

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

**Abhängigkeit des Bereitschaftspotentials vom
zeitlichen Rahmen und der Aufmerksamkeit**

INAUGURALDISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde der

Universität zu Lübeck

- Aus der Sektion Medizin-

vorgelegt von

Alexandra Elisabeth Baur

aus Heidelberg

Lübeck 2020

1. Berichterstatter/Berichterstatterin: 1. Prof. Dr. rer. soc. Rolf Verleger

2. Prof. Dr. med. Claas-Hinrich Lammers

Tag der mündlichen Prüfung: 18.11.2020

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 18.11.2020

- Promotionskommission der Sektion Medizin -

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Einleitung	5
1.1. Das Elektroenzephalogramm (EEG).....	5
1.2. Das Bereitschaftspotential	7
2. Experiment 1	13
2.1. Einleitung	13
2.2. Material und Methoden.....	13
2.2.1. Versuchspersonen	13
2.2.2. Versuchsaufbau.....	13
2.2.3. EEG - Ableitung	14
2.2.4. Datenverarbeitung	20
2.2.4.1. Verarbeitung der Verhaltensdaten	20
2.2.4.2. Verarbeitung der EEG Daten	20
2.2.4.3. Verarbeitung der BP Daten	21
2.2.4.4. Statistische Analyse	22
2.3. Ergebnisse	23
2.3.1. Abstände zwischen Tastendrücken	23
2.3.2. "Zu früh gedrückt" Quoten	26
2.3.3. Bereitschaftspotential	28
2.4. Diskussion	30
3. Experiment 2	30
3.1. Einleitung	30
3.2. Material und Methoden	30
3.2.1. Versuchspersonen	31
3.2.2. Versuchsaufbau	31
3.2.3. Fragebogen	32
3.2.4. EEG - Ableitung	33
3.2.5. Datenverarbeitung	33
3.2.5.1. Verarbeitung der Verhaltensdaten	33
3.2.5.2. Verarbeitung der EEG Daten	34
3.2.5.3. Verarbeitung der BP Daten	34
3.2.5.4. Statistische Analyse	34
3.3. Ergebnisse	34

3.3.1. Abstände zwischen Tastendrücken	34
3.3.2. "Zu früh gedrückt" Quoten	39
3.3.3. Bereitschaftspotential bei Ablenkung	41
3.3.4. Fragebogenanalyse.....	43
3.4. Diskussion	44
4. Diskussion der beiden Experimente	45
5. Zusammenfassung	48
6. Literaturverzeichnis	50
7. Anhang	55
7.1. Ethikantrag	55
8. Danksagung	57
9. Lebenslauf	58

1 Allgemeine Einleitung

Im Folgenden wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form benutzt. Es können dabei aber sowohl männliche als auch weibliche Personen gemeint sein.

1.1. Elektroenzephalographie (EEG)

Mit Hilfe der Elektroenzephalographie kann die Aktivität des menschlichen Gehirns nicht-invasiv untersucht werden. Im Gegensatz zu bildgebenden Verfahren ermöglicht das EEG eine zeitliche Auflösung im Millisekunden-Bereich. Dies ist für die zerebrale Funktionsdiagnostik von wesentlicher Bedeutung.¹

Grundsätzlich müssen elektrische Ladungen bewegt werden, um im Organismus ein elektrisches Signal entstehen zu lassen. Besagte Ladungen sind im elektrolytischen Milieu negative und positive Ionen. Es kommt ständig zu Ladungsaustausch und -Umkehrung. Durch den die intrazelluläre Potentialverschiebung in Dendriten ausgleichenden extrazellulären Potentialfluss entsteht das kortikale Feldpotential (Zschocke 1995). Um die kapazitiven Widerstände wie Knochen und Hirnhäute überwinden zu können, müssen die Dendriten vieler Neuronen die gleiche Ausbreitungsrichtung besitzen. Nur so können sie Potentialgefälle aufbauen und überhaupt zu messbaren Spannungsveränderungen führen. Je mehr Feldpotentiale sich auf der Schädeldecke ausbreiten, desto größer ist auch der Spannungsausschlag der dann im EEG messbaren Differentialpotentiale (Zschocke, p.11).

Diese hirnelektrischen Vorgänge sind die Grundlage des EEGs und werden von den Elektroden registriert (Schandry, 2003).

Im Jahre 1929 publizierte Berger zum ersten Mal unter dem Namen "Elektrenkephalogramm" über das EEG. Er bekam jedoch erst 1934 durch die Physiologen Adrian und Matthews die internationale Anerkennung. Der Österreicher Hubert Rohracher und seine Schüler wandten es im gleichen Jahr zum ersten Mal in der Psychologie an (Seifert 2005). Ab den 1970er Jahren

¹ Fachbereich Physiologie: EEG (n.d.). Universität zu Lübeck Website. Gelesen am 22.8.2016
https://www.physio.uni-luebeck.de/fileadmin/files/lehre/praktikum/ws/.../eeg_ep.doc

wurden, auf Grund der Verbesserung der Technologie, das ereigniskorrelierte Potential (inklusive des evozierten Potentials) als auch die Spontanaktivität des Gehirns näher untersucht. Die Hirnelektrische Spontanaktivität, das sogenannte ("Spontan-EEG"), gibt Aufschluss über Aufmerksamkeitsprozesse und Schlafstadien wieder. Die evozierte Aktivität führt zu einem evozierten Potential und gibt Aufschluss über phasische, kurzzeitige Reaktionen auf bestimmte Ereignisse. Dieses evozierte Potential kann vor oder nach einem Ereignis auftreten. Unter den evozierten Potentialen lassen sich sensorische, motorische sowie endogene Ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs) und langsame Potentialverschiebungen unterscheiden. Sensorische EKPs folgen direkt auf einen Sinnesreiz. Motorische EKPs gehen einer motorischen Aktivität unmittelbar voraus. Endogene EKPs entstehen, wenn ein Ereignis für die Person von Bedeutung ist, sie sind jedoch nicht so eng an das Ereignis gebunden wie die sensorischen EKPs. Langsame Potentialverschiebungen sind vor allem während der Vorbereitung auf eine motorische Reaktion oder während der Erwartung eines externen Reizes zu sehen (Schandry, 2003). Hier ist auch das Bereitschaftspotential einzuordnen.

Die Spontanaktivität ruft wesentlich größere und häufigere Amplitudenausschläge hervor als die EKPs, was zu einer Überlagerung der EKPs durch das Spontan-EEG führt.

Damit die EKPs sichtbar werden, müssen Sie aus dem Spontan-EEG (Hintergrundrauschen) mit einem Mittelungsverfahren herausgerechnet und sichtbar gemacht werden. Die Grundlage dieses Verfahrens beruht auf der Annahme, dass das Spontan-EEG reizunabhängig zufällige (positive und negative) Ausschläge zeigt, das EKP jedoch bei jeder Wiederholung desselben Ereignisses relativ konstant ist. Addiert man die gemessenen Potentialschwankungen, die auf das Ereignis folgen, und teilt die Summe anschließend durch die Anzahl aller Ereignisse, so erhält man eine Durchschnittskurve aller Durchgänge. Dabei gilt: Je kleiner das EKP, desto mehr Durchgänge werden gebraucht, um es gegen das Rauschen des Spontan-EEGs sichtbar zu machen. Je größer die Anzahl der gemessenen Reize wird, desto mehr gehen die Mittelwerte des Spontan-EEGs gegen Null.

1.2. Das Bereitschaftspotential (BP)

Das Bereitschaftspotential ist ein langsames, negatives Potential, das vor bewussten Bewegungen entsteht und 1964 von Kornhuber und Deecke das erste Mal als solches abgeleitet und benannt wurde.

Das Bereitschaftspotential besteht aus 2 Abschnitten (Kornhuber und Deecke, 1965; Shibasaki und Hallett, 2006): Die frühe Phase ("early BP") ist eine langsame, nicht-lateralisierte, negative EEG Aktivität, die vermutlich in der supplementär motorischen Rinde (SMA) und der Präzentralregion über den motorischen Arealen (pre-SMA und rostraler Zingulomotorischer Kortex; Ball et al., 1999; Deecke et al., 1987; Nguyen et al., 2014; Shibasaki und Hallett, 2006) entsteht. In der späten Phase ("late BP") (ca. 300 ms bis zur Bewegung) wird dieses BP von lateralisierten Potentialen überlagert. Sie spiegeln die Aktivität des motorischen Kortex wider, der die zu bewegendes Gliedmaßen kontrolliert (Kornhuber und Deecke, 1965; Kutas und Donchin, 1980).

Wie bereits erwähnt, wurde das BP 1964 von Kornhuber und Deecke entdeckt und in einer Studie beschrieben (publiziert 1965), mit der sie cerebrale Korrelationen willkürlicher Aktionsbereitschaft beim Menschen nachweisen wollten. In ihrem Artikel "Human Freedom, Reasoned Will, and the Brain: the Bereitschaftspotential story" erläuterten Kornhuber und Deecke 1964, dass die Studie aus ihrer Frustration gegenüber der weltweiten Hirnforschung entstanden sei. Weder teilten sie den Glauben an die von Kant beschriebene „negative Freiheit“ noch sahen sie das Gehirn nur als passives System. Kant hatte Freiheit in positive und negative Freiheit bzw. den Verlust von Freiheit (Deecke und Kornhuber, 2003) unterteilt. Die "positive Freiheit" wurde von Kornhuber und Deecke als Spiegelbild von Moral und Authentizität angesehen. Die "negative Freiheit" spiegelte sich, laut den Autoren, in Massendemonstrationen gegen den Vietnamkrieg und dem stark gestiegenen Alkohol- und Drogenmissbrauch wider, ebenso wie in der Einnahme von Kontrazeptiva, da durch diese ein einfaches Leben ohne Verpflichtungen gegenüber Kindern ermöglicht werde (p.286). Kornhuber und Deecke sahen es im Rahmen dieser philosophischen Grundüberlegungen als gegeben an, dass es erst den Willen gibt, der sich durch die SMA in die Materie bewegt, und darauffolgend dann eine physiologische Handlungsvorbereitung.

