maus folgende drei Aussagen auf einer Sieben-Punkte Likert-Skala zu ergänzen: 1.) *Mit meiner Leistung in der Rechenaufgabe bin ich...* „1“ (*gar nicht zufrieden*) bis „7“ (*voll und ganz zufrieden*), 2.) *Im Vergleich zu anderen Studienteilnehmern schätze ich meine Leistung in der Rechenaufgabe als...* „1“ (*schlechter ein*) bis „7“ (*besser ein*), 3.) *Der Ärger über meine Fehler in der Rechenaufgabe hat mich abgelenkt* „1“ (*trifft überhaupt nicht zu*) bis „7“ (*trifft voll und ganz zu*).

### 2.4.2 Paced Auditory Serial Task (PASAT)

Es wurde eine modifizierte Version des PASAT (Gronwall & Wrightson 1974), implementiert am Computer mittels PsychoPy v1.82.02 (Peirce 2007; Peirce 2008) verwendet. Den Test bearbeiteten die Probanden sitzend mit einem Abstand von ca. 65 cm zu einem 17-Zoll LCD-Monitor. Mithilfe dicht abschließender Kopfhörer wurde den Testpersonen eine fortlaufende Reihe mit Zahlen (eins bis neun) präsentiert, mit der Aufforderung, jede aktuelle Zahl zu der vor-vorhergegangenen zu addieren. Abweichend vom ursprünglichen PASAT, bei dem die aktuell genannte Zahl immer mit der direkt vorhergegangenen Zahl

addiert werden muss (1-back PASAT), sollten die Teilnehmer hier die Zahl vor der direkt davor genannten Zahl zur aktuellen addieren (2-back PASAT). Das Ergebnis musste dann mit einem Finger der dominanten Hand auf der Tastatur angegeben werden. Alle möglichen Ergebnisse (Zahlen 2 bis 18) waren in aufsteigender Reihenfolge auf die Buchstabentasten der Tastatur geklebt. Damit konnte sichergestellt werden, dass keiner der Teilnehmer Vorteile durch beispielsweise gute Kenntnis des Ziffernblocks hatte.

Die Zahlenreihe wurde mit einem *Interstimulusintervall* (ISI) von drei Sekunden fortgeführt. Bei einer viermalig hintereinander korrekten Eingabe des Ergebnisses wurde das ISI um 0.1s verkürzt, bei falscher oder fehlender Eingabe um 0.1 s verlängert. Der Versuchsperson wurde, im selben Moment zur akustisch neu präsentierten, visuell am Bildschirm eine Rückmeldung zur vorherigen Eingabe gegeben. Dieses FB erfolgte in Form von grüner Farbe bei korrekter Rechnung und in Form von roter Farbe nach Eingabe eines falschen Ergebnisses oder keiner Reaktion mit einer Dauer von 433 ms. Der PASAT bestand aus drei Blöcken mit jeweils fünf Minuten Dauer, zwischen den Blöcken gab es eine Pausenphase von 30 Sekunden. Zu Beginn jedes Blockes wurde auf dem Bildschirm ein Countdown von zehn Sekunden hinab gezählt. Die Anzahl der Additionen (*Trials*) pro Block war von der Leistung bzw. der Länge der ISI abhängig. Nach der Pausenphase wurde für den folgenden Block das vorherige ISI übernommen. Vor Beginn der drei eigentlichen PASAT-Blöcke gab es einen Übungsblock mit 28 Trials, um sicher zu stellen, dass die Probanden die Aufgabe richtig verstanden hatten.

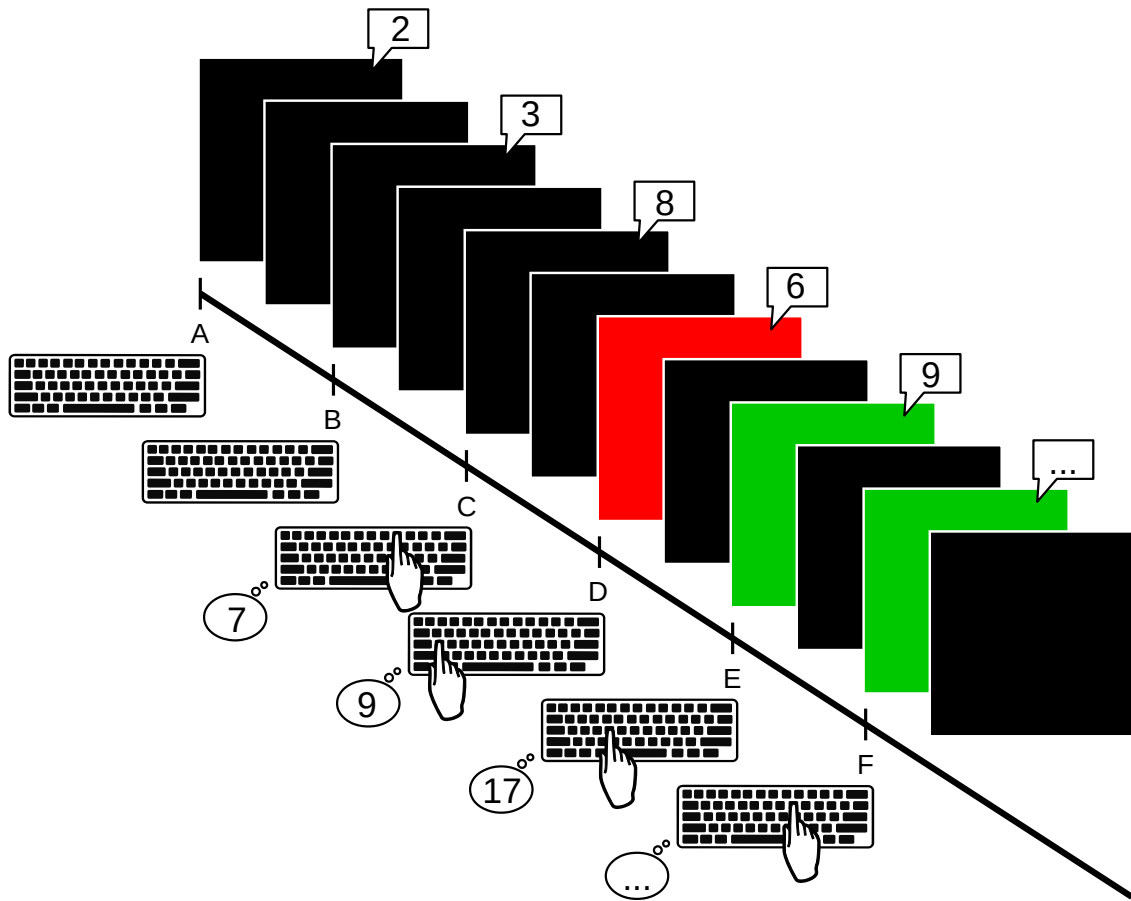


Abbildung 1: PASAT-Ablauf. Die Versuchsperson saß vor einem Bildschirm und bekam über Kopfhörer Zahlen von eins bis neun (an Zeitpunkten A - F) präsentiert. Sie sollte immer die aktuell genannte Zahl zu der vor-vorherigen addieren und dieses Ergebnis auf einer mit den Zahlen 2 bis 18 markierten Tastatur eingeben. Die erste Eingabe bei C war mit 7 falsch, weshalb mit der neu präsentierten Zahl bei D rotes FB erschien. Die Zahl 10 ( $8 + 2$ ) wäre korrekt gewesen. In diesem Beispiel konnte sich der Teilnehmer an die vor-vorherige Zahl (3) erinnern und diese korrekt zu der aktuell genannten Zahl (6) addieren und die Zahl 9 eingeben. Aufgrund der korrekten Eingabe folgte bei E mit der neuen Zahl ein grünes FB, bei fehlender Eingabe hätte, wie für die falsche Eingabe auch, ein rotes FB aufgeleuchtet.

Als Kontrollbedingungen wurden zwei Abwandlungen des PASAT eingeführt, um den Einfluss und die Auswirkung des FB besser untersuchen zu können. In der Version *FBO* (Feedback only, nur Feedback) bekam der Proband nur das FB in Form von grünem und rotem Aufleuchten des Bildschirms präsentiert. Da vorrangig die inhaltliche Bedeutung des FB von Interesse ist und diese Information nicht durch eine unterschiedliche elektrophysiologische Reaktion auf die beiden Farben verfälscht sein sollte, wurden die bei FBO gemessenen Potentiale von denen im PASAT mit FB abgezogen. Diese gebildeten Kurven, sog. *Difference Waves*, wurden für die Auswertung der ERP verwendet. Dadurch

soll erreicht werden, dass die neurophysiologische Reaktion auf die reine Farbinformation keinen Einfluss mehr auf die Unterschiede der ausgewerteten ERP hat.

Bei Durchführung der Version FBO wurden die Teilnehmer gebeten, entspannt auf die mit Zahlen markierten Felder der Tastatur zu schauen, während in zwei Blöcken von jeweils 2.5 Minuten Länge in einem zufällig gewählten Intervall von 1.5 bis 2.5 Sekunden die Farben Rot und Grün für 0.433 Sekunden präsentiert wurden.

Die zweite PASAT-Abwandlung, genannt *noFB* (no Feedback, kein Feedback), entspricht dem PASAT, ohne dass FB gegeben wurde. Diese Abwandlung wurde für weitere Untersuchungen durchgeführt und spielt in der vorliegenden Arbeit keine weitere Rolle, soll der Vollständigkeit halber jedoch Erwähnung finden. Der Bildschirm blieb also die ganze Zeit schwarz, ausgenommen vom Countdown zu Beginn der Aufgabe. Die Präsentation der Zahlen erfolgte, unverändert zum PASAT mit FB über die Kopfhörer. Abweichend davon gab es jedoch nur zwei Blöcke mit der Länge von vier Minuten zu bearbeiten, getrennt von einer Pause von 30 Sekunden.

Das Programm speicherte die Daten während der Bearbeitung durch die Versuchsperson. Besonders von Interesse ist die Anzahl der korrekten und inkorrekten Eingaben, als einfache Parameter für die Leistung der Probanden in der Aufgabe. Die Anzahl korrekter Trials ist bei guten Teilnehmern erhöht, ebenso deren Anzahl von Fehlern im Vergleich zu weniger guten Teilnehmern. Die Dauer und Veränderung des ISI wurde ebenso gespeichert. Ein kurzes ISI spiegelt sich auch in einer hohen Anzahl korrekter Trials wider. Deshalb ist das ISI in dieser Arbeit als Variable zur Auswertung nicht von Interesse, da es ergänzend keine wesentlich neuen Informationen enthält. Ein Nachteil des ISI als Parameter ist zudem, dass es sich mit einer Verzögerung verändert.

#### 2.4.3 Aufzeichnung des EEG

Zum Aufzeichnen des EEG wurde das 32-Kanal-System actiCHamp (BrainVision Products GmbH, für Deutschland: MES Forschungssystem GmbH, 82205 Gilching) verwendet. Das System besteht aus einem Verstärker mit Stromversorgungseinheit, welcher die Signaleingänge der 32 EEG-Elektroden



(actiCapBP 32-Kanal-Elektrodenset mit aktiven Ag/AgCl-Sensor-Elektroden, Splitterbox und Verbindungskabel) empfing. Die *Ground*-Elektrode, die zur Erzeugung der Erdung dient, war über einen eigenen Anschluss separat mit dem Verstärker verbunden. Zur zeitlichen Markierung der Stimuli (Beginn und Ende der Blöcke, Zahlen, Art des FB) sowie der Reaktion der Probanden (Tastendrücke) wurden *Eventcodes* als *Trigger* vom Test-Computer, an dem der Proband den PASAT und die Fragebögen bearbeitete, zum Verstärker übertragen und mit der Software BrainVision Recorder v1.21.0004 aufgezeichnet. Ebenso wurde parallel zum EEG über dasselbe Gerät das *Elektrokardiogramm* (EKG) über zwei Klebeelektroden an den Schultern aufgezeichnet, welches möglicherweise zur Untersuchung der *Herzratenvariabilität* (HRV) in späteren Veröffentlichungen Verwendung findet.

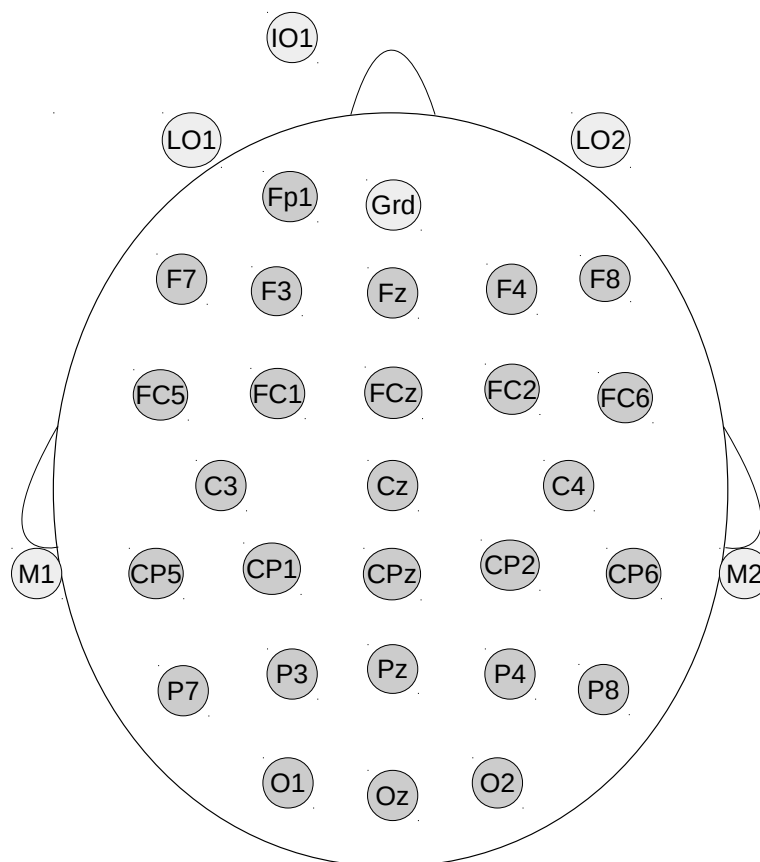


Abbildung 2: Anordnung der EEG-Elektroden gemäß internationalem 10/20-System.

Die EEG-Elektroden wurden gemäß dem internationalen 10/20-System (Jasper 1958) auf eine der passenden 64-Kanal-Hauben (EasyCap, 82211 Herrsching),

in den Größen 54, 56, 58 und 60 cm platziert. Ableitungsorte waren: C3, C4, CP1, CP2, CP5, CP6, Cz, F3, F4, F7, F8, FC1, FC2, FC5, FC6, Fp1, IO1, LO2, LO1, Fz, O1, O2, Oz, P3, P4, P7, P8, Pz, CPz, FCz sowie M1 und M2 hinter den Ohren über dem Pars mastoidea des Os temporale als Referenz, wie in Abb. 2 zu sehen.

## 2.5 Ablauf der Studie

In diesem Kapitel sind die verschiedenen Abschnitte der Testung (siehe Abb. 3) chronologisch aufgeführt.

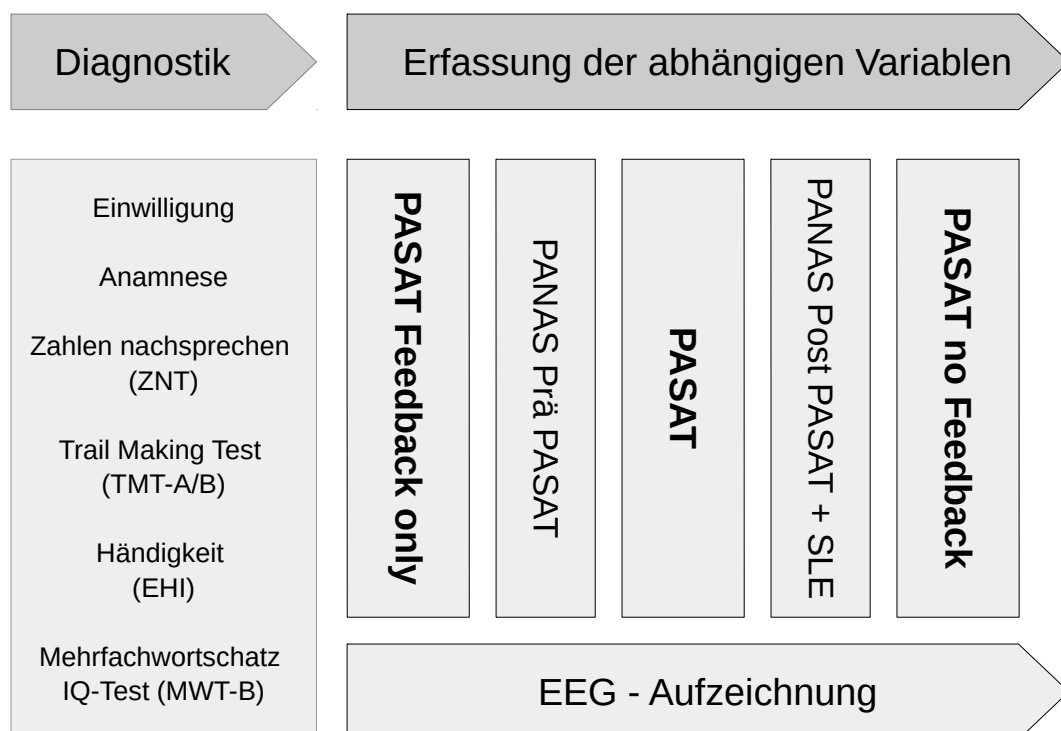


Abbildung 3: Ablauf der Studie im Überblick.

### 2.5.1 Vorbereitung und Diagnostik

Das Experiment fand im Frühjahr und Sommer 2017 in der Universitätsklinik für Psychiatrie und Psychotherapie Tübingen statt. Pro Probanden wurde ein Sitzungsdauer von drei Stunden geplant. Vor dem Termin wurde dem Probanden eine ausführliche Information zugeschickt, mit der Bitte, diese aufmerksam durchzulesen. Der Ablauf der Studie wurde zu Beginn des Termins noch einmal kurz zusammengefasst sowie eventuelle Fragen des Probanden beantwortet. Dann erfolgte die schriftliche Einwilligung.

Nach dem Ausfüllen des Anamnesebogens folgte der ZNT und der TMT-A/B. Bevor die Versuchsperson selbständig den EHI, den PTQ und die RSES (zwei Fragebögen zur Ruminationsneigung, welche im Rahmen weiterer Studien ausgewertet werden), sowie den MWT-B ausfüllten, wurde der Kopfumfang des Teilnehmers gemessen, um die passende EEG-Haube mit den EEG-Elektroden zu bestücken.

Dann wurde der Proband gebeten, sich an den für die Testung vorbereiteten Tisch zu setzen. An dieser Stelle wurde dem Teilnehmer die Möglichkeit gegeben, noch einmal die Toilette aufzusuchen und darum gebeten, alle elektronischen Geräte wie Mobiltelefone auszuschalten, um einen störungsfreien Ablauf sicher zu stellen.

Der Mittelpunkt des Kopfes (Cz) wurde bestimmt und gemäß dem 10/20-System (Jasper 1958) markiert. An fünf Ableitungsstellen ohne Kopfhaut wurde die Haut gepeelt (Nuprep® Skin Prep Gel): für das Aufzeichnen der Augenbewegungen (*Elektrookulografie, EOG*) ein Zentimeter rechts und links der Augen (LO1, LO2), sowie links unter dem Auge (IO1) und für die Referenz-Elektroden, rechts und links hinter den Ohren über dem Mastoid (M1, M2). An ebendiesen Stellen wurde mit doppelseitigen Kleberingen die Elektroden-Kunststoffringe (BrainVision LLC) angebracht, in welche dann die passenden Elektroden eingesetzt wurden. Die Haube mit den schon angebrachten Kopf-Elektroden wurde angezogen und die einzelne Ground-Elektrode frontal angebracht. Danach wurden die Impedanzen durch Einspritzen von Elektrolyt-Gel (Super-Visc, EasyCap GmbH Herrsching) unter die Elektrodenspitzen mit Hilfe einer stumpfen Metallkanüle unter 10 k $\Omega$  gebracht.

Anschließend folgte die Instruktion des Probanden, dass die PC-Ansagen selbsterklärend durch das Programm führen und mittels PC-Maus und Tastatur bearbeitet werden sollen. Es wurde darauf hingewiesen und demonstriert, dass für ein störungsfreies EEG wichtig sei, Nacken und Kiefer entspannt zu halten, möglichst bewegungsarm zu sitzen und während des Bearbeitens der Aufgaben nicht zu sprechen. Der Raum war durch eine doppelte schalldichte Tür verschlossen und wurde abgedunkelt, sodass nur noch das indirekte Licht einer kleinen Lampe und das des Monitors zu sehen waren. Der Versuchsteilnehmer

war während der Bearbeitung der Aufgaben durch eine Stellwand vom Versuchsleiter getrennt.

### 2.5.2 Erfassung der abhängigen Variablen

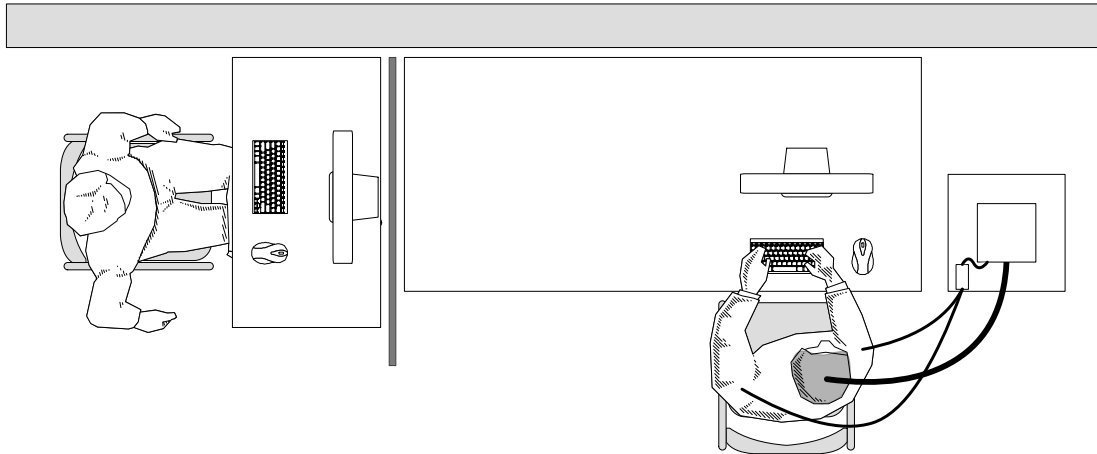


Abbildung 4: Laboraufbau. Versuchsleiter links am Aufnahme-Computer hinter Stellwand, Versuchsperson rechts am Computer zur Bearbeitung des PASAT, EEG- und EKG-Elektroden an Kopf und Schultern mit Verbindung zum Signalverstärker.

Vor Beginn der EEG-Messung während der PASAT-Abwandlung FBO, wurde dem Probanden vom Versuchsleiter mitgeteilt, entspannt zu sitzen und auf die Tastatur zu schauen. Dann wurde das Programm gestartet und der Teilnehmer bekam die rote und grüne Farbe auf dem Bildschirm präsentiert, während er sonst nichts tun musste.

Nach Beenden der Farb-Präsentation wurde der Teilnehmer gebeten, die *Positive and Negative Affect Schedule* (PANAS) Prä-PASAT am Bildschirm mit Hilfe der Computer-Maus auszufüllen. Diese Werte dienten als Ausgangswerte der positiven und negativen Affekte, wie sie in einer weiteren Veröffentlichung Verwendung finden.

Es folgte die Instruktion, wie der PASAT zu bearbeiten sei. Mit einem mündlichen Beispiel wurde überprüft, ob das Prinzip, die aktuell genannte Zahl mit der zwei Stellen zuvor genannten Zahl zu addieren, verstanden wurde. Erst dann wurde der Übungsdurchgang am Computer gestartet, bei welchem der Versuchsleiter noch zur Seite stand, um zu kontrollieren, ob die Anweisungen verstanden und eingehalten wurden. Anschließend begab er sich hinter die Trennwand und startete die EEG-Aufzeichnung, während der Proband mit Bearbeitung der

eigentlichen Aufgabe begann. Während der Bearbeitung des PASAT wurde durch den Versuchsleiter am zweiten Bildschirm sichergestellt, dass die Probanden die Aufgabe gewissenhaft durchführten. Um die Bedeutung des FB untersuchen zu können, war von Wichtigkeit, dass die Bearbeitung der Aufgabe ernst genommen wurde. Nach Beendigung des PASAT wurde der Teilnehmer gebeten, die Kopfhörer abzunehmen und die Fragebögen PANAS Post-PASAT und SLE am Computer zu bearbeiten.

Nach Bearbeitung der Fragebögen wurde der Versuchsperson auf dem Bildschirm mitgeteilt, dass nun eine Ruhephase von 7 Minuten folgte. Diese Ruhephase wurde im Rahmen einer größeren Studie zur Messung der HRV und der Ruminationsneigung konzipiert und spielt deshalb in dieser Arbeit keine Rolle.

Der Proband wurde anschließend vom Versuchsleiter kurz instruiert, dass jetzt die PASAT-Abwandlung noFB folge, der Bildschirm also schwarz bliebe und es keine Rückmeldung zu richtig oder falschen Eingaben gebe. Nach dem Aufsetzen der Kopfhörer startete die Versuchsperson die Aufgabe durch Drücken der Leertaste, während der Versuchsleiter wieder die EEG-Aufzeichnung startete.

Nach Beendigung aller Aufgaben wurde die EEG-Haube und alle geklebten Elektroden entfernt und die Versuchsperson konnte sich die Haare von Gelresten befreien.

## 2.6 Datenverarbeitung und statistische Analyse

### 2.6.1 Elektrophysiologische Datenverarbeitung

Die EEG-Daten wurden mithilfe von MATLAB (MATLAB Release 2017a, The MathWorks Inc., Natick, MA, USA) und den darin integrierten Programmen EEGLAB Toolbox (Delorme & Makeig 2004) und ERPLAP Toolbox 6.1.3 (Lopez-Calderon & Luck 2014) verarbeitet und ausgewertet. Die Rohdaten (EEG-Ableitungen und Trigger) wurden in EEGLAB importiert und als Referenz der Durchschnitt beider Mastoid-Elektroden gesetzt. Aus den EOG-Elektroden wurde durch Bildung von Differenzen zwei neue Kanäle erzeugt, um horizontale und vertikale Augenbewegungen darzustellen. Ein Bandpassfilter von 0.1 bis 35 Hz, sowie ein Notchfilter bei 50 Hz wurden hinzugefügt und die Abtastrate von 1000

Hz auf 250 Hz konvertiert. Im nächsten Schritt wurde eine *Independent Component Analysis* (ICA) vom Typ *jader*, implementiert in EEGLAB, durchgeführt. Die durch die ICA extrahierten einzelnen Komponenten wurden anschließend nach ihrer zeitlichen und örtlichen Verteilung begutachtet. Komponenten, welche einem Muskel- oder Augenbewegungsartefakt entsprachen, konnten so erkannt und entfernt werden. Während des Verwerfens dieser ICA-Komponenten wurde in Zwischenschritten durch visuelle Überprüfung der kontinuierlichen Daten die Entfernung der Artefakte kontrolliert.

Anschließend wurden mit Hilfe der mit dem EEG aufgezeichneten Trigger, auch *Eventcodes* genannt, verschiedene *Epochen* erzeugt. Aufgezeichnete Eventcodes während der Bearbeitung der Aufgaben waren Start, Pausen und Ende des PASAT, korrekter oder falscher Tastendruck der Versuchsperson, sowie die Art des FB, grün oder rot, was immer zeitgleich mit der neu präsentierten Zahl erschien.

Bei der Kontrollbedingung FBO gab es als Eventcodes nur die Farbe des FB, sowie Start, Pause und Ende, da vom Probanden keine Reaktion zu erfolgen hatte und keine Zahlen über Kopfhörer präsentiert wurden.

Für FBO und PASAT mit FB wurde als Zeitpunkt  $t = 0$  der Eventcode des FB gewählt, da dieser das zu untersuchende Ereignis darstellt, zu dem die Potentiale korreliert werden sollen. Beginn und Ende der einzelnen Epochen wurden als -100 ms und +1000 ms Abstand zum Zeitpunkt  $t = 0$  (FB) definiert. So wurde das kontinuierliche EEG jeweils in einzelne Abschnitte unterteilt, abhängig vom gegebenen roten oder grünen FB.

Es wurden nur Epochen mit vorher erfolgtem Tastendruck in die Wertung mit einbezogen, um sicher zu gehen, dass die roten FB für die Versuchsperson auch wirklich die Bedeutung „das war falsch“ beinhalten. Rotes FB, vor welchem kein Tastendruck erfolgt war, wurde bei der Erstellung der Epochen außer Acht gelassen, da die Probanden in dem Moment erwartet haben könnten, gleich ein rotes FB präsentiert zu bekommen, und deshalb die Bedeutung des FB in der Auswertung in diesem Fall schwerer zu interpretieren ist.

Eine Übersicht über die gemittelten Gesamtzahlen von grünem und roten FB während der Bearbeitung des PASAT und der roten FB mit vorher erfolgter Eingabe ist in Tab. 1 dargestellt.

*Tab. 1: Gesamtzahl grüner und roter FB Epochen während Bearbeitung des PASAT*

	Mittelwert	Standardabweichung
Gesamtzahl grüner FB im PASAT	113.04	31.32
Gesamtzahl roter FB im PASAT	125.33	7.89
Gesamtzahl roter FB im PASAT mit vorher erfolgter Eingabe	52.42	19.68

Im Anschluss der Einteilung der Epochen wurden verbliebene Artefakte identifiziert und die betroffenen Epochen markiert, um sie aus der Erzeugung der ERP auszuschließen. Diese Artifact Rejection wurde durchgeführt, wenn in einem Kanal einer Epoche die Grenzen von -65 bis 65  $\mu\text{V}$  überschritten wurden. Eine Versuchsperson musste danach ausgeschlossen werden, da im PASAT 99.4 % der Epochen markiert wurden. In Tab. 2 ist dargestellt, wie viel Prozent der Epochen unter den restlichen 24 Teilnehmern für die beiden Bedingungen im Mittel ausgeschlossen wurden. Bei der Kontrollbedingung FBO wurden, wohl aufgrund der ruhigeren Testbedingungen, da keine Eingaben gemacht werden mussten, weniger Epochen verworfen.

In Tab. 3 sind die absoluten Zahlen der für die Erstellung der ERP akzeptierten Epochen im Mittel angegeben.

*Tab. 2: Übersicht der durch die Artifact Rejection ausgeschlossenen Epochen in Prozent*

	Mittelwert	Standardabweichung
PASAT grünes FB ausgeschlossen in %	4.12	5.49
PASAT rotes FB ausgeschlossen in %	4.6	5.27
FBO grünes FB ausgeschlossen in %	2.57	4.67
FBO rotes FB ausgeschlossen in %	3.6	6.78

*Tab. 3: Übersicht der für die Erstellung der ERP zugelassenen Epochen*

	Mittelwert	Standardabweichung
PASAT grünes FB akzeptierte Epochen	108.75	31.94
PASAT rotes FB akzeptierte Epochen	51.88	18.55
FBO grünes FB akzeptierte Epochen	74.83	6.06
FBO rotes FB akzeptierte Epochen	74.21	7.33

Anschließend wurden durch mathematisches Mitteln der einzelnen Epochen in ERPLAB die ERP für jede einzelne Versuchsperson erzeugt, welche als Kurven der Reaktion auf das grüne bzw. rote FB für PASAT und FBO dargestellt werden konnten.