Die Entdeckung des BP löste demnach lebhaft Diskussionen über die Beziehung zwischen Gehirn und Verstand aus (z. B. Libet, 1985; Deecke und Kornhuber, 2003; Navon, 2014; Deecke und Soekadar, 2016; Schultze-Kraft et al., 2016). Libet et al. (1983a) maßen den Zeitpunkt des Willens (relativ zum Zeitpunkt der Bewegung und relativ zum Beginn des BP), indem die Probanden, sobald sie den Willen zur Bewegung spürten, sich die Position eines Kathodenstrahloszilloskop-Lichtpunkts und damit die Uhrzeit merkten. Somit wurde das Timing dieses Erlebens in ein berichtbares, auf das Visuelle bezogene Bild umgewandelt, ähnlich dem Ablesen und späteren Erinnern der Uhrzeit für jedes andere Erleben (Libet et al. 1985).

Zum Versuchsaufbau: Der Bildschirm des Oszilloskops war rund, 12,7cm im Durchmesser und hatte am Rand eine Uhrenskala mit einer Sekundenangabe in 5 sec Schritten. Ein Lichtpunkt kreiste im Uhrzeigersinn am Rand des Bildschirms entlang. Jede Runde des Lichtpunkts dauerte jedoch nur 2,56 sec statt 60 sec.

Die Probanden berichteten erst Sekunden nach der erfolgten Bewegung über die gemerkte Position des Lichtpunkts zum Zeitpunkt, als sie den Drang zur Bewegung spürten. Mit dieser Methode gemessen, lag der Zeitpunkt des Willens ungefähr 200 ms vor der Bewegung und damit ungefähr 350 ms nach dem von Libet et al. (1983a) gemessenen Beginn des BP ihrer Probanden.

Da in Libet et al. (1983a) das BP regelmäßig mehrere hundert Millisekunden (200 ms – 100 ms) vor dem angegebenen Zeitpunkt des Willens auftrat, kann angenommen werden, dass neuronale Aktivität einige Zeit vor dem bewussten Beginn der Bewegung unbewusst beginnt.

In einer Zusatzstudie wiesen Libet et al. (1983b) ihre Probanden dann an, sich mental auf eine Bewegung zu einem von den Versuchsleitern fest definierten Zeitpunkt vorzubereiten. Sobald der Lichtpunkt des Kathodenstrahloszilloskops an einem vorher festgelegten Punkt der Uhrenskala angelangt war, der sich 200-100 ms vor dem Zeitpunkt der angestrebten Bewegung befand, sollten die Probanden die Bewegung jedoch nicht durchführen und damit ein „Veto“ einlegen.

Dabei bildete sich ein eindrückliches Bereitschaftspotential, obwohl die Probanden vorher wussten, dass sie die Bewegung gar nicht durchführen würden. Dies spricht

dafür, dass eine mentale Vorbereitung und Intention, eine Handlung auszuführen, nötig ist und vielleicht sogar der dominierende Prozess ist, der mit dem langsamen negativen Potential assoziiert werden kann.

1985 kam Libet dann zu dem Schluss, dass Kornhuber und Deecke Unrecht hatten: Die Rolle des bewussten Willens sei nicht, eine bestimmte freiwillige Handlung zu initiieren, sondern lediglich, diese zu selektieren und zu kontrollieren. Deshalb geht einer freiwilligen Handlung eine unbewusste physiologische Handlungsvorbereitung voran, noch bevor es eine subjektive Wahrnehmung darüber gibt, dass eine Entscheidung zu einer Handlung bereits zerebral getroffen wurde.

Eccles (1985) stimmte Libets experimentell erlangten Beobachtungen vollumfänglich zu, außer dass er der Meinung war, dass das Bewusstsein beim Initiieren einer Handlung sehr wohl eine Rolle spiele. Laut Eccles ist die entscheidende Entdeckung bei diesem Experiment, dass der subjektive Beginn des Willens zur Bewegung 200 ms -100 ms vor der Bewegung stattfindet und etwa 350 ms nach dem eigentlichen Beginn des BPs. Damit stellt das BP ein integriertes Signal der kortikalen Aktivität dar, die einer Bewegung voraus geht. Seine Hypothese dazu besagt, dass die bewussten Entschlüsse zur Bewegung, die laut Libet 200 ms vor der Handlung stattfinden, lediglich die spontanen Schwankungen in der kortikalen Aktivität nutzen. Eccles behauptet ferner, sie würden nicht, wie von Libet angenommen durch Mittelwertbildung beseitigt, und wenn doch, dann bedeute das BP nicht, dass die kortikale Aktivität die Handlung initiiere.

Eingeschränkt durch die technischen Mittel jener Zeit, fehlten Libet et al. 1985 noch die Möglichkeiten, um ein nicht instruiertes Veto bei einer spontanen, selbst initiierten Handlung zu messen.

Genau diese 1985 unmöglichen Messungen gelangen 2016 Schultze-Kraft et al. Sie konnten die Annahme von Libet beweisen, dass Bewegungen gestoppt werden können, auch wenn das BP schon gestartet ist. Es wurde in dieser Studie ein Echtzeit-Experiment durchgeführt, in dem ein „brain-computer-Interface“ (BCI) erkannte, wenn Probanden ihre Entscheidung, eine Bewegung auszuüben, revidieren wollten, sobald das BP begonnen hatte. Schultze-Kraft et al. programmierten einen Klassifikator mit Hilfe der in Phase I der Studie von

Schultze-Kraft et al. (2016) erhobenen EEG-Daten so, dass ein Stopp-Signal rechtzeitig ausgelöst wurde, um die Bewegung des Probanden zu unterbrechen. Mit den Daten der Phase I konnte der Klassifikator Bewegungen in Echtzeit während Phase II und III ihres Versuchs zu 34.6 % und 39.1 % vorhersagen. 15.2 % und 16.3 % der Bewegungen konnten abgebrochen werden (43 % der Vorhergesagten).

Die Wichtigkeit des BP liegt laut Kornhuber und Deecke (2003) vor allem darin, dass es die einzige neurophysiologische Verbindung von Hirnfunktionen wie Motivation, Vorbereitung, Intention und Initiierung freiwillig ausgeführter Bewegungen sei.

In diesen Debatten blieb ohne Zweifel, dass das BP einen Prozess der Bewegungsvorbereitung widerspiegelt, da die Probanden in diesen Versuchen eine Bewegung durchführen müssen, während nichts Anderes passiert.

Das BP wird wie alle Ereigniskorrelierten Potentiale (EKP) als Durchschnittspotential durch viele Wiederholungen derselben Bewegung erhalten (z.B., n=60, oder sogar n=512 in Kornhuber und Deecke 1965). In der BP-Situation ist hervorzuheben, dass diese Wiederholungen ohne eine externe Zeitangabe durchgeführt werden. Die Abwesenheit einer externen bestimmten Zeitangabe bedeutet jedoch nicht die Abwesenheit von Zeitvorgaben. Die Bewegungen sollten beispielsweise nicht schneller als mit 3 sec Abstand (Shibasaki et al. 1980; Wessel et al. 1994) oder sogar 15 sec (Kornhuber and Deecke 1965) zu der vorhergehenden Bewegung erfolgen, da das gemessene Intervall vor der Bewegung frei von etwaigen früheren Aktivierungen sein sollte. Zudem musste das Experiment in einem definierten Zeitrahmen abgeschlossen sein, weshalb der Proband nicht endlos bis zur nächsten Bewegung warten sollte. Das BP könnte von diesen zeitlichen Rahmenbedingungen beeinflusst sein (Baker et al. 2012). Interessant ist in diesem Kontext die Variabilität der BP-Anfänge, sowohl zwischen den Studien als auch zwischen oder innerhalb der Probanden. Oft stieg das BP sofort am Anfang der analysierten und graphisch dargestellten Periode an, sei es 1,5 sec (Libet et al. 1982, 1983a) oder 2,5 sec (Haggard und Eimer, 1999; Jo et al., 2014), sodass man sich die Frage stellen muss, ob dieser früheste aufgezeichnete Zeitpunkt lange vor der Bewegung wirklich der Zeitpunkt ist, an

dem das Bereitschaftspotential beginnt. Denn warum brauchen Probanden mehr als 1 sec, um sich zu einer einfachen Bewegung zu entscheiden. Im Allgemeinen könnte man fragen, ob ein Zeitpunkt, an dem das BP beginnt, überhaupt definiert werden kann, oder ob das BP eine Regulation periodischer Schwankungen ist (Schurger et al., 2012; Jo et al., 2013; Schmidt et al., 2016). Letzteres entspricht auch Eccles' BP These der spontanen Fluktuation (Eccles 1985), die nur manchmal, konzentrationsunabhängig, zufällig zu einer Negativierung führt.

Libet et al. (1982, 1983a) waren sich dieses Problems durchaus bewusst und unterschieden zwischen zwei verschiedenen BP-Typen, dem geplanten Typ und dem spontanen Typ. Der geplante Typ steigt stetig in einer rampenartigen Form an und beginnt vor -700 ms. Der spontane Typ fängt bei -400 bis -700 ms an zu steigen und ist eher kuppelartig geformt. Falls das BP eine Bewegungsvorbereitung widerspiegelt, wie Libet, Kornhuber & Deecke behaupten, ist es schwer verständlich, warum es manchmal mehr als 2 sec vor einer einfachen Bewegung startet und manchmal nicht. Zudem sind Verbindungen zwischen der SMA, der pre-SMA und der Zeitschätzung bekannt (Schubotz et al., 2000; Coull et al., 2004). Demzufolge wurden die zeitlichen Vorgaben, die in anderen Studien gegeben sind, in der im Folgenden beschriebenen Studie explizit verändert, um die Auswirkungen der zeitlichen Parameter auf das BP zu testen.

Sollte es tatsächlich die Anstrengungen des Probanden widerspiegeln, mit den Zeitvorgaben in einer zeitlich unstrukturierten Situation zurecht zu kommen, wird das BP absinken, sobald die Anstrengung durch Hilfen reduziert wird. Eine solche Hilfe wäre es, die Sekunden zu zählen. Standard scheint es jedoch in der BP Forschung zu sein, die Sekunden nicht zu zählen (explizit erwähnt z.B. von Matsushashi and Hallett, 2008; Misirlisoy and Haggard, 2014), vermutlich aus Sorge, die Probanden könnten keine unabhängige Intention zur Bewegung haben, wenn die Handlung von ihrem Zählen getriggert wird. Verleger et al. (2016) führten eine Studie durch, bei der einmal die Anweisung gegeben wurde, nicht zu zählen, und in einem anderen Teil des Experiments gefordert wurde, die Sekunden zu zählen, die als Minimum-Zeitabstand (1,2,3,5 sec) angegeben waren. Es wurde vermutet, dass das BP kleiner wird, wenn willkürliches Handeln durch Zählen ersetzt wird. Dies konnte bestätigt werden.