Die mittleren Amplituden der Komponenten N1 und P2 wurden aus diesen Kurven mit Hilfe des Measurement Tools in ERPLAB innerhalb der Messgrenzen und durch die Elektroden wie sie in Tab. 4 angegebenen sind, gemessen. Diese Daten wurden zur weiteren Analyse in ein Statistikprogramm eingepflegt.

Die Messgrenzen und Ableitungselektroden wurden in Anlehnung an die beschriebene Zeitintervalle der Komponenten in der Literatur (Luck & Hillyard 1993; Luck & Kappenman 2013) gesetzt.

*Tab. 4: Festgelegte zu untersuchenden Komponenten der ERP mit Messgrenzen und Ableitungsorten*

Komponente	Messgrenzen in ms	Ableitungselektroden
N1	60 – 100	FCz
P2	100 – 200	Cz

Die Messgrenzen und die Lokalisation der maximalen Amplituden der Komponenten wurden anhand von *Grand Averages* (GA) ermittelt. GA sind interindividuell gemittelte ERP, sie zeigen also den Durchschnitt aus den ERP aller Probanden.

Für die Analyse der Komponenten wurde festgelegt, die ERP der Kontrollbedingung FBO von denen des PASAT mit FB abzuziehen und Difference Waves zu bilden (siehe Kapitel 2.4.2 PASAT).

Dies wurde zum einen rein mathematisch für die Werte jedes einzelnen Probanden durchgeführt (siehe Kapitel 2.6.2 Statistische Analyse), zum anderen wurden zur grafischen Darstellung die GA der Kontrollbedingung FBO von denen des PASAT mit FB abgezogen. Anhand den aus den GA erstellten Kurven, welche den zeitlichen Verlauf des elektrischen Potentials aufzeigen, und den dazugehörigen *Scalp Maps*, welche die topografische Verteilung der Potentiale an der Kopfoberfläche darstellen, konnte für jede Komponente die Lokalisation der maximalen Amplitude bestimmt werden.



Zur grafischen Darstellung der Kurven wurde als Einheit der x-Achse die Zeit in ms von -100 bis 1000, als Einheit der y-Achse die Spannung in  $\mu\text{V}$  von -4 bis 10 gewählt.

### 2.6.2 Statistische Analyse

Die Angaben aus dem Anamnesebogen, EHI, ZNT, TMT-A/B, MWT-B und SLE, wurden in eine Tabelle der Statistiksoftware *SPSS* (IBM SPSS Statistics Version 24) übertragen. Die neuropsychologischen Fragebögen und die SLE wurden mithilfe deskriptiver Statistik (Bildung von Mittelwerten, Median und Standardabweichung) untersucht. Aus den automatisch erstellten Tabellen über die Eingaben im PASAT wurde die Anzahl der korrekten Eingaben als Parameter über die Leistung in der Aufgabe ebenfalls in SPSS eingepflegt.

Aus ERPLAB wurde die absolute Anzahl der roten und grünen FB-Epochen sowie die Anzahl und die Prozentangaben der durch die Artifact Rejection von der Erstellung der ERP ausgenommenen Epochen des PASAT mit FB übertragen. Die mittleren Amplitudenwerte der zu untersuchenden Komponenten N1 und P2 von PASAT mit FB und FBO wurden in SPSS eingefügt und zur Erstellung der neuen Variable die Kontrollbedingung FBO von den Zielwerten des PASAT mit FB abgezogen (siehe auch 2.6.1 elektrophysiologische Datenverarbeitung). Die Unterschiede wurden durch den T-Test für verbundene Stichproben getestet. Die Korrelation der Amplitudenveränderungen mit der Leistung im PASAT anhand der Anzahl korrekter Trials wurde nach Pearson durchgeführt.

Es erfolgten T-Tests bei verbundenen Stichproben, um Unterschiede in der absoluten Anzahl der FB-Epochen und der Anzahl verwendeter akzeptierter Epochen zu untersuchen. Ebenso erfolgten T-Tests bei verbundenen Stichproben, um den Unterschied der aufgrund von Artefakten verworfenen Epochen für grünes und rotes FB während des PASAT mit FB und bei der Kontrollbedingung FBO auf Signifikanz zu prüfen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Deskription der Daten

##### 3.1.1 Matheleistung

Die Probanden wurden nach ihrer Mathematik-Abschlussnote der Schule befragt in der 15-Punkte-Skala der gymnasialen Oberstufe. Hier ergab sich ein Median von  $Md = 10$  Punkten ( $SD = 2.84$ ). Die schriftliche Matheleistung im Abitur bzw. der Abschlussprüfung ergab einen Median von  $Md = 11$  Punkten ( $SD = 3.53$ ). Als subjektive Einschätzung der aktuellen Mathematikleistung wurden die Personen gebeten einen Wert auf einer Likert-Skala von 1 bis 7 zu markieren. Hier ergab sich ein Median von  $Md = 3.5$  ( $SD = 1.39$ ).

##### 3.1.2 Neuropsychologische Fragebögen

Im Test Zahlen nachsprechen konnte für die Zahlenspannen vorwärts und rückwärts jeweils eine Maximalpunktzahl von zwölf Punkten erreicht werden. Das Ergebnis des ZNT war  $M = 8.33$  ( $SD = 1.95$ ) für vorwärts und  $M = 7.38$  ( $SD = 2.2$ ) für rückwärts.

Die mittlere Bearbeitungszeit für den Trail-Making-Test-A betrug in Sekunden  $M = 23.12$  ( $SD = 7.55$ ) und für den TMT-B  $M = 50.28$  ( $SD = 12.51$ ).

Die mittlere Gesamtpunktzahl im Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest-B war  $M = 29.29$  ( $SD = 3.53$ ), bei einer möglichen Maximalpunktzahl von 37. Daraus ergibt sich im Mittel ein Prozentrang von  $M = 66.82$  ( $SD = 21.45$ ) mit einem zugehörigen IQ-Äquivalent von  $M = 108.58$  ( $SD = 12.63$ ) Punkten.

##### 3.1.3 PASAT-Leistung

Die Leistung im PASAT wurde anhand der Anzahl der korrekten Eingaben gemessen. Diese betrug im Mittel  $M = 114.46$  ( $SD = 31.71$ ). Der beste Teilnehmer hatte 168 richtige Eingaben, der schlechteste 47. Die Anzahl der grünen FB als Parameter der PASAT-Leistung entspricht nicht genau der Anzahl der korrekten Eingaben. Am Ende jedes der drei Blöcke erfolgte eine letzte Eingabe vom Probanden, jedoch wurde kein FB zeitgleich mit einem neuen Zielstimulus mehr präsentiert. Es wurde sich dafür entschieden, diese letzte Eingabe als Abbild der PASAT-Leistung mit zu erfassen, davon ausgehend, dass dieser Wert sensitiver ist als die Anzahl der grünen FB.

### 3.2 Ergebnisse der abhängigen Variablen

#### 3.2.1 Subjektive Leistungseinschätzung

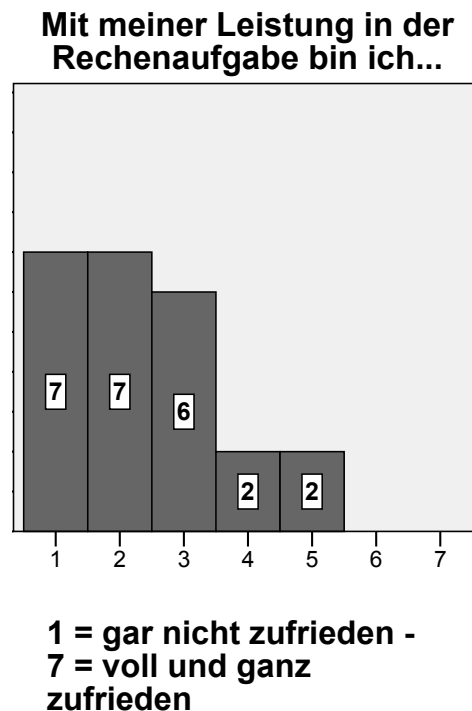
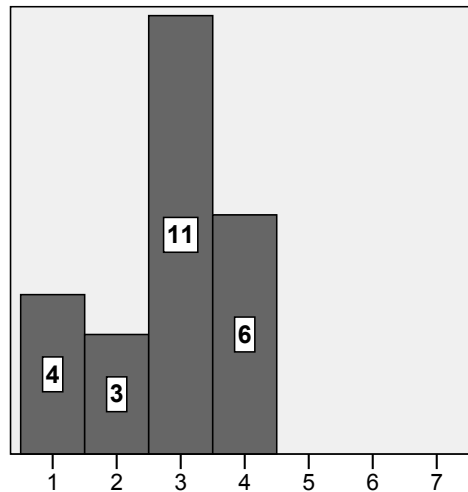


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung über die Angaben zur ersten Aussage der SLE auf einer 7-Punkte-Likert-Skala. Oberhalb der Grafik die Aussage, Balken mit Zahlen zeigen Häufigkeit der Antwort, x-Achse Art der Antwort, Erläuterung der Art der Antwort unterhalb der Grafik.

Die erste Aussage der SLE, die nach Angabe der Zufriedenheit über die eigene Leistung im PASAT verlangt, wurde auf einer Skala von „1“ (*gar nicht zufrieden*) bis „7“ (*voll und ganz zufrieden*) im Median mit  $Md = 2$  ( $SD = 1.25$ ) angegeben. Sieben Probanden gaben mit dem Maximalwert „1“ an, gar nicht zufrieden zu sein. Sieben weitere Probanden gaben „2“ an, was einer überwiegenden Unzufriedenheit mit der Leistung entspricht, sechs Versuchspersonen gaben mit „3“ an, eher unzufrieden zu sein, jeweils zwei Studienteilnehmer gaben mit „4“ und „5“ an, weder zufrieden noch unzufrieden, bzw. eher zufrieden zu sein. Abbildung 5 zeigt eine grafische Veranschaulichung dieser Daten.

**Im Vergleich zu anderen  
Studienteilnehmern schätze  
ich meine Leistung in der  
Rechenaufgabe als...**

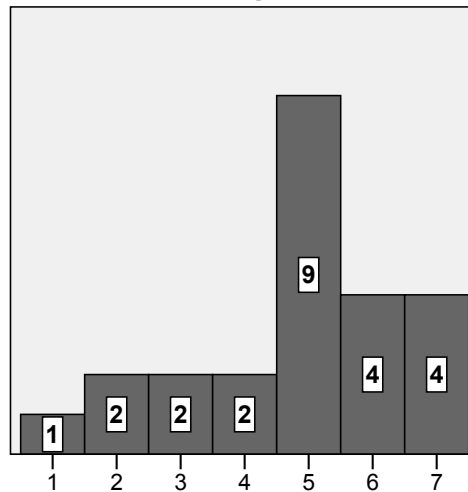


**1 = schlechter ein -  
7 = besser ein**

*Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung über die Angaben zur zweiten Aussage der SLE auf einer 7-Punkte-Likert-Skala. Oberhalb der Grafik die Aussage, Balken mit Zahlen zeigen Häufigkeit der Antwort, x-Achse Art der Antwort, Erläuterung der Art der Antwort unterhalb der Grafik.*

Die zweite Frage nach der Einschätzung der eigenen Leistung im Vergleich zu anderen Studienteilnehmern auf einer Skala von „1“ (*schlechter*) bis „7“ (*besser*) wurde im Median mit  $Md = 3$  ( $SD = 1.02$ ) beantwortet. Vier Probanden gaben mit dem Maximalwert „1“ an, sich schlechter im Vergleich zu anderen Teilnehmern einzuschätzen, drei Versuchspersonen gaben „2“ an, was einer überwiegend schlechten Einschätzung entspricht. Der Großteil der Teilnehmer, 11 Personen, gaben „3“ an, was einer eher schlechten Einschätzung entspricht. Die restlichen sechs Probanden sahen ihre Leistung als weder schlechter noch besser im Vergleich zu anderen Studienteilnehmern an. Abbildung 6 zeigt eine grafische Darstellung dieser Einschätzungen.

### Der Ärger über meine Fehler in der Rechenaufgabe hat mich abgelenkt



**1 = trifft überhaupt nicht zu -  
7 = trifft voll und ganz zu**

Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung über die Angaben zur dritten Aussage der SLE auf einer 7-Punkte-Likert-Skala. Oberhalb der Grafik die Aussage, Balken mit Zahlen zeigen Häufigkeit der Antwort, x-Achse Art der Antwort, Erläuterung der Art der Antwort unterhalb der Grafik.

Die letzte Aussage der SLE darüber, dass der Ärger über seine Fehler in der Aufgabe den Probanden abgelenkt haben, wurde auf einer Skala von „1“ (*trifft überhaupt nicht zu*) bis „7“ (*trifft voll und ganz zu*) im Median mit  $Md = 5$  ( $SD = 1.66$ ) angegeben. Eine Versuchsperson gab mit „1“ an, dass der Ärger überhaupt nicht abgelenkt hat, zwei Probanden gaben „2“ an, was bedeutet, dass der Ärger überwiegend nicht abgelenkt hat, zwei weitere wählten „3“, dass der Ärger eher nicht abgelenkt hat. Zwei Personen äußerten sich mit „4“ neutral. Der Großteil der Studienteilnehmer gab mit „5“ an, der Aussage über die Ablenkung durch den Ärger eher zuzustimmen. Jeweils vier Personen gaben mit „6“ und „7“ an, dass die Aussage zutrifft bzw. voll und ganz zutrifft. Eine grafische Zusammenstellung der Zustimmungen über die Aussage, dass der Ärger über die Fehler in der Rechenaufgabe abgelenkt hat, ist in Abbildung 7 zu sehen.

#### 3.2.2 Ereigniskorrelierte Potentiale im Überblick

im Folgenden sind die GA von FBO und PASAT mit FB aus den gemittelten Reizantworten der centro-parietalen Ableitungselektroden (Cz, CPz, Pz, CP1,

CP2) dargestellt, um einen generellen Überblick über die ERP nach Farb- bzw. FB-Präsentation zu bekommen.

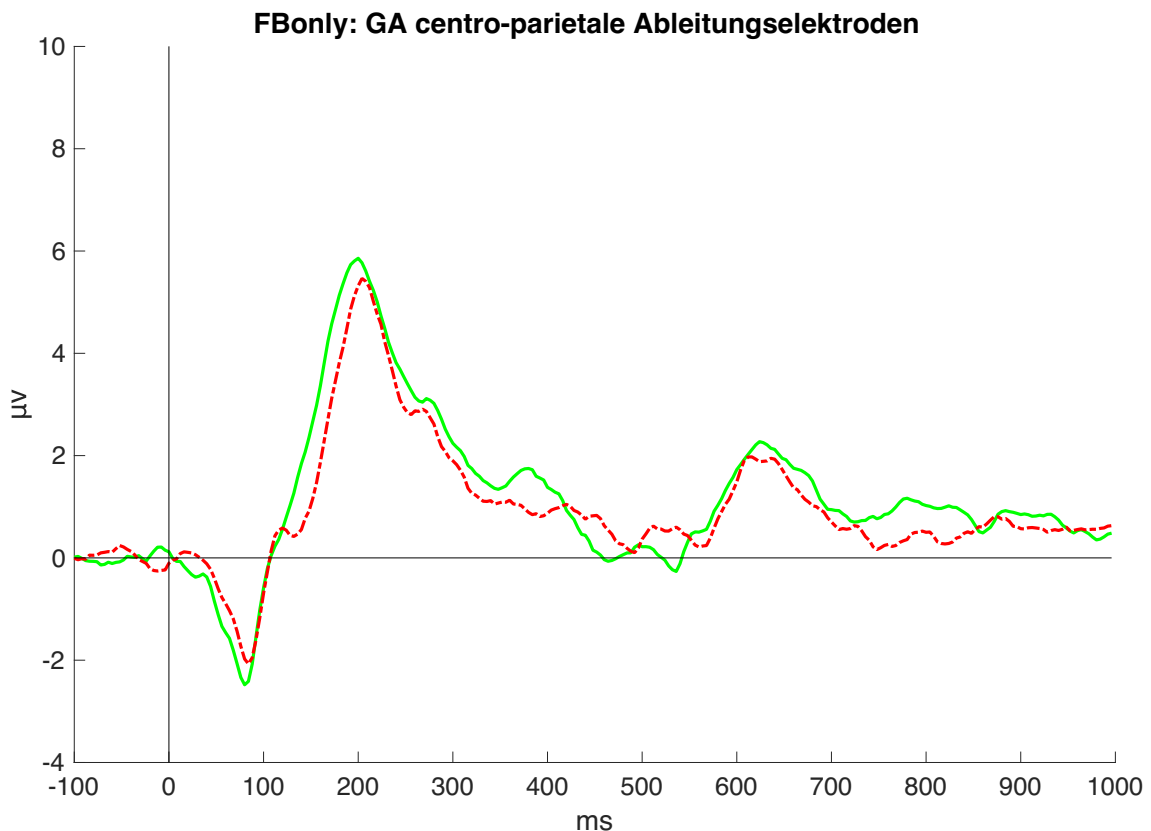


Abbildung 8: Übersicht über ERP bei FBO als GA aller Probanden aus centro-parietalen Ableitungselektroden. Die grüne Linie zeigt das ERP nach grünem Licht, die rot-gestrichelte Linie das nach rotem Licht. Y-Achse Spannung in  $\mu\text{V}$ , x-Achse Zeit in ms.

In Abb. 8 ist die elektrophysiologische Reaktion auf die Farben Rot und Grün, wie sie in der Durchführung der Kontrollbedingung FBO präsentiert wurden, als GA aus allen Versuchspersonen, zu sehen. Es handelt sich hier nicht um eine FB-Präsentation in dem Sinne, sondern nur um die Präsentation der Farben rot und grün als Kontrollbedingung (siehe Kapitel 2.4.2 und 2.5.2).

Ein erster negativer Peak mit  $-2.48$  bzw.  $-2.07 \mu\text{V}$  für Grün bzw. Rot tritt nach 80 bzw. 84 ms auf.

Der zweite positive Peak befindet sich mit  $5.86$  bzw.  $5.46 \mu\text{V}$  für Grün bzw. Rot bei 200 bzw. 204 ms. Ein weiterer positiver Peak könnte man mit  $2.27$  bzw.  $1.97 \mu\text{V}$  bei 624 bzw. 616 ms für Grün bzw. Rot festmachen.

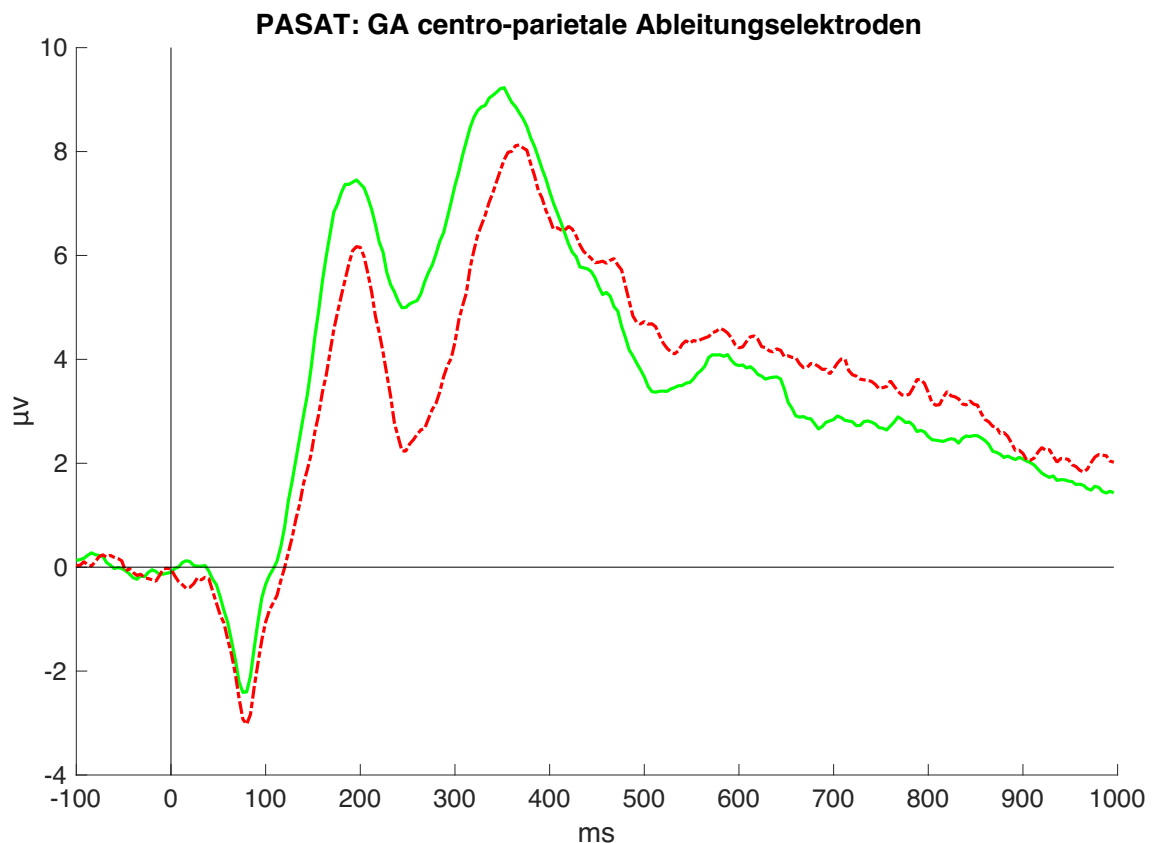


Abbildung 9: Übersicht über ERP bei PASAT als GA aller Probanden aus centro-parietalen Ableitungselektroden. Die grüne Linie zeigt das ERP nach grünem FB, die rot-gestrichelte Linie das nach rotem FB. Y-Achse Spannung in  $\mu\text{V}$ , x-Achse Zeit in ms.

In Abb. 9 ist die elektrophysiologische Reaktion auf das FB während der Bearbeitung des PASAT als GA aus allen Probanden zu sehen. Ein erster negativer Peak zeigt sich mit  $-2.41$  bzw.  $-3.02 \mu\text{V}$  nach  $76$  bzw.  $80$  ms für Grün bzw. Rot, ein erster positiver mit  $7.45$  bzw.  $6.17 \mu\text{V}$  nach jeweils  $196$  ms. Ein zweiter negativer Peak stellt sich mit  $4.99$  bzw.  $2.24 \mu\text{V}$  nach  $244$  bzw.  $248$  ms für Grün bzw. Rot, ein zweiter positiver Peak mit  $9.23$  bzw.  $8.13 \mu\text{V}$  nach  $352$  bzw.  $369$  ms dar.

Wie im Einleitungsteil beschrieben, wurden für die Untersuchungen die einzelnen ERP der Kontrollbedingung FBO von denen des PASAT mit FB abgezogen, um die rein emotionale Bedeutung des FB zu extrahieren. Alle folgenden Ergebnisse basieren auf dieser Differenz, was von wesentlicher Bedeutung ist. Die folgenden Scalp Maps und Kurven zu den einzelnen Komponenten sind gebildet aus Difference Waves (ERP PASAT mit FB abzüglich ERP FBO), gemittelt als GA aus allen Probanden.

### 3.2.3 Komponente N1

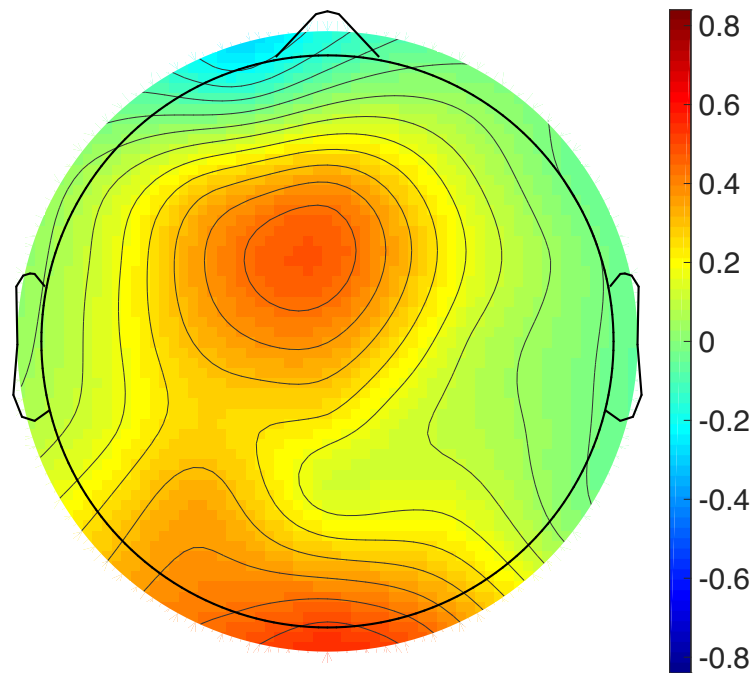


Abbildung 10: Topografische Verteilung der an der Kopfhaut abgeleiteten elektrischen Aktivität 60 – 100 ms nach positivem grünem FB. Skala in  $\mu\text{V}$ .

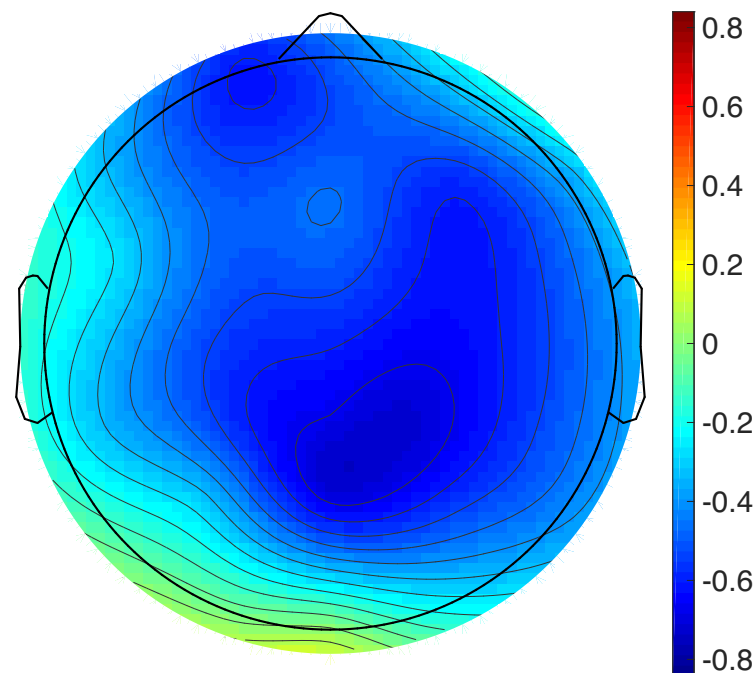


Abbildung 11: Topografische Verteilung der an der Kopfhaut abgeleiteten elektrischen Aktivität 60 – 100 ms nach negativem rotem FB. Skala in  $\mu\text{V}$ .



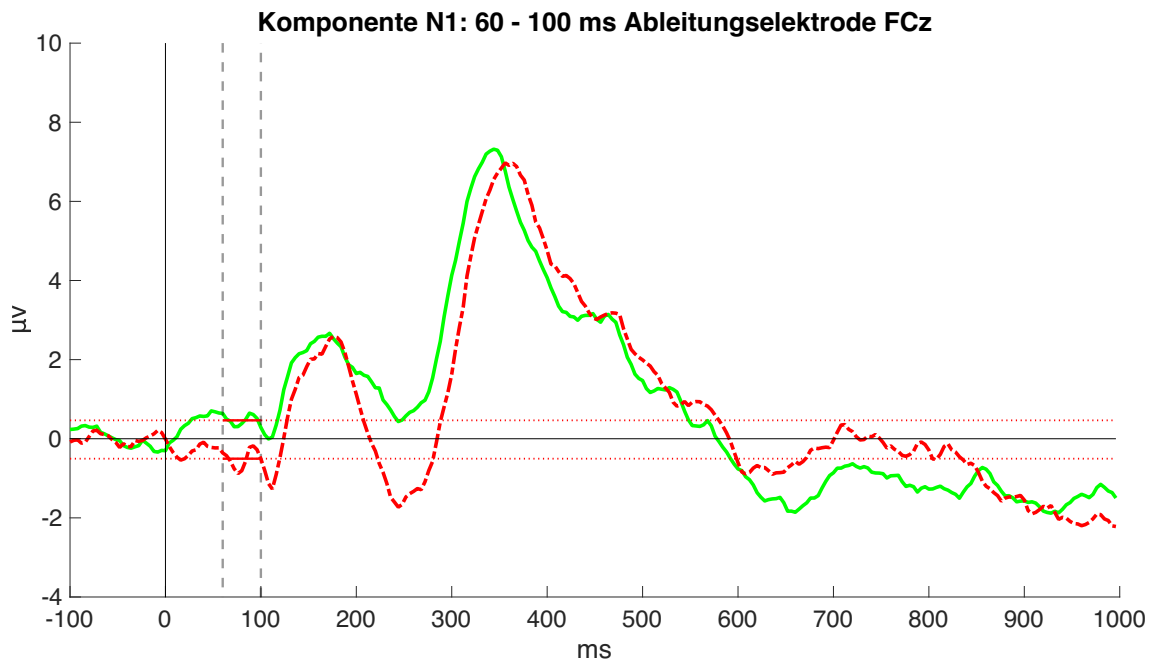


Abbildung 12: Difference Wave (ERP PASAT mit FB abzüglich ERP FBO) als GA aus allen Probanden. Grüne Kurve entspricht Reaktion nach positivem FB, rot gestrichelte nach negativem FB. Grau gestrichelte Linie markiert Messgrenzen 60 – 100 ms auf der x-Achse, rot gepunktete Linie mittlere Amplituden in  $\mu\text{V}$  für Grün und Rot auf y-Achse.

In den Scalp Maps (Abb. 10 und 11) ist die topografische Verteilung der an der Kopfhaut abgeleiteten elektrischen Aktivität jeweils 60 – 100 ms nach positivem und negativem FB abgebildet. Zu sehen ist nach positivem FB eine überwiegend positive elektrische Spannung mit zwei runden Arealen vermehrt positiver Aktivität, einmal fronto-zentral und etwas nach links verlagert, parietal.

Die mittleren Amplituden der N1, dargestellt in Abb. 12 in den Messgrenzen 60 – 100 ms, gemessen durch die Elektrode FCz, betragen, wiederum im Mittel aus allen Probanden,  $M = 0.47 \mu\text{V}$  ( $SD = 2.41$ ) für positives bzw.  $M = -0.50 \mu\text{V}$  ( $SD = 1.77$ ) für negatives FB, siehe Abb. 12, die geraden roten Linien entsprechen den errechneten Mittelwerten.

Der T-Test für verbundene Stichproben zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen der elektrischen Aktivität nach negativem und positivem FB ( $t(23) = 2.41, p = .043$ ).

Die Differenzen der mittleren Amplituden der N1 und die Leistung im PASAT anhand der Anzahl korrekter Eingaben korrelierten nicht miteinander ( $r = 0.06, p = .780$ ),  $R^2 = 0.004$ , siehe Abb. 13.