Um die Frage zu untersuchen, in welchem Ausmaß das BP beeinflusst wird, wurden zwei Experimente durchgeführt.

In Experiment Eins wurde die Abhängigkeit des BPs vom zeitlichen Rahmen untersucht. Es galt zu untersuchen, ob eine externe auditive Zählhilfe ein Absinken des BP bewirkt, beziehungsweise ein auditiver Störfaktor es ansteigen lässt. Eine regelmäßig bzw. unregelmäßig tickende Uhr stellte die auditive Zählhilfe bzw. den Störfaktor dar. Die Hypothese ist, dass das BP bei einer auditiven Zählhilfe geringer wird und im Gegensatz dazu bei einem Störfaktor (der die Tick-Geschwindigkeit nach jeder Bewegung verändert) größer wird, da sich die innere Uhr gegen die unregelmäßig tickende Uhr durchsetzen muss.

In Experiment Zwei wurde die Abhängigkeit des BPs von der Aufmerksamkeit geprüft. Es wurden, um den akustischen Reiz auszuschließen, Stummfilme gezeigt, die unterschiedlich stark die Aufmerksamkeit der Probanden erregen und somit zu unterschiedlichem Grad ablenken sollten. Sollte die BP-Amplitude unter Ablenkung größer werden, spräche es dafür, dass die Handlung und somit die Zeitschätzung bewusst geschieht und die innere Uhr gegen die Ablenkung ankämpfen muss. Sollte sie unter Ablenkung kleiner werden, spräche es hingegen dafür, dass die Handlung unterbewusst geschieht. Sollte sich die BP Amplitude nicht signifikant in die eine oder andere Richtung bewegen, unterstützt dies die BP Hypothesen von Eccles, Schurger, Jo und Schmidt (Eccles, 1985; Schurger et al., 2012; Jo et al., 2013; Schmidt et al., 2016) sowie auch die klassische BP Hypothese, dass vor einer willentlichen Bewegung ein bewegungsbezogenes Potential konzentrationsunabhängig aufgebaut wird. Meine Hypothese ist, dass die BP-Amplitude unter Ablenkung, also während des Stummfilms, größer würde, da die Versuchspersonen mehr Konzentration auf die Bewegungsausführung aufwenden müssten.

2 Experiment 1

2.1. Einleitung

In Experiment Eins wurde die Abhängigkeit des BPs vom zeitlichen Faktor untersucht. In diesem Experiment wurde eine externe Zählhilfe (tickende Uhr) zur Verfügung gestellt. Es wurde erwartet, dass das BP bei 2 Schlägen/Sekunde einer tickenden Uhr geringer wird und im Gegensatz dazu bei einer kaputten, unregelmäßig tickenden Uhr größer (hier wird die Tick-Geschwindigkeit nach jeder Bewegung verändert), da sich die innere Uhr gegen die unregelmäßig tickende Uhr durchsetzen muss.

2.2. Material und Methoden

2.2.1. Versuchspersonen

An den Versuchen nahmen 20 Versuchspersonen teil, 9 Männer und 11 Frauen. Davon konnten die Daten von 7 Männern und 9 Frauen verwertet werden. Die restlichen vier wiesen aufgrund von zu vielen Artefakten zu wenig verwertbare Daten in einer oder mehreren Bedingungen auf und konnten deshalb nicht verwertet werden.

Die Versuchspersonen mussten unter 30 Jahre alt, Studenten, Rechtshänder und in ihrer Vorgeschichte ohne neurologische sowie psychische Störungen sein. Des Weiteren durften sie keine Psychopharmaka einnehmen. Sie waren zwischen 21 und 29 Jahre alt, was einen Altersdurchschnitt von 25 Jahren ergab.

Alle Probanden unterschrieben vor Beginn der Versuche eine Aufklärung und eine Einwilligung. Jeder Proband bekam zudem eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 7,50 Euro pro Stunde, was insgesamt pro Person zwischen 15 und 20 Euro ergab.

2.2.2. Versuchsaufbau

Die Probanden saßen in einem Raum, auf einem gepolsterten Stuhl mit ebenfalls gepolsterten Armlehnen. An der rechten Armlehne war eine drehbare beschichtete Holzplatte waagrecht als Tisch montiert. Auf dem Tisch lag eine handelsübliche

Computermaus. Die Arme der Probanden konnten entspannt auf den Lehnen und der rechte Zeigefinger auf der linken Maustaste abgelegt werden. Der Stuhl stand etwa 1,20 m von einem 17 Zoll Bildschirm entfernt. Der Raum wurde für den Zeitraum des Versuchs abgedunkelt.

Die Probanden sollten während des Versuchs auf den hellgrauen (RGB-Werte von 180) Bildschirm schauen und ein dort abgebildetes schwarzes Kreuz von der Größe 3 x 3 mm fixieren. Sie sollten willkürlich die Maustaste drücken, jedoch ungefähr 4 Sekunden zwischen dem Drücken Abstand halten. Drückten sie innerhalb von zwei Sekunden, war in roter Schrift das Wort "Zu früh gedrückt!" für 4 sec zu sehen und sie mussten 2 sec warten.

Abgesehen vom Blinzeln sollten sie sich nicht bewegen und nicht mitzählen.

Dieser Versuch war in 3 Blöcke gegliedert. In einem Block tickte eine Uhr regelmäßig, zwei Schläge / Sekunde (= 4 Schläge / 2 Sekunden), bei einer Lautstärke von 30 Dezibel (15 dB über der Grundlautstärke im Raum). In einem zweiten Block tickte die Uhr unregelmäßig zwischen 2, 3, 5 oder 6 Schlägen / 2 Sekunden in der gleichen Lautstärke, und bei einem dritten Block tickte keine Uhr. Dies war die Kontrollbedingung. Das Programm Presentation 17.2 bestimmte, dass die Bedingungsreihenfolge auf 20 Probanden möglichst gleich verteilt wurde. Da vier Probanden nicht gewertet werden konnten, war es ungleich verteilt. Alle Bedingungen hatten zwischen ein und vier Probanden. Die Reihenfolge "2,3,1" hatte nur einen Probanden, die Reihenfolge "3,1,2" hatte zwei Probanden, die Reihenfolge "1,2,3" hatte vier Probanden. Die Reihenfolgen "1,3,2", "2,1,3" und "3,2,1" hatten jeweils drei Probanden. Die Zahl 1 steht in diesem Experiment für die Kontrollbedingung "Uhr tickt nicht", die Zahl 2 für „Uhr tickt regelmäßig“ und die Zahl 3 für „unregelmäßig“.

Nach 100 Tastendrücken endete der jeweilige Block automatisch.

2.2.3. EEG - Ableitung

Die Ag/AgCl Ringelektroden, die in einer Haube (Easycap, www.easycap.de) fixiert wurden, leiteten das EEG ab. Zur Anwendung kam das 10/20-System. Es wurden folgende Elektrodenpositionen auf dem Kopf abgeleitet (in fronto-okzipitaler Reihenfolge: siehe www.easycap.de, Stand 04.04.2016): Fpz, AFz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz, AF3, AF4, F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, FC1, FC2,

FC3, FC4, FC5, FC6, FT7, FT8, C1, C2, C3, C4, C5, C6, T7, T8, CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, TP7, TP8, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, PO3, PO4, PO7, PO8, PO9, PO10, O1, O2. Die Elektrodenpositionen sind zudem nachvollziehbar durch die schematische Darstellung in Abbildung 1 und 2.

Hier wurden 66 Elektroden positioniert, davon 60 auf dem Kopf, inklusive der Online-Referenzelektrode auf Position Fz, plus einer Erdungselektrode auf der Stirn (Position Fpz) (siehe Abbildung 2), sowie vier um die Augen und eine auf der Nase (Offline-Referenzelektrode) (siehe Abbildung 3 und 4). Die angebrachten Elektroden an den Augen ergaben nach der Ableitung ein Elektrokulogramm (EOG), mit dem Augenbewegungen und Blinzeln registriert werden konnten. An den Augen war jeweils eine Elektrode am lateralen Augenrand (hEOG) mit Klebeband fixiert. Am rechten Auge waren zusätzlich in vertikaler Ausrichtung eine Elektrode mittig oberhalb des Auges und eine mittig unterhalb des Auges durch Klebeband fixiert (vEOG). Die Kopfhaut wurde mit einem in Alkohol (Cutasept der Firma Bode Chemie, Hamburg) getränkten Wattestäbchen aufgeraut und entfettet. Im Gesicht wurde die Haut an den Stellen, die mit Elektroden beklebt werden sollten, mit jenem Alkohol und einer Peelingpaste (Everi, Conductive and abrasive paste, Spes Media – Italien) gereinigt. Damit bei der Ableitung der Widerstand zwischen Haut und Elektrode möglichst gering und unter 5 kOhm bleibt, wurde abrasives Elektrodengel (Zusammensetzung: NaCl, Lapis Pumicis, Traganth, Glycerin, Kalium Hydrogentartaricum, Phenolum liquefact 0.2%, in wässriger Lösung; Theodor-Körner-Apotheke, A- 8010 Graz) in das mittige Loch der Elektroden gespritzt. Dabei musste genau darauf geachtet werden, dass das Elektrodengel nicht zu großzügig in die Elektroden gegeben wurde, um keinen Kontakt zwischen den einzelnen Elektroden herzustellen. Um einen stabilen elektrochemischen Status sicherzustellen, ließ ich die Elektroden nach dem Befüllen und vor Versuchsbeginn 10 Minuten ruhen. Nach Versuchsbeginn trat das EEG als sehr kleines elektrisches Signal den Weg durch das Kabel über den Vorverstärker zum Differenzverstärker an. Der Verstärker BrainAmp MR plus (Brain Products GmbH, Gilching, Germany) verstärkt von DC (“direct current” = Gleichspannung) bis 1000 Hz. Dies geschieht nach dem Prinzip der Gleichtaktunterdrückung, das heißt Störsignale wurden eliminiert, sofern sie an beiden Elektroden gleichzeitig auftraten. Die zwei elektrisch aktiven Punkte waren in diesem Experiment die Referenzelektrode und eine weitere Elektrode.