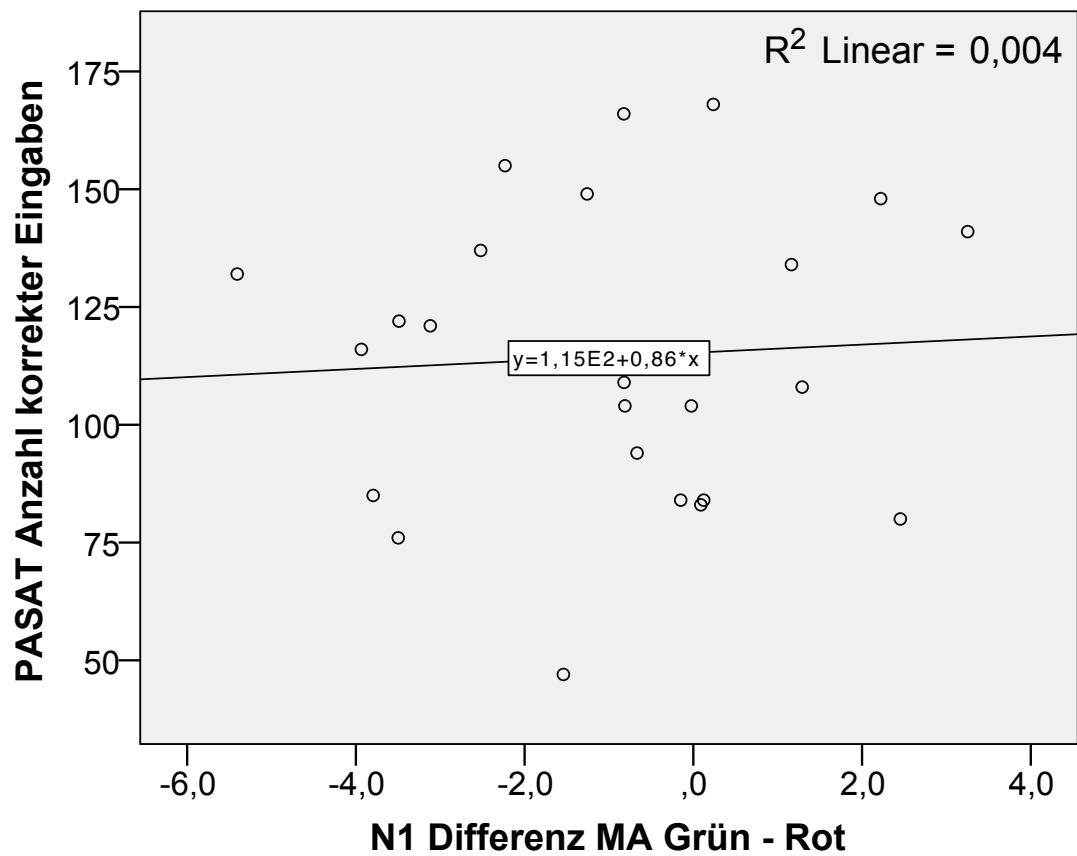


Abbildung 13: Punktediagramm der PASAT-Leistung auf der y-Achse und der Differenz Grün abzüglich Rot der mittleren Amplituden der N1 auf der x-Achse mit Regressionsgerade.

### 3.2.4 Komponente P2

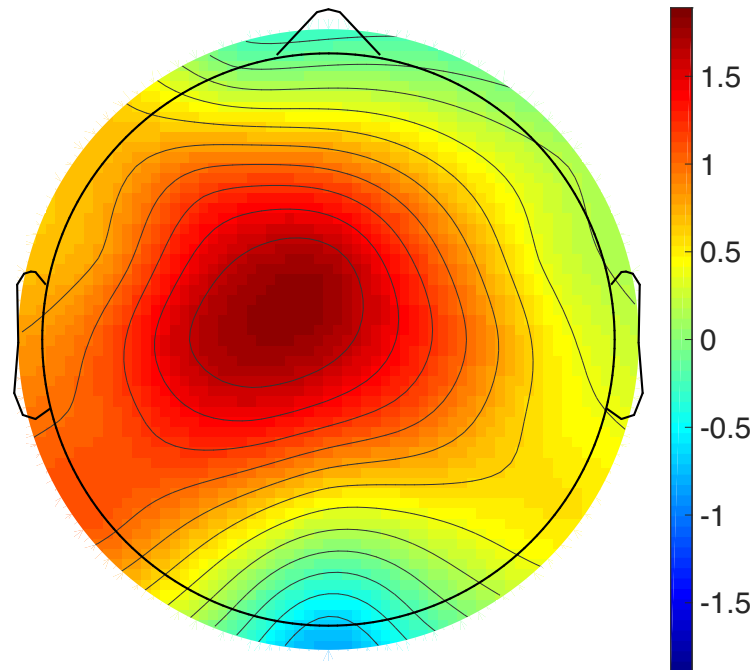


Abbildung 14: Topografische Verteilung der an der Kopfhaut abgeleiteten elektrischen Aktivität 100 – 200 ms nach positivem grünem FB. Skala in  $\mu V$ .

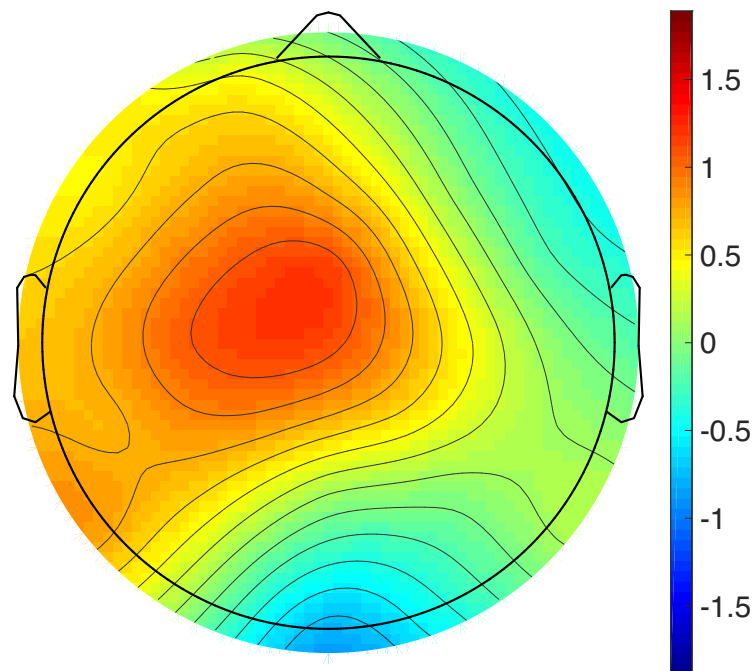


Abbildung 15: Topografische Verteilung der an der Kopfhaut abgeleiteten elektrischen Aktivität 100 – 200 ms nach negativem rotem FB. Skala in  $\mu V$ .

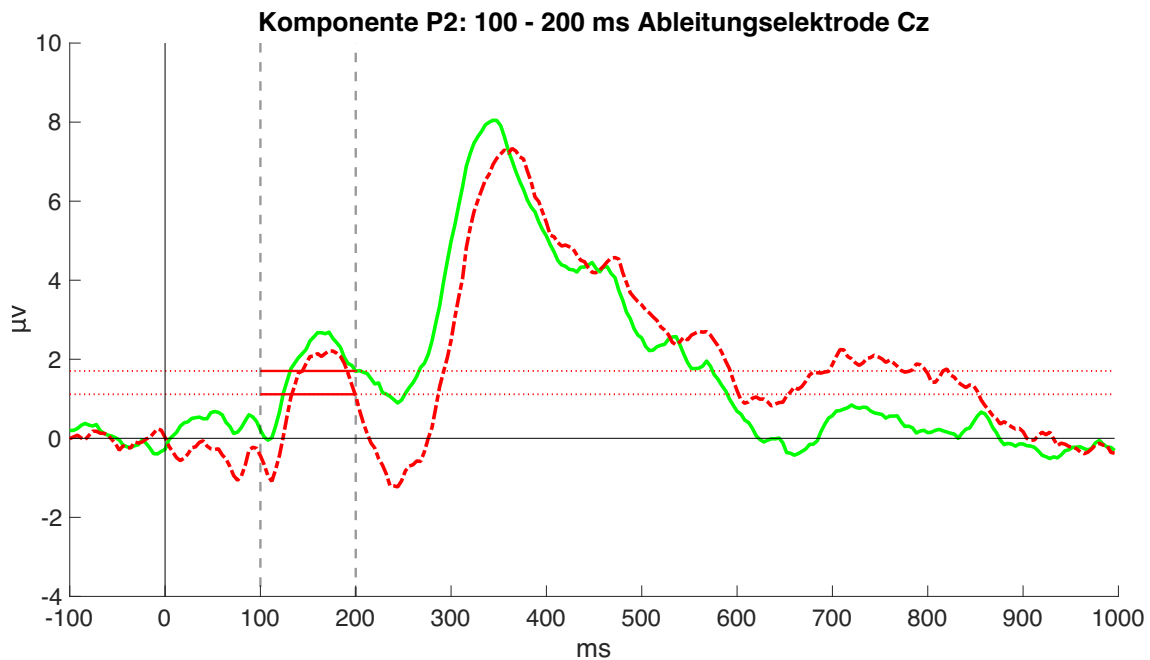


Abbildung 16: Difference Wave (ERP PASAT mit FB abzüglich ERP FBO) als GA aus allen Probanden. Grüne Kurve entspricht Reaktion nach grünem FB, rot gestrichelte nach rotem FB. Grau gestrichelte Linie markiert Messgrenzen 100 – 200 ms auf der x-Achse, rot gepunktete Linie mittlere Amplituden in  $\mu\text{V}$  für Grün und Rot auf y-Achse.

Die Scalp Maps in Abb. 14 und 15 zeigen die topografische Verteilung der an der Kopfhaut abgeleiteten elektrischen Aktivität jeweils 100 – 200 ms nach positivem und negativem FB. Zu sehen ist eine zentrale, vermehrt nach links verlagerte positive Aktivität 100 – 200 ms nach positivem FB. Eine ähnliche Verteilung, jedoch niedrigerer Positivität zeigt sich in Abb. 15 100 – 200 ms nach negativem FB.

Die mittleren Amplituden der P2 in den Messgrenzen 100 – 200 ms, gemessen durch die Elektrode Cz, betragen, wiederum im Mittel aus allen Probanden,  $M = 1.70 \mu\text{V}$  ( $SD = 2.74$ ) für positives bzw.  $M = 1.11 \mu\text{V}$  ( $SD = 2.43$ ) für negatives FB, siehe Abb. 16, die geraden roten Linien entsprechen den errechneten Mittelwerten. Der T-Test für verbundene Stichproben zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen negativem und positivem FB ( $t(23) = 1.39, p = .178$ ).

Die Differenzen der mittleren Amplituden der P2 und die Leistung im PASAT anhand der Anzahl korrekter Eingaben korrelierten schwach positiv, aber nicht signifikant miteinander ( $r = 0.172, p = .421, R^2 = 0.03$ , siehe Abb. 17).

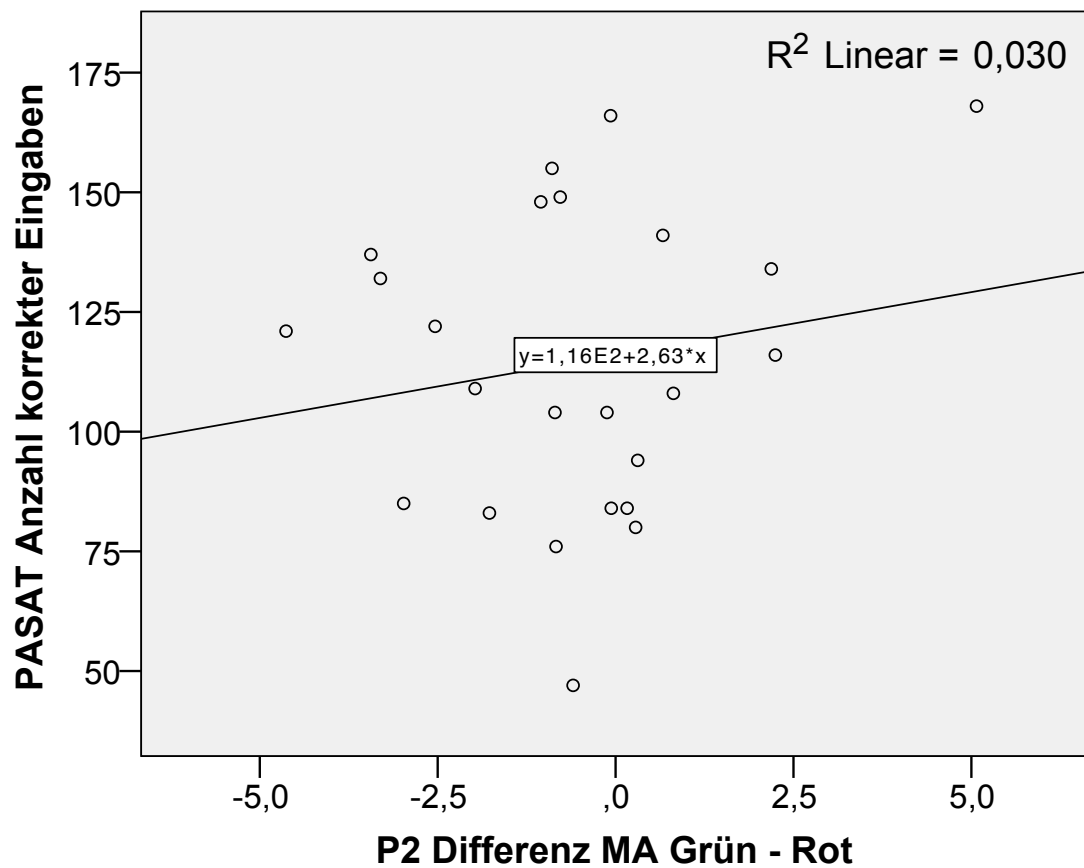


Abbildung 17: Punktediagramm der PASAT-Leistung auf der y-Achse und der Differenz Grün abzüglich Rot der mittleren Amplituden der P2 auf der x-Achse mit Regressionsgerade.

## 4 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden zunächst die deskriptiven Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert.

Anschließend werden die Ergebnisse der SLE sowie die ERP Komponenten N1 und P2, wie sie in dieser Studie erfasst wurden, diskutiert und kritisch beurteilt. Zum Abschluss werden Grenzen der Arbeit aufgezeigt, Schlussfolgerungen gezogen und Ausblicke auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten gegeben.

### 4.1 Interpretation der deskriptiven Ergebnisse

Die Matheleistungen der Probanden waren anamnestisch, bis auf einen Teilnehmer, auf Abiturniveau. Keine der Matheabschlussnoten wurde unter fünf Punkten (ausreichend) angegeben. Der ZNT wurde in einer verkürzten Version verwendet, um sicher zu stellen, dass die Merkfähigkeit von Zahlen für den PASAT in ausreichendem Maß vorhanden war. Davon kann ausgegangen werden, denn auch die schwächeren Teilnehmer in diesem Test konnten sich eine Zahlenreihe von mindestens fünf Ziffern erfolgreich merken.

Die Werte im TMT-A/B entsprechen den Erwartungen und sind für Alter und Bildungsstand der Stichprobe übereinstimmend mit anderen Erhebungen (Tombaugh 2004). Es kann daher von durchschnittlich guter visueller Wahrnehmung, mentaler Flexibilität und exekutiven Funktionen der Versuchspersonen ausgegangen werden. Nach den vorgeschlagenen Intelligenzstufen im MWT-B Manual war die Stichprobe mit  $M = 108.58$  IQ-Punkten ( $SD = 12.63$ ) von durchschnittlicher Intelligenz, knapp an der Grenze zu hoher Intelligenz, welche ab 110 IQ-Punkten vorliegt. Die Leistung im PASAT war individuell unterschiedlich. Die Anzahl korrekter Eingaben war recht weit gestreut, was nicht zuletzt an der Anpassung des ISI liegt. Diese Anpassung verstärkt die Streuung, da ohnehin schon gute Teilnehmer mehr Trials in gleicher Zeit präsentiert bekommen und somit eine höhere Anzahl korrekter und inkorrekt eingaben machen können. Deshalb ist wiederum die Anzahl korrekter Eingaben als Parameter für die Leistung sehr sensitiv.

#### 4.2 Subjektive Leistungseinschätzung

Die Ergebnisse der SLE bestätigen vorhergegangene Befunde, dass die Bearbeitung des PASAT Ärger und Unzufriedenheit hervorruft (Plewnia, Schroeder, Kunze, u. a. 2015; Lejuez u. a. 2003; Holdwick & Wingefeld 1999). In Abb. 7 ist zu erkennen, dass keine einzige Versuchsperson mit ihrer Leistung im PASAT voll und ganz oder überwiegend zufrieden war, jedoch jeweils sieben Personen gar nicht zufrieden und überwiegend unzufrieden waren. Im Median ergab sich eine überwiegende Unzufriedenheit mit der Leistung im PASAT. Kein einziger Proband schätzte sich als besser im Vergleich zu den anderen Studienteilnehmern ein. Nur sechs Teilnehmer gaben an, sich als gleich gut einzuschätzen, im Median wurde die Einschätzung über die Leistung als eher schlechter angegeben. Der Aussage, dass der Ärger über die Fehler in der Rechenaufgabe abgelenkt hat, wurde im Median mit 5 eher zugestimmt. Dass das FB emotional ablenkend wirkt, wurde dahingehend vom Großteil der Probanden bestätigt, da davon auszugehen ist, dass die Teilnehmer gar nicht sicher von ihren Fehlern hätten wissen können, oder zumindest während der Bearbeitung des PASAT kaum Zeit gehabt hätten, sich über diese zu ärgern, wenn sie diese durch die FB-Gabe wiederum nicht vorgehalten bekommen hätten.

Beide Aussagen zu Zufriedenheit mit der Leistung und Einschätzung der Leistung im Vergleich zu anderen Teilnehmern schlugen mit deutlicher Tendenz negativ aus. Das bestätigt, dass die Aufgabe als fordernd wahrgenommen wurde. Eine wesentliche Eigenschaft der verwendeten 2-back PASAT Version ist die Adaption an die Leistung, sodass auch leistungsstarke Versuchspersonen irgendwann an ihre Leistungsgrenze kommen und ähnlich viel, bzw. total gesehen mehr rotes FB aufgrund von Fehlern, durch Verkürzung des ISI, präsentiert bekommen. So ist gut zu verstehen, dass sich alle Teilnehmer als nicht besser im Vergleich zu anderen einschätzten und keine große Zufriedenheit mit der eigenen Leistung zeigten.

Zusammengefasst bestätigen die Erkenntnisse, welche aus der SLE gezogen werden können, bisherige Studien zur Bedeutung des 2-back PASAT als fordernde und frustrierende Arbeitsgedächtnisaufgabe. Die Ergebnisse legen

zudem nahe, dass in der Bearbeitung der Aufgabe das Negative dem Positiven überwiegt und bekräftigen damit die Theorie über das Vorliegen eines negativity bias, also einer stärkeren Tendenz in Richtung des Negativen.

#### 4.3 Komponente N1

Die N1 ist in der Kontrollbedingung FBO (siehe Abb. 8) jeweils für rotes und grünes FB deutlich als negativer Peak mit über 2  $\mu\text{V}$  nach ca. 80 ms zu erkennen. In Abbildung 9, welche die neuronale Aktivität nach rotem und grünem FB während der Bearbeitung des PASAT aufzeigt, ist zu erkennen, dass die rote Kurve unterhalb der grünen Kurve und damit negativer verläuft. Nach Bildung der Difference Waves, dem Abzug der Aktivität bei FBO nach grünem und rotem FB von derer des PASAT mit FB zeigt sich die N1 weiterhin negativer für negatives FB (siehe Abb. 12). Der in den Scalp Maps (siehe Abb. 10 und 11) grafisch dargestellte Unterschied ist frontal unter der Ableitungselektrode FCz am größten.

In der Literatur ist die anteriore visuelle N1 häufig bei Cz, also etwas weiter parietal, maximal. Die Auswahl der Ableitungselektrode und der Messgrenzen erfolgte abhängig von den vorliegenden Daten, da für die N1 mehrere Subkomponenten zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Lokalisationen in der Literatur beschrieben sind. Jedoch passte die gemessene anterior-superiore Negativität gut zur N1, wie sie beispielsweise von Vogel und Luck mit Peak bei ca. 100 ms beschrieben wurde (Vogel & Luck 2000).

Die N1 zeigt sich in den Ergebnissen für negatives FB mit signifikant höherem Ausschlag, im Mittel negativer um 0.97  $\mu\text{V}$  im Vergleich zur Aktivität nach positivem FB. Das passt zu der Vorstellung, dass die N1 eine neuronale Signatur emotional bedeutender visueller Stimuli darstellt, da sie sich nach Abzug der reinen Farbinformation noch immer in der Amplitude unterscheidet, als Abbild der zueinander in Kontrast stehenden, inhaltlichen Bedeutungen der beiden FB.

Die Ursache des gemessenen Unterschieds kann nicht mit letzter Gewissheit belegt werden. Zum einen wurde in vorherigen Studien gezeigt, dass die N1 endogene Anteile der selektiven Aufmerksamkeit widerspiegelt (Clark & Hillyard 1996; Hillyard & Münte 1984): für räumlich und farblich erwartete visuelle Stimuli war die Amplitude höher, also negativer, als für unerwartete. Da sich die N1



während der Bearbeitung des PASAT nach negativem FB höher zeigte, würde das der Theorie der selektiven Aufmerksamkeit für erwartete Stimuli nach bedeuten, dass die Teilnehmer nach erfolgtem Tastendruck vermehrt das negative FB erwarteten. Dies wäre prinzipiell denkbar. In Abhängigkeit zum ISI bestanden während der Bearbeitung der Aufgabe jedoch auch Zeitpunkte, z.B. zu Beginn eines Trials, an welchen es die Probanden leichter hatten. In dieser Zeit erwarteten sie nach erfolgter Eingabe wahrscheinlich eher ein positives FB. Da ausreichend Zeit bestand waren sie sich ihrer Eingabe sicher. Zu anderen Zeitpunkten, an welchen das ISI kürzer und die Aufgabe fordernder war, ist dagegen eher davon auszugehen, dass die Testpersonen auch bei erfolgtem Tastendruck ein negatives FB erwarteten. Denkbar ist, dass die Erwartung des negativen FB durch den fordernden Charakter der Aufgabe im Mittel häufiger bestand. Dass die hier gemessene N1 jedoch ausschließlich eine neuronale Signatur für die selektive Aufmerksamkeit auf erwartete Stimuli ist, führt zu kurz. Die N1 reagiert als früheste Komponente bereits auf emotionale Inhalte von visuellen Stimuli. Es konnte gezeigt werden, dass ihre Amplitude nach emotional bedeutenden Bildern höher war als nach neutralen Bildern (Keil u. a. 2001; Keil u. a. 2002; Weinberg & Hajcak 2010; Foti u. a. 2009). Es kann angenommen werden, dass das negative FB eine höhere emotionale Bedeutung hat als das positive FB, da Ärger und Frustration bei der Bearbeitung des PASAT dominieren. Zwar entspricht das positive FB keinem emotional neutralen Stimulus, jedoch scheint es weniger emotional bedeutend zu sein als das negative FB. Durch die Auswertung der SLE in dieser Arbeit und durch Befunde vorhergegangenen Arbeiten mit dem PASAT konnte gezeigt werden, dass negative Erfahrungen bei Bearbeitung der Aufgabe überwiegen (Plewnia, Schroeder, Kunze, u. a. 2015).

Der höhere Ausschlag der Amplitude der N1 für negatives FB scheint demnach eine frühe endogene Reaktion auf dessen höhere emotionale Bedeutung abzubilden. Übereinstimmend mit dieser Erklärung könnte diese höhere N1-Amplitude eine neuronale Signatur eines negativity bias darstellen. Ähnliche Ergebnisse wurden für die N1 bereits insofern beschrieben, dass die Komponente erhöhte Amplituden auf visuelle, emotional negative Stimuli und im

Vergleich zu positiven oder neutralen Stimuli eine verminderte Habituation zeigte (Carretié u. a. 2003), was von den Autoren der Studie als Manifestation eines negativity bias interpretiert wurde.

In der vorliegenden Arbeit ließ sich keine Korrelation zwischen der Höhe der Unterschiede der mittleren Amplituden der N1 und der Leistung im PASAT feststellen. Man könnte das dahingehend interpretieren, dass der negativity bias entweder kompensiert werden kann oder in dieser Phase so wenig kognitive Ressourcen bindet, dass sich keine Effekte auf behavioraler Ebene zeigen. Die N1 könnte den negativity bias im Sinne einer automatischen unbewussten Aufmerksamkeitslenkung in Richtung des negativen FB, hervorgerufen durch dessen hohe emotionale Bedeutung abbilden, ohne dass dieser einen messbaren Einfluss auf leistungsrelevantes Verhalten zeigt. Diese Erkenntnis würde übereinstimmen mit Befunden, welche einen Unterschied beobachteten zwischen frühen ERP-Komponenten unter 300 ms, welche lediglich die Aufmerksamkeitslenkung auf emotionale Stimuli abbilden, und späteren Komponenten über 300 ms, welche tiefere kognitive Prozesse wie eine Aufschlüsselung und Verarbeitung der Bedeutung von Stimuli darstellen (Weinberg & Hajcak 2010). Da jedoch keine vergleichbaren Studien über frühe neuronale Signaturen auf FB-Präsentation während einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe gefunden werden konnten, ist es schwierig, die vorliegenden Befunde in Verbindung mit vorhergegangenen Untersuchungen zu interpretieren. Es wurden Studien, welche die Verarbeitung angstauslösender Bilder während einer Arbeitsgedächtnisaufgabe mittels ERP untersuchten, mit dem Ergebnis durchgeführt, dass erhöhte Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis mit einer Erniedrigung des negativity bias einhergingen (Van Dillen & Derks 2012). Hier konnte für die N1 jedoch keine Veränderung gefunden werden, was die Autoren damit erklärten, dass die Arbeitsgedächtnisleistung generell mit späteren Komponenten wie der N2 und dem LPP wechselwirkt. Diese Erkenntnis stützt den in dieser Arbeit gezeigten Befund, dass der negativity bias durch die N1 abgebildet, keine Auswirkungen auf die Arbeitsgedächtnisleistung hat, weil diese kognitive Verarbeitung später stattfindet.

Zusammengefasst kann gefolgert werden, dass die N1 eine frühe neuronale Signatur des negativity bias darstellen könnte, da sie in der hier ausgewerteten Studie innerhalb der ersten 100 ms der FB-Verarbeitung eine messbare valenzspezifische Unterscheidung des FB abbildet, welche für negative Stimuli sensibler erscheint. Diese stärkere Beeinflussung der N1 durch emotional bedeutende Reize, wie hier dem negativen FB, findet statt, ohne Auswirkungen auf die Leistung in dieser fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe. Dieses Phänomen könnte im Einklang mit der bisherigen Forschung als Abbild des Beginns des negativity bias verstanden werden, welche die automatische und unbewusste, erhöhte Aufmerksamkeitslenkung auf negative Stimuli zeigt. Diese sehr frühe Fokussierung auf Negatives scheint diesen Daten nach jedoch nicht mit negativen oder positiven Auswirkungen auf die Arbeitsgedächtnisleistung assoziiert zu sein. Es erscheint denkbar, dass es sich um ein elektrophysiologisches Phänomen handelt, welches keinen Zusammenhang mit höheren kognitiven Funktionen und leistungsrelevantem Verhalten zeigt, da es in einer sehr frühen unbewussten Phase der Informationsverarbeitung auftritt.

#### 4.4 Komponente P2

Eine P2 im Sinne einer positiven Auslenkung mit Peak zwischen 100 und 200 ms ist in der Kurve der GA bei FBO (Abb. 8) nicht zu erkennen, ein Peak zeigt sich erst 200 bzw. 204 ms nach grünem bzw. rotem Licht, also etwas außerhalb der gewählten Messgrenzen. In der Übersichtskurve der GA des PASAT mit FB (Abb. 9) zeigt sich dieser positive Peak bei 196 ms nach grünem und rotem FB. Nach Abzug der FBO Werte von denen des PASAT mit FB zeigt sich die für die Auswertung relevante Kurve (Abb. 16) mit einem positiven Ausschlag und Peak zwischen 100 – 200 ms. Die Difference Wave bildet, wie in Kapiteln weiter oben schon ausgeführt, am besten die zu untersuchende Information, nämlich die Reaktion auf die inhaltliche Bedeutung des FB, ab. Die Messgrenzen 100 – 200 ms nach FB wurden gesetzt, da sie einerseits passend zur Literatur sind und andererseits die P2 in der gebildeten Difference Wave am besten eingrenzen. In den Scalp Maps (Abb. 14 und 15) ist 100 – 200 ms nach FB eine zentrale, etwas nach links verschobene, Positivität zu erkennen, mit Maximum unter der

Elektrode Cz, weshalb diese als Ableitungsort für die Bestimmung der Amplituden verwendet wurde.

Die P2 erscheint in den Ergebnissen rein deskriptiv positiver für positives FB als für negatives FB, wobei sich dieser Unterschied der mittleren Amplituden als nicht signifikant zeigt. Ein signifikanter Unterschied hätte zu erwarten sein können, da sich die P2, ähnlich wie die N1, als sensibel für emotional relevante Stimuli herausstellte, wie in Kapitel 1.6.2 ausgeführt und belegt. Trotz des breit bestehenden Konsens darüber, dass die P2 Aufmerksamkeitsprozesse in Verbindung mit emotional bedeutenden Reizen abbildet, zeigt sich die Veränderung der Amplituden für emotional negative oder positive Stimuli, sowohl im zeitlichen als auch topografischen Verlauf, als schwierig einheitlich beurteilbar. Abhängig vom Studiendesign und der Art der Stimuli, z.B. emotionale Bilder oder Worte von unterschiedlicher Valenz und Arousal, zeigt die P2 erhöhte Amplituden für emotional relevante Stimuli, gleich ob positiv oder negativ (Carretié u. a. 2004; Herbert u. a. 2006), höhere Amplituden für negative Stimuli (Delplanque u. a. 2004; Huang & Luo 2006; Carretié u. a. 2006; Olofsson & Polich 2007) oder kleinere Amplituden für extrem negative Stimuli (Yuan u. a. 2007). Die genannten Autoren stimmen darin überein, dass die P2 eine neuronale Signatur für Aufmerksamkeitsprozesse, beeinflusst von emotionalen Stimuli, darstellt, und bringen diese mit dem negativity bias in Verbindung.

Carretié und Kollegen beschreiben die P2 als mittlere Phase im zeitlichen Verlauf automatischer Aufmerksamkeitsprozesse hin zu emotionalen Stimuli. Dieser sei anfangs (P1) geprägt von erhöhter Mobilisierung der Aufmerksamkeit in Richtung negativer Stimuli, gefolgt von stärkerer Aktivität (P2) nach negativen und positiven Stimuli als nach neutralen, sowie danach (N2) erhöhter Reaktion auf neutrale und positive Reize. Erklärt wird dieser Verlauf, durch eine von okzipital nach frontal wandernde neuronale Aktivität, welche dem *visuellen Kortex* (VAC) und dem ACC zugeschrieben werden (Carretié u. a. 2004). Dass die P2, wie sie in dieser Arbeit gemessen wurde, für positives und negatives FB gleichermaßen ausschlägt, stimmt mit den Befunden von Carretié und Kollegen also überein.

Die Befunde von Yuan und Kollegen lassen sich ebenfalls damit in Einklang bringen, da sie die P2 (140 – 200 ms frontal) mit kleineren Amplituden für extrem

negative visuelle Stimuli im Vergleich zu moderat negativen und neutralen Stimuli zeigen. Das wurde durch den negativity bias erklärt, denn diese negativen Stimuli gingen mit verkürzten Latenzzeiten, also schnellerer Verarbeitung, einher (Yuan u. a. 2007). Es scheint demnach auch von der Intensität des negativen Stimulus abzuhängen, wie hoch die P2-Amplitude ist. Eine weniger hohe Reaktion der P2 auf negative im Vergleich zu positiven Stimuli, könnte ein Anzeichen auf das Vorliegen eines stark negativen Stimulus sein. Da das negative FB während der Bearbeitung des PASAT nicht in unterschiedlichen Intensitäten gegeben wurde, lassen sich zu diesem Befund keine genaueren Aussagen treffen.