Der Verstärker sendete die registrierte elektrische Aktivität des Gehirns an den Analog-Digital-Wandler, welcher die Spannung mit einer Genauigkeit von $0,1 \mu\text{V}$ per bit umwandelt und mit einer Abtastrate von 500 Hz auf dem Aufnahmerechner (Windows 8, 32 bit) mit dem Programm "Brain Vision Recorder" Version 1.2 (Brain Products GmbH, Gilching, Germany) speichert. Die Offline Verarbeitung wurde mit der Brain Vision Analyser software (Version 2.1) durchgeführt. Der Brain Vision Recorder speicherte auch die Codes, die durch das Steuerprogramm "Presentation 17.2." bei Tastendruck entstehen. Die Codes des ersten Experimentes waren "S1" für „keine Uhr“, "S2" für „Uhr tickt regelmäßig“, "S3" für „Uhr tickt unregelmäßig“.

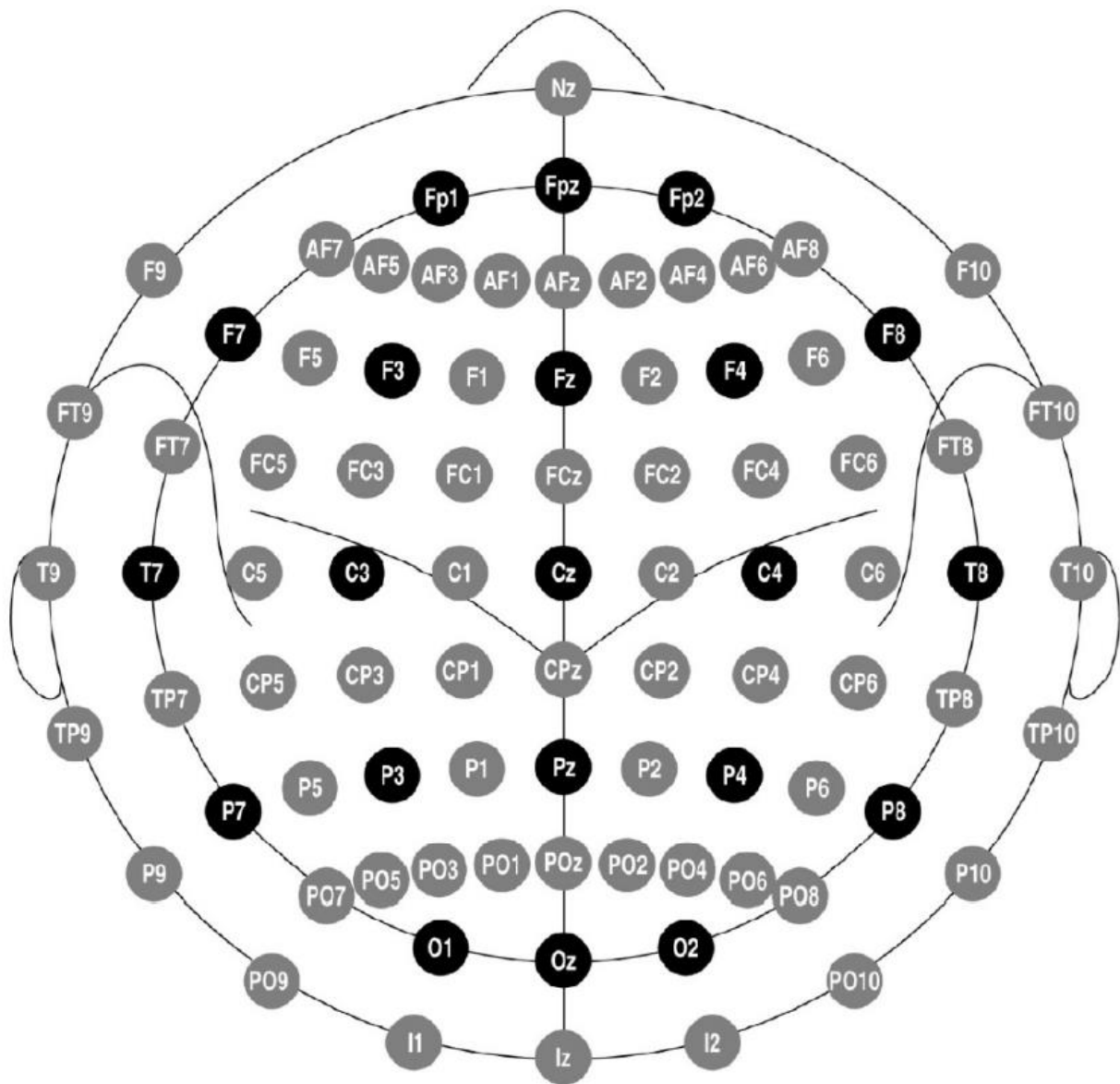


Abbildung 1 (Oostenveld und Praamstra, 2001):

Das EEG-Schema zeigt die schematische Darstellung der Elektrodenpositionen. Die schwarz markierten Elektroden stellen das 10-20 System da. Die grau markierten Elektroden stellen die Erweiterung im 10-10 System dar, welches teilweise auch für diesen Versuch genutzt wurde. Die Abkürzungen stehen für die Position der Elektrode auf den Achsen von rostral nach caudal (auf der Grafik sind es die vertikalen Linien). AF für antero-frontal, F für frontal, C für zentral, T für temporal, CP für zentro-parietal, FC für fronto-zentral, P für parietal, PO für parieto-okzipital, O für okzipital. Die darauffolgenden Zahlen und Buchstaben geben die Lokalisierung auf den Achsen von links nach rechts (in der Grafik sind es die horizontalen Linien) an. So steht der Zusatzbuchstabe z (= zero = engl.

Null) für eine Lokalisation auf der Medianlinie des Kopfes. Ungerade Zahlen stehen für links, gerade Zahlen für rechts. In dieser Abbildung sind 85 Elektrodenpositionen angegeben. Für den beschriebenen Versuch wurden davon 64 verwendet, siehe Abbildung 2.

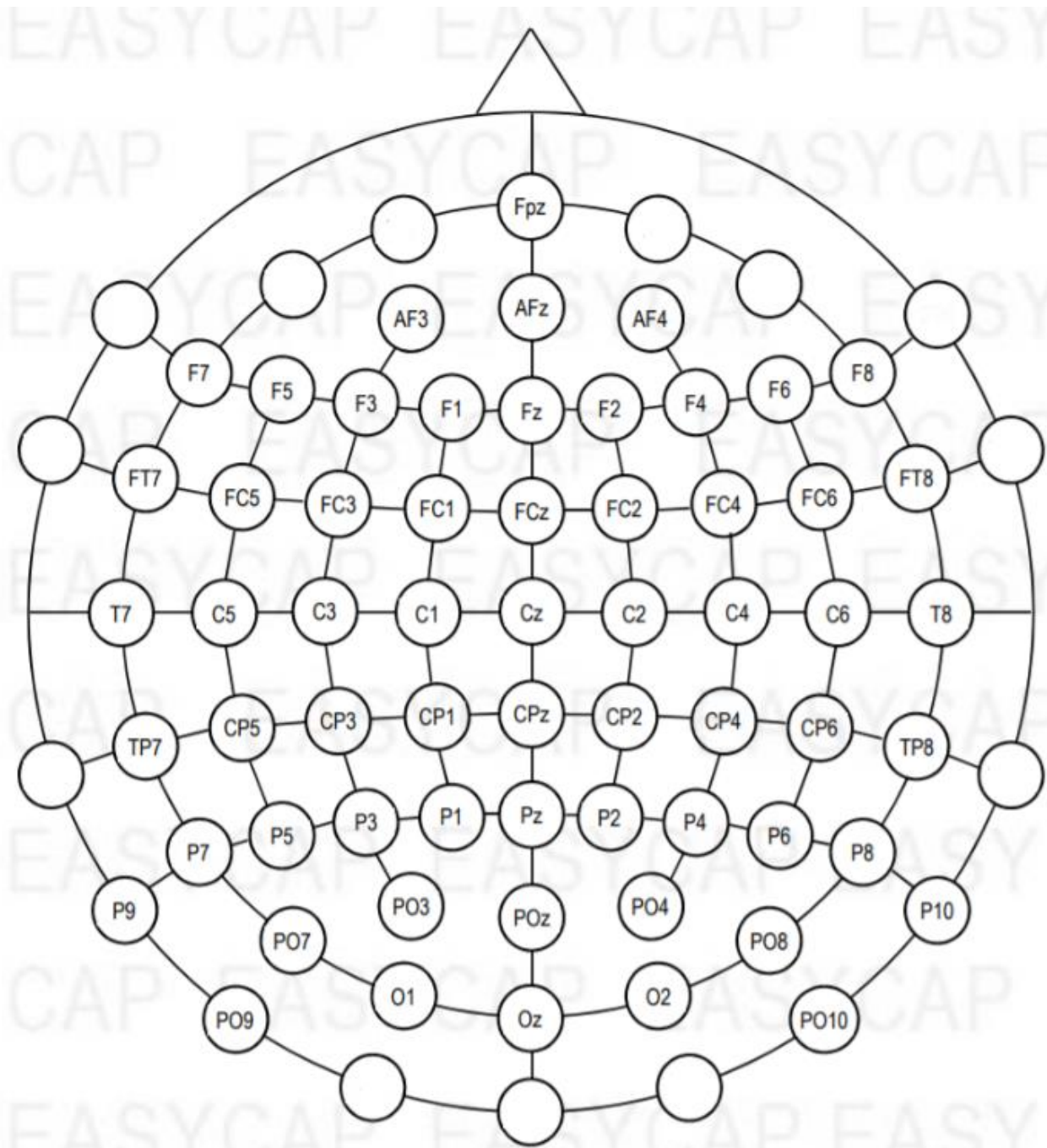


Abbildung 2: Modifizierte Abbildung von www.easycap.de. In dieser Abbildung ist die Anordnung von 61 Elektroden auf dem Kopf zu erkennen. Die Position Fpz wurde nur als Erdungselektrode genutzt.



Abbildung 3: Elektrodenpositionen im Gesicht (von links) © A. Baur



Abbildung 4: Elektrodenpositionen im Gesicht (von rechts) © A. Baur

2.2.4. Datenverarbeitung

2.2.4.1. Verarbeitung der Verhaltensdaten

Die Maßzahlen für korrektes Verhalten und inkorrektes Verhalten wurden in einer von Prof. Verleger geschriebenen Excel Tabelle codiert und gespeichert.

Korrektes Verhalten wurde mit der Zahl "64" codiert. Dazu gehörten alle Tastendrucke (TD), die mit mehr als 2 sec und weniger als 10 sec Abstand zum vorhergehenden ausgeführt wurden. Der Mittelwert und die Standardabweichung (SD) wurden erhoben.