In dieser Arbeit korreliert der nicht signifikante Unterschied der mittleren Amplituden der P2 schwach positiv, jedoch nicht signifikant mit der Leistung im PASAT. Dies kann daran liegen, dass es keinen Unterschied zwischen beiden Bedingungen gibt, oder dass es keinen Zusammenhang zwischen der Höhe der P2-Amplitude und der Arbeitsgedächtnisleistung gibt. Die in Kapitel 4.3 zitierte Studie zeigte für die P2 ebenfalls keinen Zusammenhang mit der Arbeitsgedächtnisleistung (Van Dillen & Derks 2012). Weitere passende Studien über den Zusammenhang der visuellen P2 auf FB-Präsentation mit der Arbeitsgedächtnisleistung konnten nicht gefunden werden, so bleibt es schwer, die Befunde weiter einzuordnen.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass eine differentielle neuronale Reaktion auf beide FB Bedingungen anhand der P2 nicht beobachtbar war. Bisherige Befunde der P2 auf emotional bedeutende visuelle Stimuli sind zum einen heterogen, zum anderen konnte keine Studie gefunden werden, welche mit dem hier verwendeten Studiendesign sinnvoll übereinstimmt.

#### 4.5 Grenzen der Arbeit

Ein Kritikpunkt an der Arbeit könnte sein, dass die Ursache für unterschiedliche Amplituden des roten und grünen FB auch an deren unterschiedlicher Anzahl von Präsentationen liegen könnte. Solche Effekte, dass Komponenten höhere Amplituden für selten präsentierte Stimuli im Vergleich zu häufig präsentierten zeigen, wurden oft beschrieben und als Ursache für die Fehlinterpretation von Ergebnissen betrachtet (Luck & Gaspelin 2017). Es ist eine generelle Limitation des verwendeten Studiendesigns, dass die Anzahl der für die Auswertung zur

Verfügung stehenden Epochen von zwei Faktoren abhängt: a) ob der Proband eine Eingabe gemacht hat und b) ob die Epoche frei von Artefakten ist und durch die Artifact Rejection nicht ausgeschlossen wurde. Aufgrund dieser Abhängigkeiten unterscheidet sich die Anzahl der für die Erstellung der ERP zugelassenen Epochen des PASAT zwischen Grün ( $M = 108.75$ ,  $SD = 31.94$ ) und Rot ( $M = 51.88$ ,  $SD = 18.55$ ), siehe Tab. 3, signifikant ( $t(23) = 6.34$ ,  $p < .001$ ). Diese Differenz der beiden Bedingungen wirkt drastisch, doch muss bedacht werden, dass die tatsächliche, absolute Anzahl der präsentierten roten und grünen FB gleich verteilt ist und sich nicht signifikant für Grün ( $M = 113.04$ ,  $SD = 13.32$ ) und Rot ( $M = 125.33$ ,  $SD = 7.89$ ), ( $t(23) = -1.845$ ,  $p = .078$ ) unterscheidet, siehe Tab. 1. Diese Tatsache ist der adaptiven Eigenschaft des Tests geschuldet, die bewirkt, dass auch sehr gute Teilnehmer schnell an ihre Leistungsgrenze geraten und so ebenfalls inkorrekte Eingaben, einhergehend mit negativem FB, produzieren. Die Prozentangaben der aufgrund von Artefakten verworfenen Epochen im PASAT mit FB unterscheiden sich nicht signifikant für Grün und Rot ( $t(23) = -0.56$ ,  $p = .584$ ). Ebenso gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den verworfenen roten und grünen Epochen bei der Kontrollbedingung FBO ( $t(23) = -1.8$ ,  $p = .085$ ), sodass davon auszugehen ist, dass in keiner der Bedingungen, z.B. durch Blinzeln, systematisch mehr Artefakte erzeugt wurden. Trotzdem stellt die vor allem interindividuell unterschiedliche Anzahl grüner und roter FB-Epochen eine Schwäche des Studiendesigns dar. Eine Veränderung, sodass dieses Phänomen nicht auftritt, bzw. ein Effekt auf die Befunde ausgeschlossen werden kann, war nicht möglich, da weder die Artefakte noch die Eingaben der Probanden kontrolliert werden konnten bzw. sollten.

Eine weitere Schwäche des Studiendesigns ist, dass ein neutraler Stimulus nicht verfügbar ist. Dieser wäre hilfreich gewesen, um die neuronalen Reaktionen auf beide Bedingungen besser einordnen zu können und bestätigen zu können, dass sowohl positives als auch negatives FB, beispielsweise in der Phase der P2, aufmerksamkeitsbindender oder emotional bedeutender ist im Vergleich zum neutralen Kontrollstimulus. Ein solcher neutraler Stimulus war in der Studie nicht verfügbar und es ist weiterhin unklar wie dieser hätte aussehen können.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die beschriebenen Komponenten N1 und P2 hauptsächlich visuelle Anteile abbilden, hervorgerufen durch den Reiz des FB. Letztendlich kann nicht bewiesen werden, dass dem so ist. Problematisch ist, dass das FB gemeinsam mit dem zur nächsten Eingabe benötigten auditorischen Stimulus präsentiert wurde. Das Studiendesign ist dahingehend charakteristisch, dass der zu untersuchende Stimulus nicht isoliert auftritt und die Zeit nach Auftreten des FB nicht nur der reinen FB-Verarbeitung dient, sondern auch weitere komplexe kognitive Prozesse vor sich gehen müssen, wie z.B. die Vorbereitung auf den neuen Trial, die Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit und die Ausführung der motorischen Reaktion. Es ist aber gerade diese Eigenschaft, dass das FB im gleichen Moment mit dem neuen Zielstimulus, der Zahl, auftritt, der seine Funktion als Distraktor bedingt und die Untersuchung dieses Einflusses auf die Arbeitsgedächtnisleistung ermöglicht. Angenommen wird, dass sich durch Erstellung der ERP in Korrelation mit den beiden FB ein Großteil dieser Störfaktoren herausmittelt. Die Voraussetzung dafür wäre, dass zur Erstellung der ERP für jeden Probanden eine ausreichende Anzahl an Epochen für jeweils beide Bedingungen vorliegt. Diese Voraussetzung ist in dieser Arbeit verbesserungswürdig, da vor allem die Anzahl der roten Epochen niedrig ist und im Mittel bei knapp über 50 liegt, mit einer Standardabweichung von 18.55 (siehe Tab. 3). Mit einer höheren Anzahl an Epochen hätten qualitativ bessere ERP erzeugt werden können. Als Maßstab einer guten Qualität von ERP sollte die *Baseline*, also die sichtbare Aktivität vor dem Zeitpunkt 0, möglichst flach, also gering, sein. Die Baseline ist bei den vorliegenden Kurven etwas unruhig und zeigt eine qualitative Schwäche der erstellten ERP, wahrscheinlich aufgrund zu weniger zur Auswertung zur Verfügung stehender Epochen je Probanden. Eine Erhöhung der Anzahl der FB-Epochen hätte jedoch auch das Problem mitgebracht, dass die Aufgabe dann über längere Zeit, mit mehreren Pausen, bearbeitet werden hätte müssen, einhergehend wiederum mit Gewöhnungs- und Lerneffekten, welche potenziell auch einen Einfluss auf die FB-Verarbeitung gehabt hätten. Dieses Dilemma wurde bei der Konzeption der Studie bedacht, jedoch lagen keine Erfahrungswerte vor, die gut abschätzen ließen, wie viele FB-Epochen am Ende

zur Analyse zur Verfügung stehen würden. Zum Versuch der Verbesserung der Qualität sollte in Folgestudien die Anzahl verwendeter FB-Epochen gesteigert werden, indem der PASAT unter Aufzeichnung der EEG-Daten etwas länger bearbeitet wird.

Die N1 ist in den Bedingungen mit visuellem Reiz (FBO und PASAT mit FB) mit negativem Peak zu erkennen. Deshalb kann man annehmen, dass sie hier hauptsächlich die Reaktion auf den visuellen Reiz abbildet. Nach Bildung der Difference Wave und Herausrechnen des visuellen Reizes ist kein sichtbarer Peak mehr zu erkennen. Wäre der auditorische Reiz als Ursache der N1 zu sehen, müsste der Peak in der Difference Wave noch immer zu sehen sein, da die auditorische Information hier nicht herausgerechnet wurde. Stattdessen wurde ein signifikanter Unterschied im Bereich der N1 in der Difference Wave gemessen. Erklärt wurde dieser als Abbild der unterschiedlichen neuronalen Reaktion auf die inhaltliche Bedeutung des FB. Es ist davon auszugehen, dass sich die Information des auditorischen Reizes bei der Erstellung der ERP herausmittelt, da sie bei beiden Bedingungen, egal ob rot oder grün, als zufällige Zahl zwischen eins und neun, gleichermaßen auftritt.

Die Messgrenzen zwischen 60 und 100 ms nach FB, wie sie in dieser Arbeit für die Komponente N1 gesetzt wurden, sind eher typisch für die auditorische N1. Für visuell emotional bedeutende Stimuli wäre ein späterer Peak nach etwa 130 ms (Luck & Kappenman 2013), oder sogar später bei 160 ms (Keil u. a. 2001) passender gewesen. Es zeigt sich eine generelle Schwierigkeit konkrete Messgrenzen zu definieren, da es zum einen in der Literatur keine eindeutig definierten Grenzen gibt und zum anderen die Ergebnisse oft keine klaren Abgrenzungen zwischen einzelnen Komponenten, wie auch hier, zulassen. In dieser Arbeit wurde die Entscheidung getroffen, dass sich die Komponenten in der Analyse nicht überlappen sollten, um Effekte nicht doppelt zu erfassen und so zu verfälschen, weshalb die Messgrenzen in Abhängigkeit der Komponenten voneinander gesetzt wurden. Die N1 endete deshalb bei 100 ms, da dies der passende Beginn für die P2 darstellte. Dass sich Anteile der eigentlichen Komponente N1 so in den Messgrenzen der P2 befinden könnten, ist denkbar und stellt ein Problem dar. Denkbar wäre auch gewesen, die hintere Messgrenze



der P2 am Tiefpunkt bei 250 ms (siehe Abb. 18) zu definieren, wodurch man möglicherweise einen signifikanten Unterschied der P2 für rotes und grünes FB erhalten hätte. Jedoch hätte es hier wiederum Überlappungen zu anderen Komponenten wie der *Feedback-Related Negativity* (FRN), beginnend bei 200 ms nach FB, gegeben. Diese Komponente wird in weiteren Veröffentlichungen genauer Betrachtung finden.

Die N1 könnte zudem auch Anteile einer P1 abbilden, obwohl in keiner der Bedingungen ein positiver Peak abgegrenzt werden konnte. Die P1 ist eine, gewöhnlich zwischen 80 und 130 ms auftretende, positive Auslenkung, welche sich maximal über lateral okzipitalen Hirnarealen zeigt. Allerdings wurde sie auch als negative Amplitude mit Peak bei 105 ms unter frontalen Elektroden als Reaktion auf negative Reize, im Vergleich zu positiven und neutralen, beobachtet (Carretié u. a. 2004), was von den Autoren als Manifestation eines negativity bias gesehen wurde. In Übereinstimmung damit ist nicht auszuschließen, dass die N1 hier einer versteckten P1 entspricht, oder Anteile derer abbildet. Letztendlich wären die Befunde ähnlich zu interpretieren.

Eine Schwierigkeit und Schwäche von ERP Untersuchungen besteht also darin, Komponenten eindeutig voneinander abzugrenzen und zu benennen, da ihre Grenzen schwer definiert werden können. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass diese Komponenten durch die verwendete Technik ihrem neuronalen Ursprung nicht sicher zugeordnet werden können. Dies nennt man das inverse Problem und es beschreibt die generelle Unmöglichkeit, ohne zusätzliche Messungen, die durch die EEG-Aufzeichnung erstellten Komponenten sicher Hirnarealen zuzuordnen zu können. Als generierende Quelle bzw. Ursprung der an der Kopfoberfläche abgeleiteten elektrischen Potentiale liegt eine Vielzahl an Neuronen mit praktisch unendlicher Anzahl möglicher Erregungsmuster zugrunde.

#### 4.6 Schlussfolgerung und Ausblick

Der 2-back PASAT stellt sich als geeignete Aufgabe dar, um die Arbeitsgedächtnisleistung gesunder Probanden stark zu fordern und so unter Einfluss eines emotional ablenkendem FB die Verarbeitung und den Einfluss dessen zu untersuchen. Die hohe emotionale Bedeutung der Aufgabe konnte in

dieser Arbeit, als Ergänzung zu bisherigen Befunden, durch die SLE bestätigt werden. Gezeigt werden konnte, dass die Bearbeitung des PASAT im Median bei den Probanden subjektiv mit überwiegender Unzufriedenheit über die Leistung, einer eher schlechten Einschätzung der Leistung im Vergleich zu anderen und einem eher von der Aufgabe ablenkendem Ärger über die Fehler einhergeht.

Mit Hilfe der technischen Verfahren EEG und ERP wurden die frühen neuronalen Signaturen auf die Präsentation von FB während des PASAT untersucht. Ein zeitlicher Verlauf der frühen neuronalen Signaturen auf die Präsentation von FB während des PASAT lässt sich wie folgt zusammenfassen und interpretieren: Schon in der frühen Verarbeitungsphase bis 100 ms nach FB-Präsentation zeigt sich eine erhöhte Aktivität für negatives FB, im Vergleich zu positivem, welche aber keinen direkten Zusammenhang mit der Leistung zeigt. Dies könnte als Zeichen einer sehr frühen, automatischen und unbewussten Aufmerksamkeitslenkung in Richtung Negatives, somit als Beginn der Abbildung eines negativity bias, gesehen werden. Dieser negativity bias scheint noch keinen messbaren nachteiligen Effekt zu haben, weshalb er als Abbild einer sinnvollen physiologischen Reaktion interpretiert werden kann, welche bei schlechteren und besseren Teilnehmern ähnlich stark vorhanden ist. Da keine anderen Studien über die Untersuchung von ERP auf die Präsentation von FB während der Bearbeitung des 2back-PASAT zum Vergleich vorliegen, hat diese Arbeit explorativen Charakter und liefert wichtige Informationen für die Verbesserung der angewandten Methodik. Vor allem die Qualität der verwendeten ERP könnte in Folgestudien durch eine Erhöhung der Anzahl verwendeter Epochen verbessert werden. Dies würde man erreichen, indem die Probanden während der EEG-Aufzeichnungen den PASAT länger bearbeiten, oder in Form von Trainingsstudien an mehreren Tagen durchführen. Da der 2back-PASAT durch Adaption an die Leistung der Probanden selbst nach langem Training fordernd ist, wäre dies prinzipiell möglich, Gewöhnungs- und Lerneffekte müssten in der Auswertung dann aber bedacht werden. Bei ausreichender Qualität der Daten könnten dann ergänzend die Latenzzeiten der Komponenten genauer untersucht werden, da z.B. für die P2 schnellere

Reaktionen auf negative Reize beschrieben wurden (Carretié u. a. 2001). So könnte mehr über den zeitlichen Verlauf der FB-Verarbeitung erfahren werden. In Zukunft sollten die Erkenntnisse aus dieser Arbeit weiter Verwendung finden, um mehr über die Bedeutung und Auswirkung des negativity bias und der CCE auf Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis herauszufinden. In der Therapie psychischer Erkrankungen wie der Depression erscheint die Beeinflussung des negativity bias durch Training und/oder transkranielle Hirnstimulation als erfolgsversprechende Therapieoption. Die objektive Messung dieser negativ gefärbten Verarbeitung mittels ERP würde ermöglichen, deren Beeinflussung abbilden zu können, um sie so vergleichen, einschätzen und besser verstehen zu können. Diese Arbeit legt die Grundsteine dafür.

## 5 Zusammenfassung

Um mehr über die frühe Verarbeitung von emotional bedeutenden, ablenkenden Reizen während der Bearbeitung einer fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe (2back-PASAT) erfahren zu können, wurden mittels Elektroenzephalografie (EEG) und Ereigniskorrelierten Potentiale (ERP) frühe neuronale Signaturen auf die Präsentation von Feedback (FB) erfasst und untersucht.

Gezeigt werden konnte mittels der Auswertung eines Fragebogen zur subjektiven Selbsteinschätzung (SLE) nach der Bearbeitung des PASAT, dass die Aufgabe bei den Probanden subjektiv mit überwiegender Unzufriedenheit über die Leistung, einer Einschätzung der Leistung als eher schlecht im Vergleich zu anderen und einem eher von der Aufgabe ablenkendem Ärger über die Fehler einhergeht. Ergänzend zu bisherigen Befunden bestätigt dies die fordernde und frustrierende Eigenschaft des Tests sowie eine ablenkende und emotionale bedeutende Eigenschaft des FB, welches während der Bearbeitung der Aufgabe präsentiert wurde.

Frühe neuronalen Signaturen auf die Präsentation dieses FB wurden durch die ERP-Komponenten N1 und P2 abgebildet. Als wesentlicher Befund zeigte sich für die N1 ein signifikanter Unterschied der mittleren Amplituden nach negativem und positivem FB, welcher nicht mit der Leistung im Test korrelierte. Dies ist in Einklang zu bringen damit, dass hier innerhalb der ersten 100 ms nach

Präsentation des FB ein negativity bias, eine stärkere Lenkung der Aufmerksamkeit in Richtung negativer Reize, besteht und abgebildet wird. Es wird angenommen, dass es sich hierbei um die Darstellung einer automatischen und unbewussten Aufmerksamkeitslenkung handelt, welche auf höhere kognitive Funktionen wie die Arbeitsgedächtnisleistung keinen direkten Einfluss hat.

Die Komponente P2 bildet hingegen keinen signifikanten Unterschied der Amplituden beider FB, und keine Korrelation mit der Leistung in der Aufgabe ab. Diskutiert wurde zum einen, dass sich die erwarteten Unterschiede nicht innerhalb der gewählten Messgrenzen zeigen könnten, zum anderen passend zu anderen Studien, dass sich in dieser Phase der Verarbeitung ähnlich hohe Amplituden auf die Präsentation von emotional positiven und negativen Stimuli zeigen. Zusammengefasst zeigt sich in frühen Verarbeitungsphasen von Leistungsfeedback innerhalb der fordernden Arbeitsgedächtnisaufgabe eine stärkere automatische Lenkung der Aufmerksamkeit in Richtung Negativem ohne leistungsrelevanten Einfluss.

Da diese Studie als erste überhaupt die verwendete Methodik anwendet hat sie einen explorativen Charakter. In Folgestudien könnte zur Validierung der Ergebnisse die Anzahl der zur Auswertung verwendbaren FB-Epochen erhöht werden, um die Qualität der ERP zu verbessern, z.B. durch eine längere Bearbeitungsdauer des PASAT während der EEG-Aufzeichnung.

Als Ausblick in die Zukunft wäre die objektive Messung der negativ gefärbten Verarbeitung mittels ERP eine vielversprechende Möglichkeit, um Beeinflussungen des negativity bias durch therapeutische Interventionen vergleichbar abbilden zu können.

## 6 Literaturverzeichnis

- Adrian, E. D. & Matthews, B. H. C. 1934. The Interpretation of Potential Waves in the Cortex. *The Journal of Physiology* 81, 4, 440–471.
- Audoin, B. u. a. 2005. Functional MRI study of PASAT in normal subjects. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine* 18, 2, 96–102.
- Berger, Hans 1929. Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 278, 1875, 527–570.
- Buchner, Helmut & Noth, Johannes 2005. *Evozierte Potenziale, neurovegetative Diagnostik, Okulographie: Methodik und klinische Anwendungen*. Georg Thieme Verlag.
- Carretié, Luis u. a. 2004. Automatic attention to emotional stimuli: Neural correlates. *Human Brain Mapping* 22, 4, 290–299.
- Carretié, Luis u. a. 2001. Emotion, attention, and the 'negativity bias', studied through event-related potentials. *International Journal of Psychophysiology* 41, 1, 75–85.
- Carretié, Luis u. a. 2006. Neural response to sustained affective visual stimulation using an indirect task. *Experimental Brain Research* 174, 4, 630–637.
- Carretié, Luis, Hinojosa, José Antonio & Mercado, Francisco 2003. Cerebral patterns of attentional habituation to emotional visual stimuli. *Psychophysiology* 40, 3, 381–388.
- Chao, Linda L. & Knight, Robert T. 1998. Contribution of human prefrontal cortex to delay performance. *Journal of Cognitive Neuroscience* 10, 2, 167–177.
- Clark, Luke, Chamberlain, Samuel R & Sahakian, Barbara J 2009. Neurocognitive Mechanisms in Depression: Implications for Treatment. *Annual Review of Neuroscience* 32, 1, 57–74.
- Clark, Vincent P. & Hillyard, Steven a. 1996. Spatial Selective Attention Affects Early Extrastriate But Not Striate Components of the Visual Evoked Potential. *Journal of Cognitive Neuroscience* 8, 5, 387–402.
- D'Esposito, Mark, Postle, Bradley & Rypma, Bart 2000. Prefrontal cortical contributions to working memory: evidence from event-related fMRI studies.

- Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale* 133, 3–11.
- Deary, Ian J. u. a. 1991. Which abilities does the PASAT test? *Personality and Individual Differences* 12, 10, 983–987.
- Delorme, Arnaud & Makeig, Scott 2004. EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods* 134, 1, 9–21.
- Delplanque, Sylvain u. a. 2004. Modulation of cognitive processing by emotional valence studied through event-related potentials in humans. *Neuroscience Letters* 356, 1, 1–4.
- Van Dillen, Lotte F. & Derks, Belle 2012. Working memory load reduces facilitated processing of threatening faces: An ERP study. *Emotion* 12, 6, 1340–1349.
- Dolan, R J 2002. Emotion, Cognition, and Behavior. *Science* 298, 5596, 1191 LP – 1194. <http://science.sciencemag.org/content/298/5596/1191.abstract>.
- Foti, Dan, Hajcak, Greg & Dien, Joseph 2009. Differentiating neural responses to emotional pictures: Evidence from temporal-spatial PCA. *Psychophysiology* 46, 3, 521–530.
- Goschke, Thomas 2014. Dysfunctions of decision-making and cognitive control as transdiagnostic mechanisms of mental disorders: advances, gaps, and needs in current research. *International journal of methods in psychiatric research* 23, 1, 41–57.
- Gronwall, D. & Wrightson, P. 1974. Delayed Recovery of Intellectual Function After Minor Head Injury. *The Lancet* 304, 7881, 605–609.
- Herbert, Cornelia u. a. 2006. Processing of emotional adjectives: Evidence from startle EMG and ERPs. *Psychophysiology* 43, 2, 197–206.
- Hillyard, SA & Münte, TF 1984. Selective attention to color and location: an analysis with event-related brain potentials. *Perception & psychophysics* 36, 2, 185–198.
- Hillyard, Steven A u. a. 1973. Electrical Signs of Selective Attention in the Human Brain. *Science* 182, 4108, 177–180.
- Holdwick, Daniel J. & Wingenfeld, Sabine A. 1999. The subjective experience of PASAT testing: Does the PASAT induce negative mood? *Archives of Clinical*

- Neuropsychology* 14, 3, 273–284.
- Holmes, Avram J & Pizzagalli, Diego A 2008. Spatiotemporal Dynamics of Error Processing Dysfunctions in Major Depressive Disorder. *Archives of General Psychiatry* 65, 2, 179–188.  
<https://dx.doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2007.19>.
- Huang, Yu-xia & Luo, Yue-jia 2006. Temporal course of emotional negativity bias: An ERP study. *Neuroscience Letters* 398, 1–2, 91–96.
- Jackson, Daren C u. a. 2000. Suppression and enhancement of emotional responses to unpleasant pictures. *Psychophysiology* 37, 4, 515–522.
- Jasper, Herbert H. 1958. Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Supplement* 10, 2, 370–375.  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10590970>.
- Keil, Andreas u. a. 2001. Effects of emotional arousal in the cerebral hemispheres: A study of oscillatory brain activity and event-related potentials. *Clinical Neurophysiology* 112, 11, 2057–2068.
- Keil, Andreas u. a. 2002. Large-scale neural correlates of affective picture processing. *Psychophysiology* 39, 5, 641–649.
- Kluger, Avraham N & Denisi, Angelo 1996. The Effects of Feedback Interventions on Performance: A Historical Review, a Meta-Analysis, and a Preliminary Feedback Intervention Theory. *Psychological Bulletin* 119, 2, 254–284.
- Lavie, Nilli u. a. 2004. Load Theory of Selective Attention and Cognitive Control. *Journal of Experimental Psychology: General* 133, 3, 339–354.  
<http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-3445.133.3.339>.
- Lehrl, S 2005. *Manual zum MWT-B*. Spitta-Verlag.  
<https://books.google.de/books?id=cmjRAGAACAAJ>.
- Lejuez, C W, Kahler, Christopher W & Brown, Richard A 2003. A modified computer version of the Paced Auditory Serial Addition Task (PASAT) as a laboratory-based stressor. *The Behavior Therapist* .
- Liang, Meng, Iannetti, Gian Domenico & Wang, An Li 2008. The Enhancement of the N1 Wave Elicited by Sensory Stimuli Presented at Very Short Inter-Stimulus Intervals Is a General Feature across Sensory Systems. 3, 12, .

- Locke, Edwin A u. a. 1981. Goal setting and task performance: 1969–1980. *Psychological bulletin* 90, 1, 125.
- Lopez-Calderon, Javier & Luck, Steven J 2014. ERPLAB: an open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. 8, April, 1–14.
- Luck, Steven J. & Gaspelin, Nicholas 2017. How to get statistically significant effects in any ERP experiment (and why you shouldn't). *Psychophysiology* 54, 1, 146–157.
- Luck, Steven J 2014. *An introduction to the event-related potential technique*. MIT press.
- Luck, Steven J & Hillyard, Steven A 1993. Attention-Related Modulation of Sensory-Evoked Brain Activity in a Visual Search Task I. *Journal of Cognitive Neuroscience* 5, 2, 188–195.
- Luck, Steven J & Hillyard, Steven A 1994. Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, 31, 291–308.
- Luck, Steven J & Kappenman, E S 2013. *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. OUP USA. [https://books.google.de/books?id=p\\_sTDAAAQBAJ](https://books.google.de/books?id=p_sTDAAAQBAJ).
- Näätänen, Risto & Picton, Terence 1987. The N1 Wave of the Human Electric and Magnetic Response to Sound: A Review and an Analysis of the Component Structure. *Psychophysiology* 24, 4, 375–425.
- Ochsner, Kevin N & Gross, James J 2005. The cognitive control of emotion. *Trends in Cognitive Sciences* 9, 5, .
- Oldfield, R. C. 1971. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 1, 97–113.
- Olofsson, Jonas K. & Polich, John 2007. Affective visual event-related potentials: Arousal, repetition, and time-on-task. *Biological Psychology* 75, 1, 101–108.
- Peirce, Jonathan W. 2007. PsychoPy-Psychophysics software in Python. *Journal of Neuroscience Methods* 162, 1–2, 8–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jneumeth.2006.11.017>.
- Peirce, Jonathan W 2008. Generating stimuli for neuroscience using PsychoPy. *Frontiers in Neuroinformatics* 2, January, 1–8. <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/neuro.11.010.2008/abstract>.



- Plewnia, Christian, Schroeder, Philipp A., Kunze, Roland, u. a. 2015. Keep calm and carry on: Improved frustration tolerance and processing speed by transcranial direct current stimulation (tDCS). *PLoS ONE* 10, 4, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0122578>.
- Plewnia, Christian, Schroeder, Philipp A. & Wolkenstein, Larissa 2015. Targeting the biased brain: Non-invasive brain stimulation to ameliorate cognitive control. *The Lancet Psychiatry* 2, 4, 351–356. [http://dx.doi.org/10.1016/S2215-0366\(15\)00056-5](http://dx.doi.org/10.1016/S2215-0366(15)00056-5).
- Reitan, Ralph M 1992. *Trail Making Test: Manual for Administration and Scoring*. Reitan Neuropsychology Laboratory. <https://books.google.de/books?id=K6C4nAEACAAJ>.
- Reitan, Ralph M 1958. Validity of the Trail Making Test as an Indicator of Organic Brain Damage. *Perceptual and Motor Skills* 8, 3, 271–276. <http://dx.doi.org/10.2466/pms.1958.8.3.271>.
- Roiser, Jonathan P, Elliott, Rebecca & Sahakian, Barbara J 2012. Cognitive mechanisms of treatment in depression. *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology* 37, 1, 117–36. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3238070&tool=pmc&rendertype=abstract>.
- Rozin, Paul & Royzman, Edward B 2001. Negativity Bias, Negativity Dominance, and Contagion. *Personality and Social Psychology Review* 5, 4, 296–320.
- Tombaugh, Tom N. 2006. A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT). *Archives of Clinical Neuropsychology* 21, 1, 53–76.
- Tombaugh, Tom N. 2004. Trail Making Test A and B: Normative data stratified by age and education. *Archives of Clinical Neuropsychology* 19, 2, 203–214.
- Vogel, Edward K & Luck, Steven J 2000. The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology* 37, 190–203.
- Warren, Matthew B u. a. 2015. A neurocognitive model for understanding treatment action in depression. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370, 1677, .
- Wechsler, David 2008. *Wechsler Adult Intelligence Scale - Fourth Edition (WAIS-*

- IV). Pearson. Franz Petermann, Ulrike Petermann.
- Weinberg, Anna & Hajcak, Greg 2010. Beyond good and evil: the time-course of neural activity elicited by specific picture content. *Emotion (Washington, D.C.)* 10, 6, 767–782.
- Weller, Simone 2017. *Effects of Left Prefrontal Transcranial Direct Current Stimulation on Cognitive Control Training*. Unveröffentlichte Master Thesis, Eberhard Karls Universität Tübingen, .
- Wiegand, Ariane u. a. 2019. Improvement of cognitive control and stabilization of affect by prefrontal transcranial direct current stimulation (tDCS). *Scientific Reports* April, 1–8.
- Wolkenstein, Larissa u. a. 2014. Induction of a depression-like negativity bias by cathodal transcranial direct current stimulation. *Cortex* 59, 103–112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2014.07.011>.
- Yuan, Jiajin u. a. 2007. Are we sensitive to valence differences in emotionally negative stimuli? Electrophysiological evidence from an ERP study. *Neuropsychologia* 45, 12, 2764–2771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.04.018>.
- Zschocke, Stephan & Hansen, Hans-Christian 2011. *Klinische Elektroenzephalographie*. Springer Medizin.

## 7 Erklärungen zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Psychiatrischen Universitätsklinik Tübingen in der Arbeitsgruppe Neurophysiologie und interventionelle Neuropsychiatrie unter der Betreuung von Prof. Christian Plewnia durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch M. Sc. Anja Sommer. Die Programmierung des verwendeten PASAT wurde 2015 von Fedor Schlegel und Philipp Ruf durchgeführt, die Adaption zur 2-back PASAT Version von Simone Weller. Die Fragebögen sowie die Versionen des PASAT mit Triggern und Eventcodes wurden in PsychoPy implementiert von Anja Sommer. Der Fragebogen zur subjektiven Leistungseinschätzung wurde von Anja Sommer entwickelt.

Die Versuche wurden nach Einarbeitung durch Anja Sommer eigenständig von mir durchgeführt und sämtliche Daten durch mich erhoben.

Die elektronische Weiterverarbeitung der Daten, das Einpflegen der Daten in die Statistiksoftware, die Aufbereitung der elektrophysiologischen Daten und deren statistische Auswertung erfolgte durch mich.

Abbildung 1 wurde erstellt mit Hilfe von Simone Weller und Abbildung 4 durch Luiz Killi. Alle weiteren Abbildungen wurden von mir eigenständig erstellt.

Weitere Daten aus der Studie über spätere Komponenten werden in einer zweiten Veröffentlichung untersucht. An der Erstellung dieser zweiten Veröffentlichung war ich durch Erhebung, Weiterverarbeitung und Aufbereitung der Daten wesentlich beteiligt.

Ich versichere, dieses Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Bad Schönborn, den 13.02.2020

Lukas Ziegler