Die Maßzahlen für inkorrektes Verhalten waren "zu spät gedrückt" und "zu früh gedrückt". Als "zu früh gedrückt" galt jeder TD, der weniger als zwei sec Abstand zum letzten Drücken hatte, und wurde in derselben Excel Tabelle unter dem Code "31" gespeichert. Als "zu spät gedrückt" galt jeder TD, der 10 Sekunden und mehr Abstand zum letzten TD hatte, dieser wurde als "zu spät" gespeichert.

2.2.4.2. Verarbeitung der EEG-Daten

Für die EEG-Datenverarbeitung wurden der „Brain Vision Analyzer“ (Brain Products GmbH, München, Version 2.1), die Windows Excel Version 2010 und die Software SPSS herangezogen. Als erster Schritt wurde die Referenz verändert und die Nasenelektrode zur Offline-Referenz bestimmt. Ein Tiefpass-Filter, der alle Frequenzen über 20 Hz um 24 dB pro Oktave abschwächt, sowie ein „Notch“(Kerb)-Filter wurden eingesetzt. Dieser unterdrückt selektiv eine Artefaktaktivität von 50 Hz. Diese Artefaktaktivität wird von der Stromleitung und allen mit Wechselstrom betriebenen, elektrischen Geräten erzeugt und würde das EEG überlagern (Luck, 2005). Die Aufzeichnungen wurden zum Knopfdruck hin segmentiert. Jedes Segment dauerte von 5000 ms vor dem Knopfdruck bis 1000 ms nach dem Knopfdruck. Im Anschluss wurden die Segmente mit groben Artefakten herausgeschnitten, damit diese später nicht mit Augenartefakten verwechselt werden. Bei dieser Prozedur waren die Augenelektroden und die drei vordersten Elektroden auf dem Kopf (Positionen: AF3, AFz, AF4) ausgeschlossen, damit das Blinzeln nicht als grobes Artefakt gewertet wurde. Die Korrektur betraf nur Segmente, in denen eine Spannungsänderung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Datenpunkten über 50 μ V vorkam oder deren Differenz

zwischen dem Spannungsminimum und -maximum $250 \mu\text{V}$ überschritt. Nun musste die Grundlinie korrigiert werden, indem der Mittelwert der ersten 100 ms jedes Segmentes als Grundlinie bestimmt und auf $0 \mu\text{V}$ gesetzt wurde; d.h. der Mittelwert wurde vom gesamten Kurvenverlauf abgezogen. Die Augenkorrektur (Gratton & Coles) wurde anschließend angewandt, um die Artefakte durch die Augenbewegungen und das Blinzeln herauszurechnen. Hier wurde die Elektrode neben dem linken Auge gegen die Elektrode neben dem rechten Auge und die Elektrode über dem rechten Auge gegen die Elektrode unter dem rechten Auge referenziert. Danach wurde der durch die Augen-Elektroden registrierte Ausschlag mittels linearer Regression von den übrigen Elektroden am Kopf subtrahiert. Die Grundlinie wurde erneut korrigiert, wie oben beschrieben. Nach diesem Herausrechnen der großen Blinzelpotentiale aus dem EEG wurden nun alle Segmente erneut auf Artefakte untersucht. Die Segmente mit Amplituden, die den Betrag von $\pm 150 \mu\text{V}$ überschritten, wurden entfernt. Die Vorverarbeitung der einzelnen Segmente war hiermit abgeschlossen. Nun wurden die Segmente der drei verschiedenen Aufgabenblöcke getrennt in "Uhr tickt regelmäßig", "Uhr tickt unregelmäßig" und "Kontrollbedingung (kein Ticken)". Innerhalb jeder Kategorie wurde der Mittelwert der Segmente bestimmt, sodass für jede Versuchsperson drei mittlere Kurven vorhanden waren. Danach folgte die Gleichstrom-Korrektur (DC Detrend). Diese rechnet die DC-Tendenz (Effekt der langsamen Elektrodenpolarisation) aus dem EEG Signal heraus. Zuletzt wurde noch einmal ein Tiefpass-Filter eingesetzt, der alle Frequenzen über 8 Hz um 24 dB pro Oktave abschwächte.

2.2.4.3. Verarbeitung der BP-Daten

Zur Veranschaulichung wurden diese Mittelwerte über alle 16 Versuchspersonen gemittelt. Epochen von 100 ms vor und nach dem Mittelwertintervall der Tastendrucke, das hier unter allen Bedingungen bei 4.4 sec lag, wurden als neue Grundlinie des Bereitschaftspotentials bestimmt. Ausgewertet wurden die vier Ableitungen FCz, Cz, CPz und Pz, bei denen das BP am größten war, unter den drei Bedingungen der Uhr (keine, regelmäßig, unregelmäßig). BP-Amplituden wurden als Mittelwert der Amplituden aus dem Interval 300-100 ms vor der Bewegung bestimmt (siehe Abb. 10).

Der BP-Beginn wurde als der Zeitpunkt (nicht später als 300 ms vor der Bewegung) bestimmt, bei dem die BP-Amplituden um über 20% angestiegen sind. Die durchschnittliche Anzahl verwertbarer Tastendrucke lag bei 90 pro Bedingung, Minimum war 67. Potentiale nach der Bewegung wurden nicht analysiert.

2.2.4.4. Statistische Analyse (Verhaltensdaten & EEG-Daten)

Um die Tastendruckabstände zu untersuchen, wurden Mittelwerte (siehe Abbildung 5 und 6) und Standardabweichungen (SDs) (siehe Abbildung 7 und 8) der Intervalle für jeden Probanden zu jeder Bedingung bestimmt. Vier der ursprünglichen 20 Probanden hatten stark abweichende Werte in einer oder mehreren Bedingungen und wurden aus der Studie ausgeschlossen. Diese vier wurden aus verschiedenen Gründen nicht ausgewertet: aufgrund von zu wenig verwertbaren Daten nach dem beschriebenen Herausschneiden der EEG-Artefakte, weil der Median der Intervalle mehr als 2 SDs langsamer oder die Anzahl der zu frühen Tastendrucke mehr als zwei SDs höher war als bei den anderen Probanden. Mittelwerte und SDs der verbliebenen 16 Probanden wurden mit der Varianzanalyse (ANOVA, IBM SPSS, Version 22) ausgewertet.

Die ANOVA für die Analyse der BP-Amplituden und des BP-Beginns hatte einen Messwiederholungsfaktor – "Uhr" – mit drei Stufen: keine, regelmäßig, unregelmäßig. Die Ergebnisse der Varianzanalyse werden angegeben mit dem „F“-Wert und seinen Freiheitsgraden (die sich aus den Stufen des Faktors und der Anzahl der Versuchspersonen ergeben); daraus ergibt sich, mit welcher Probability „p“ (zu Deutsch Wahrscheinlichkeit) F gleich Null ist. „F“ ist der Quotient aus der interessierenden Varianz geteilt durch ihre Fehlervarianz (Streuung dieser Differenz zwischen den einzelnen Versuchspersonen). „F“ gibt somit ein Verhältnis an. Wenn $p < 5\%$, definiert man in konventioneller Weise, dass das Ergebnis nicht zufällig und damit signifikant ist. Wenn der Haupteffekt signifikant war, wurden die Unterschiede zwischen jeweils zwei Stufen mit ANOVAs nachgetestet.

2.3. Ergebnisse

2.3.1 Abstände zwischen den Tastendrücken

Mittelwert der Abstände zwischen den Tastendrücken

Wie auf Abbildung 5 und Abbildung 6 veranschaulicht, lagen die Durchschnittsintervalle der Abstände des mittleren Tastendrucks der Probanden zwischen 2 und 6 Sekunden. Lediglich ein Proband hatte große Abstände und lag bei knapp über 8 Sekunden. In Abbildung 6 liegt das Intervall in der Bedingung "regelmäßig tickende Uhr" bei 4,30 sec; bei der "unregelmäßig tickenden Uhr" liegt es bei 4,37 sec. Am größten sind die Intervalle mit 4,53 sec in der Kontrollbedingung. Diese Intervalle blieben somit im Durchschnitt mit 4,4 sec zwischen den verschiedenen Bedingungen ($F_{2,30} = 0,5$, n.s.) relativ stabil.

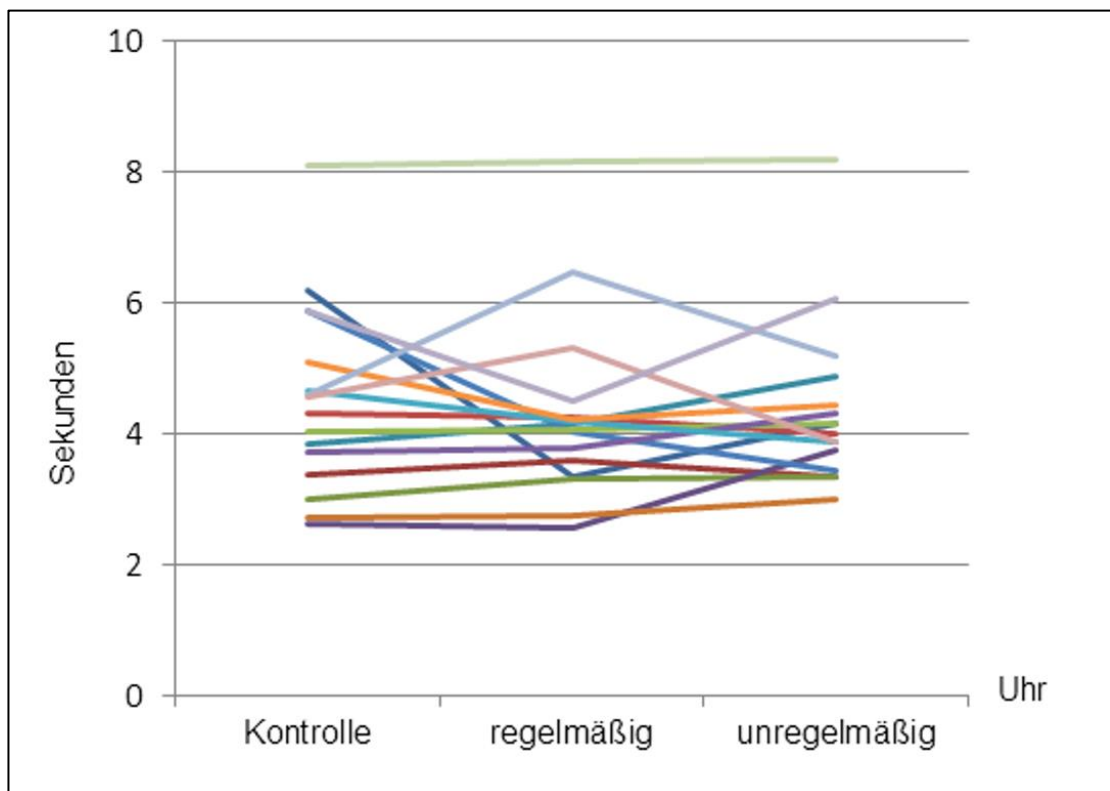


Abbildung 5: Mittelwerte der Abstände zwischen dem Tastendrücken für die einzelnen Probanden in Sekunden. Die X-Achse gibt die Bedingungen an und die Y-Achse die Sekunden. Jede bunte Linie steht für einen Probanden.

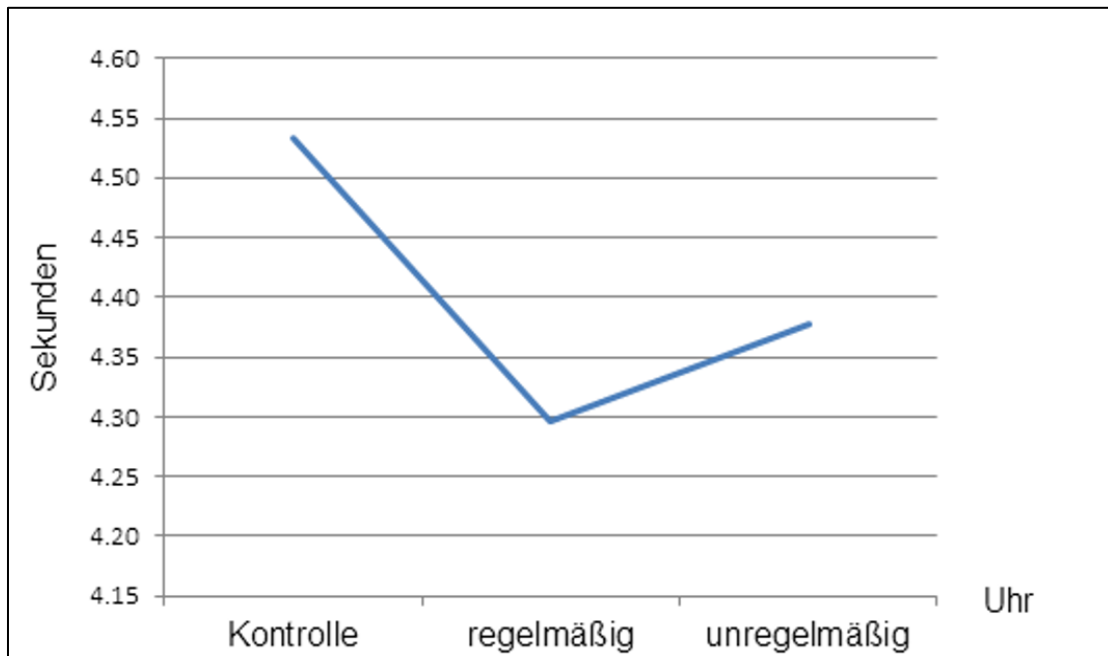


Abbildung 6: *Mittelwert der Abstände zwischen dem Tastendrücken aller Probanden in Sekunden. Die X-Achse zeigt die Bedingungen an und die Y-Achse die Sekunden. Die blaue Linie steht für den Mittelwert aller Probanden.*

Die Standardabweichung (SD)

Die Standardabweichungen waren alle sehr ähnlich und lagen im Bereich zwischen 0 und 2 sek (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). In Abbildung 7 werden die Tastendruckabstände der einzelnen Probanden noch einmal veranschaulicht. Die Standardabweichung in Abbildung 8 sinkt bei der "regelmäßig tickenden Uhr" etwas ab, allerdings mit so großen Unterschieden zwischen den Probanden, dass der Unterschied zwischen den Konditionen nicht signifikant war, $F_{2,30} = 2,1$, $p = 0,16$.

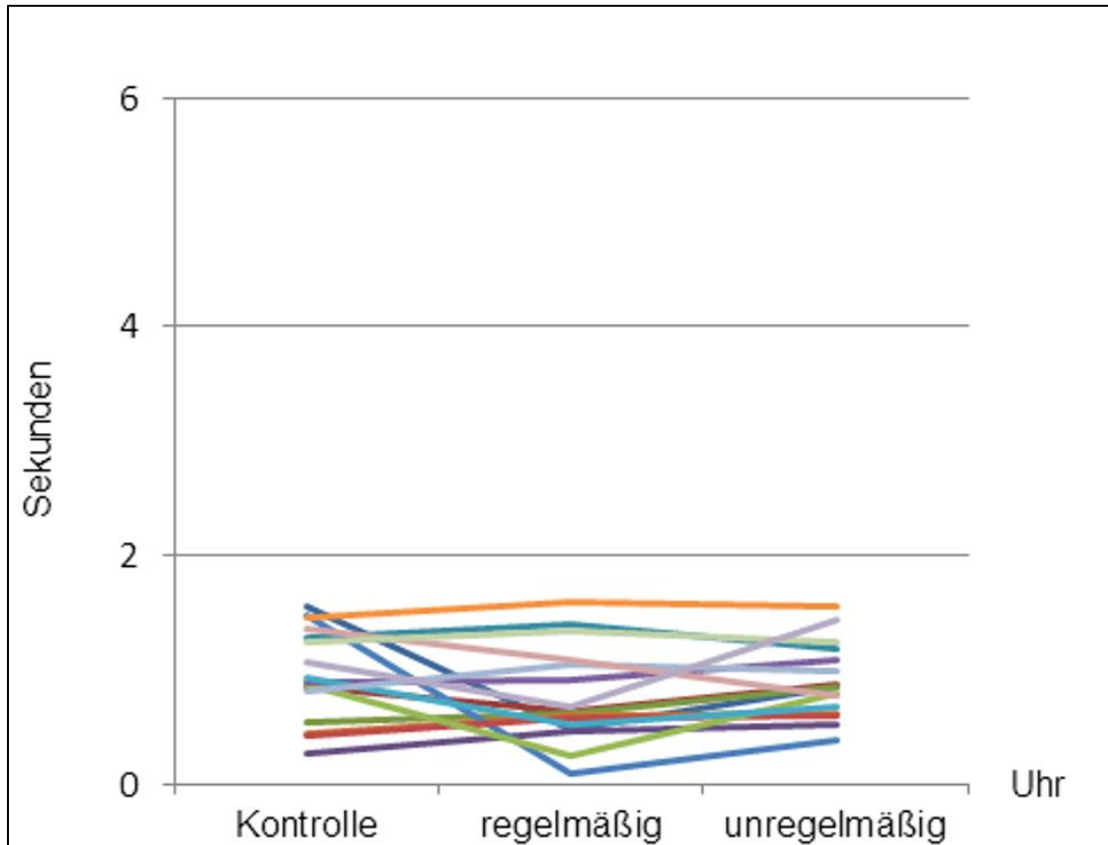


Abbildung 7: Standardabweichung der Tastendruckabstände der einzelnen Probanden.

Jede bunte Linie steht für einen Probanden. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an, und die X-Achse zeigt an, welche der Bedingungen herrscht: ob keine Uhr tickt (Kontrolle), ob die Uhr regelmäßig 2 mal/sec tickt oder ob sie unregelmäßig (2, 3, 5, 6 mal/sec) tickt.

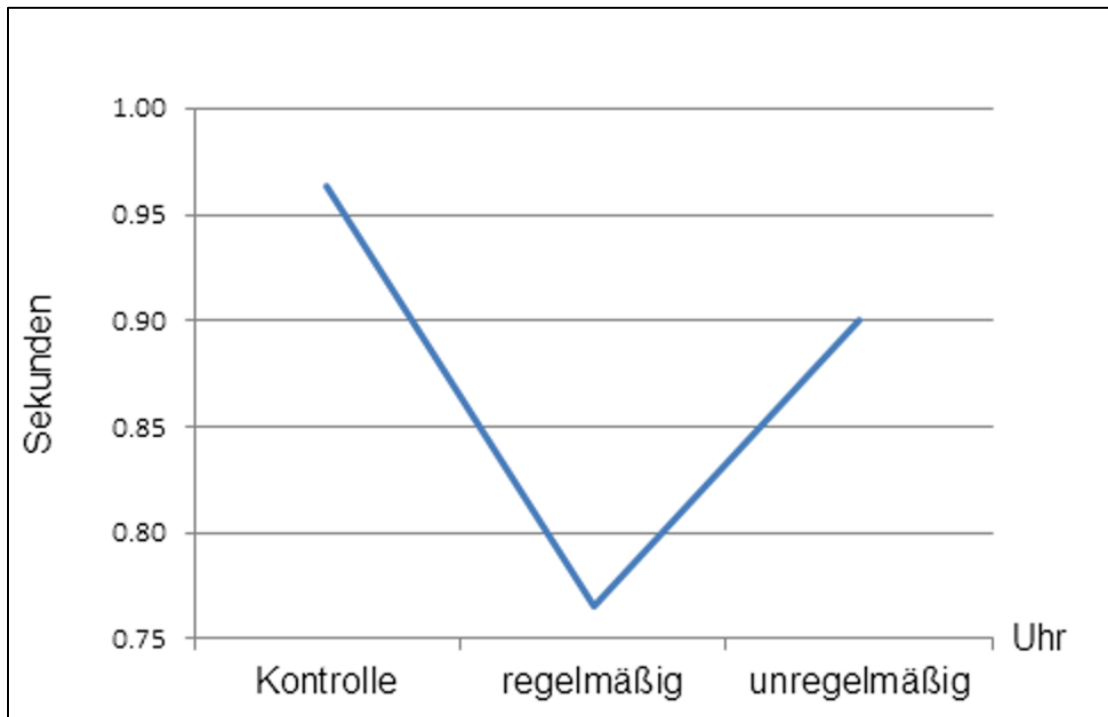


Abbildung 8: *Mittlere Standardabweichung der Tastendruckabstände aller Probanden zwischen dem Tastendrücken in Sekunden wird durch die blaue Linie angezeigt. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an, und die X-Achse zeigt die drei Bedingungen an.*

2.3.2. "Zu früh gedrückt"-Quoten

Im Durchschnitt drückte jeder Proband bei der Kontrollbedingung in 1,55 % der Durchgänge zu früh auf die Maustaste (siehe Abbildung 9). Die Abbildung 10 veranschaulicht noch einmal jeden Probanden einzeln. Bei der regelmäßig tickenden Uhr drückte der Durchschnitt der Probanden nur 0,31 % zu früh auf die Maustaste und bei der unregelmäßig tickenden Uhr lag der Mittelwert des Prozentsatzes bei 2,23%. Alle drei Bedingungen miteinander waren signifikant ($F_{2,30} = 6,1$; $p = 0,01$). Die Kontrollbedingung war signifikant unterschiedlich zur regelmäßig tickenden Uhr-Bedingung ($F_{1,15} = 9,8$; $p = 0,007$), jedoch nicht zur unregelmäßig tickenden Uhr-Bedingung ($F_{1,15} = 1,1$; n.s). Die regelmäßig tickende Uhr-Bedingung war ebenfalls signifikant verschieden zur unregelmäßig tickenden Uhr-Bedingung ($F_{1,15} = 9,9$; $p = 0,007$).

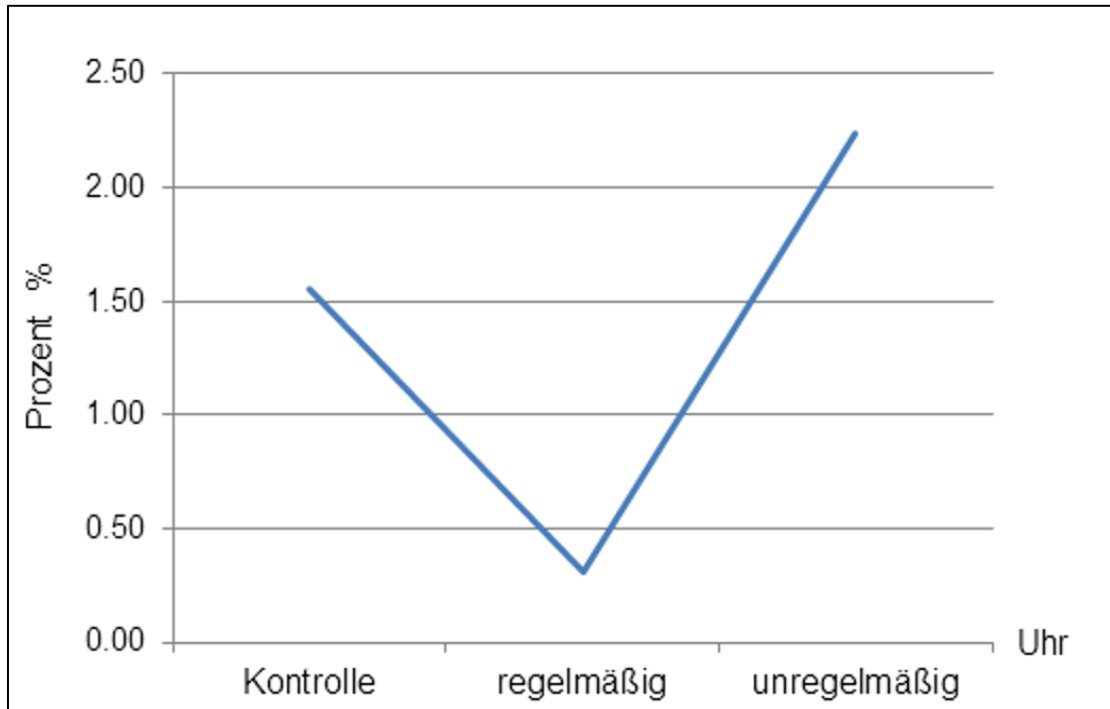


Abbildung 9: *Mittelwert der Anzahl des Zu-früh-Drückens aller Probanden in % wird durch die blaue Linie veranschaulicht. Auf der Y-Achse werden von 100 Tastendrücken die jeweiligen % des Zu-früh-Drückens der Probanden und auf der X-Achse die drei verschiedenen Bedingungen angezeigt.*

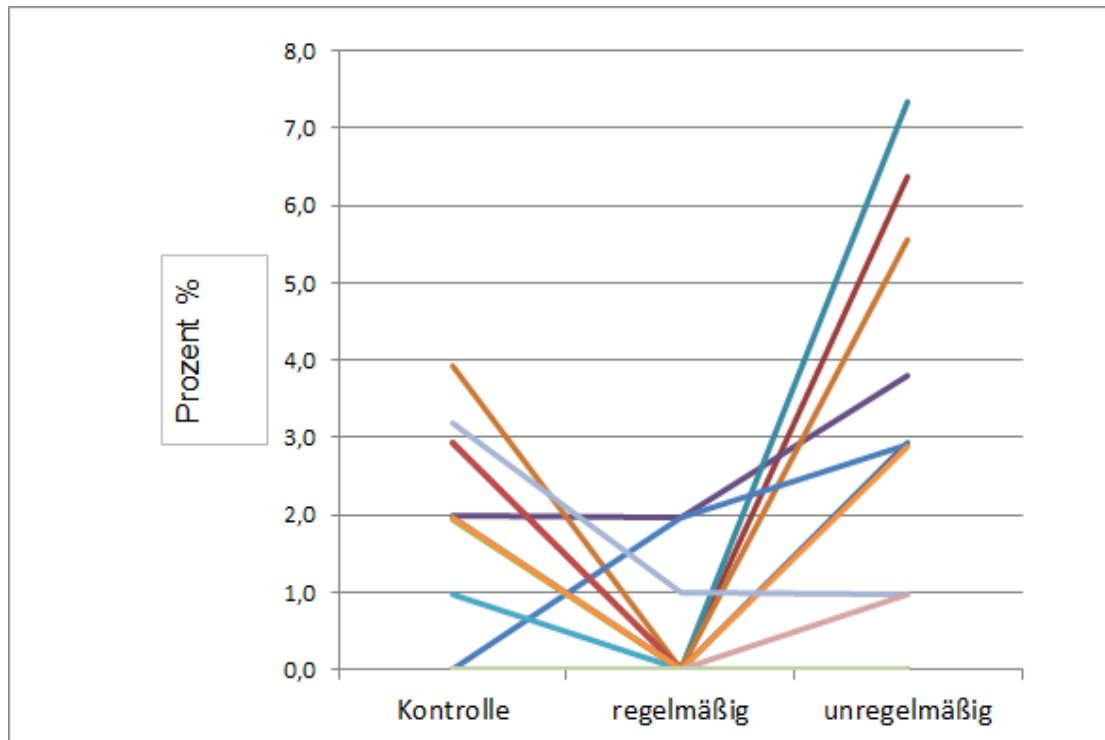


Abbildung 10: *Mittelwert der Anzahl des Zu-früh-Drückens der einzelnen Probanden in %. Die bunten Linien stellen den jeweiligen Probanden dar. Auf der Y-Achse werden bei 100 Tastendrücken die jeweiligen % des Zu-früh-Drückens und auf der X-Achse die drei verschiedenen Bedingungen angezeigt.*

2.3.3. Bereitschaftspotential

Die Kurven des Gesamtmittelwerts werden in Abbildung 11 dargestellt. Das BP wurde an den Ableitungsorten FCz, Cz, CPz, Pz auf der Mittellinie gemessen (siehe Kopftopographien in Abbildung 11). Bei allen Ableitungsorten war die BP-Amplitude gleich groß ($F_{3,45} = 1,2$, n.s.). Wie in Abbildung 11 veranschaulicht, wurde die BP-Amplitude weder kleiner, wenn die Zeit extern bestimmt wurde (regelmäßig tickende Uhr), noch wurde sie im Vergleich zur Kontrollbedingung (keine Uhr) größer, wenn die "Innere Uhr" mit der extern vorgegebenen Zeit nicht übereinstimmte (unregelmäßig tickende Uhr). Die Unterschiede zwischen den Bedingungen auf das BP waren nicht signifikant ($F \leq 1,6$; $p \geq 0,20$). Demnach gab es keine Auswirkungen durch die Uhrbedingungen.

Mittelwert verschiedener Stichproben bei Cz, n = 16

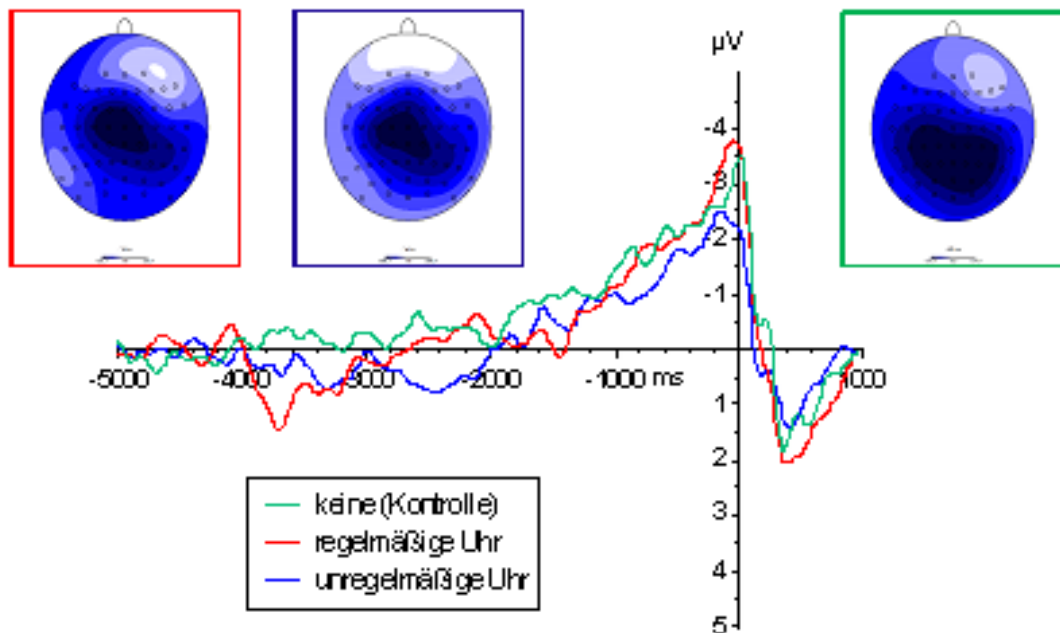


Abbildung 11: Mittelwerte der Amplituden bestimmt bei Elektrodenposition Cz (n=16). Zeitpunkt 0 ist der Zeitpunkt des Tastendrucks. Die abgebildete Graphik veranschaulicht die dort durchschnittlich gemessenen BP-Amplituden während des BP-Höhepunktes (0.2-0.0 sec vor der Bewegung) gegenüber der Grundlinie (4,9-5,0 sec vor der Bewegung). Die grüne Kurve zeigt die Amplitude während der Kontrollbedingung. Die rote Kurve zeigt die Amplitude während der regelmäßig tickenden Uhr-Bedingung. Die blaue Kurve stellt die Amplitude während der unregelmäßig tickenden Uhr-Bedingung dar. Die Topographien des Kopfes zeigen die Lokalität der Hirnaktivität zum Zeitpunkt der Messung (farblich markiert, je nach Bedingung). Die Ansicht des Kopfes ist von oben, mit Cz im Zentrum und dem Ohrenlevel (=120°) an der Außenlinie und der Nase oberhalb der Topographie. Die blaue Farbe zeigt die negative Polarität an, die weiße Farbe keine und Rot wäre positiv. Die Skalierung ist immer Minimum zu Maximum variierend zwischen den Topographien. Die rot und blau umrandeten Topographien zeigen ein klares Minimum im zentralen Bereich. Bei der grün umrandeten Topographie liegt das Minimum im zentro-okzipitalen Bereich.

2.4. Diskussion

Das Ziel dieses Experiments war zu testen, in welchem Ausmaß die Bereitstellung einer externen Uhr die innere Uhr abschwächt und das BP dadurch kleiner wird, bzw. inwiefern die unregelmäßig tickende Uhr den Rhythmus so stört, dass die innere Uhr dagegenhalten muss und das BP größer wird. Die Hypothese konnte nicht bestätigt werden, da sich sowohl die BP-Amplitude als auch die zeitlichen Abstände zwischen dem Tastendrücken unter den drei Bedingungen (keine Uhr/ regelmäßig tickende Uhr/unregelmäßig tickende Uhr) nicht veränderten. Als Ursache könnte vermutet werden, dass das BP nicht wie vermutet mit der Zeitschätzung zusammenhängt oder dass dieser Zusammenhang von uns nicht nachgewiesen werden konnte.

3 Experiment 2

3.1. Einleitung

Im Experiment Zwei wurde die Abhängigkeit des BPs von der Aufmerksamkeit geprüft. Es gab zwei Gruppen. In Gruppe (1) wurde ein Charlie Chaplin- Stummfilm (C.C.) und als Kontrolle ein Grand Canyon-Naturfilm (G.C.) gezeigt. In Gruppe (2) wurde der C.C.-Stummfilm und als Kontrolle ein schwarzer Bildschirm gezeigt. Es wurden Stummfilme gezeigt, um einen eventuellen akustischen Einfluss auszuschließen. Der C.C.-Film sollte zeigen, dass das BP unter Ablenkung größer wird, da die Versuchspersonen sich mehr auf die Bewegungsausführung konzentrieren mussten.

3.2. Material und Methoden

Es sind im Folgenden die Unterschiede gegenüber dem Experiment Eins erläutert.

3.2.1. Versuchspersonen

Es nahmen 20 Versuchspersonen teil, davon waren 9 Männer und 11 Frauen. Die Daten von 8 Männern und 10 Frauen konnten in die Auswertung einbezogen werden. Die Ergebnisreihen von zwei Probanden konnten aufgrund von zu wenig verwertbaren Daten nicht ausgewertet werden. Einer war eingeschlafen und bei dem anderen war das mediane Intervall der Tastendrucke mehr als 2 SDs langsamer als bei allen anderen Probanden.

Die Anforderungen an die Versuchspersonen hinsichtlich ihres Alters, Rechtshändigkeit und Gesundheit waren die gleichen wie in Experiment 1. Sie waren zwischen 19 und 28 Jahre alt, das ergab einen Altersdurchschnitt von 23 Jahren.

3.2.2. Versuchsaufbau

Die Probanden saßen in diesem Experiment vor einem größeren Bildschirm (21 Zoll) als in Experiment 1.

Die Probanden sollten während des Versuchs auf den Bildschirm schauen und willkürlich die linke Taste auf der mit der rechten Hand bedienten Maus drücken. Das Drücken sollte alle paar Sekunden willkürlich geschehen, jedoch sollten sie wie bereits in Experiment 1, nicht mitzählen und sich nicht bewegen. Der Mausklick und Blinzeln waren erlaubt. Weiterhin sollten sie während des Experiments den Bildschirm fixieren. Das ganze Experiment lief stumm ab. Für die ersten 10 Probanden (Gruppe 1) lief auf dem Bildschirm einmal 20 Minuten ein Grand Canyon (G.C.)-Naturfilm als Kontrollfilm und weitere 20 Minuten der Charlie Chaplin (C.C.)-Stummfilm "The Count", in abwechselnder Reihenfolge. Die Probanden mit ungeraden Nummern fingen mit C.C. an, die mit geraden sahen zuerst den Naturfilm. Ab Proband Nummer 11 (Gruppe 2) wurde 20 Minuten lang der C.C.-Film und die anderen 20 Minuten ein schwarzer Bildschirm gezeigt. Wieder fingen die ungeraden Nummern mit C.C. an. Den Probanden wurde vor dem Versuch angekündigt, dass sie direkt nach dem Versuch einen Fragebogen mit inhaltlichen Fragen zum Film bekommen würden. Darin wurden sie zusätzlich gefragt, ob sie ein Muster zum Drücken der Maustaste entwickelt hatten (Abb.12). Nur bei den ersten 10 Probanden wurde der Raum für den Zeitraum des Abspanss

beider Filme abgedunkelt. Bei Gruppe 2 war das Licht während des 20 Minuten andauernden schwarzen Bildschirms an, damit diese nicht einschliefen. Zwischen den Filmen gab es jeweils eine kleine Pause von 2 Minuten, in der die Aufnahme mit dem Programm Brain Vision Recorder auf Pause stand. Das Programm "Presentation 17.2" sendete die Codes wie folgt an den Brain Vision Recorder: Code "S1" für alle Mausklicks während des C.C.-Films und Code "S2" bei Gruppe 1 für alle Mausklicks während des G.C.-Films, bei Gruppe 2 für alle Mausklicks während des schwarzen Bildschirms.

Das Programm "Presentation 17.2" bestimmte, dass die Bedingungsreihenfolge auf die 18 Probanden möglichst gleich verteilt wurde. Die ersten fünf Probanden mit ungeraden Probandennummern fingen jeweils im ersten Abschnitt mit dem C.C.-Film an, gefolgt vom G.C.-Film. Die ersten fünf mit geraden Probandennummern fingen den Versuch mit dem G.C.-Film an. Die letzten drei mit ungeraden Probandennummern starteten den Versuch auch mit dem C.C.-Film, bekamen aber im zweiten Abschnitt nur einen schwarzen Bildschirm (S.B.) zu sehen. Die letzten drei Probanden mit gerader Nummer starteten mit dem schwarzen Bildschirm und bekamen den C.C.-Film im zweiten Abschnitt zu sehen. Zwei der Probanden die einen schwarzen Bildschirm gezeigt bekamen, konnten nicht gewertet werden. Nach 20 Minuten wurde der jeweilige Abschnitt beendet.

3.2.3. Fragebogen

Den Probanden wurde vor dem Experiment mitgeteilt, sie würden nach dessen Beendigung einen Fragebogen zum Inhalt des Films bekommen (siehe Abbildung 12).

Bereitschaftspotentialstudie – Filmfragen –

Probandennummer _____

1. Was misst Charlie Chaplin unter anderem an der Frau beim Schneider ab?

- a) Füße
- b) Zähne

2. Was gibt Charlie Chaplin beim Dinner vor zu sein (Beruf)?

- a) Arzt
- b) Sekretär

3. Wie sind Sie die Aufgabe des Mausdrückens angegangen? Haben Sie eine Strategie entwickelt?

Abbildung 12: Fragebogen für die Probanden.

3.2.4. EEG - Ableitung

Das EEG wurde gleich abgeleitet wie in Experiment 1.

3.2.5. Datenverarbeitung

3.2.5.1. Verarbeitung der Verhaltensdaten

Die Maßzahlen für korrektes und inkorrektes Verhalten wurden in einer von Prof. Verleger geschriebenen Excel Tabelle codiert und gespeichert.

Korrektes Verhalten wurde mit der Zahl "64" codiert. Dazu gehörten alle Tastendrucke (TD) die mehr als 4 sec Abstand zum vorherigen Tastendruck hatten. Der Mittelwert und die SD wurden erhoben. Die Maßzahlen für inkorrektes Verhalten änderten sich im Vergleich zum ersten Experiment nur bei der "Zu früh gedrückt"-Grenze. Als Code "31" galt jeder TD, der 0,5 - 4 sec Abstand zum letzten TD hatte; er wurde in derselben Excel Tabelle unter dem Code "zu früh" gespeichert. Abstände mit weniger als 0,5 sec wurden dort als "Nachklapp" gespeichert.

3.2.5.2. Verarbeitung der EEG-Daten

Die Methoden der Analyse waren die gleichen wie im ersten Experiment.

3.2.5.3. Verarbeitung der BP-Daten

Zur Veranschaulichung wurden die Mittelwerte über alle 18 Versuchspersonen innerhalb der Aufgabe getrennt nach den zwei verschiedenen Bedingungen gemittelt. Epochen von 100 ms vor und nach dem Mittelwertintervall der Tastendrücke, das hier bei Gruppe (1) bei 6,9 sec und bei Gruppe (2) bei 5,9 sec lag, wurden als neue Grundlinie des Bereitschaftspotentials bestimmt. Ausgewertet wurden die vier Ableitungen FCz, Cz, CPz und Pz, bei denen das BP unter den zwei Bedingungen (C.C. und jeweilige Kontrollbedingung) am größten war. BP-Amplituden wurden als Mittelwert der Amplituden aus dem Messintervall 500-0 ms vor der Bewegung bestimmt (siehe Abb. 22). Die durchschnittliche Anzahl verwertbarer Tastendrücke lag bei C.C. im Durchschnitt bei 78, das Minimum war 31. Bei G.C. war sie im Durchschnitt ebenfalls bei 78, das Minimum hier war 47 und bei S.B. lag der Mittelwert bei 90, das Minimum bei 52, also deutlich über den anderen Mittelwerten. Die durchschnittliche Anzahl verwertbarer Tastendrücke lag bei 82 und das Minimum bei 43. Potentiale nach der Bewegung wurden nicht analysiert.

3.2.5.4. Statistische Analyse

Die ANOVA hatte einen Messwiederholungsfaktor mit in diesem Fall nur zwei Stufen (den C.C. Film und den jeweiligen Kontrollfilm) und einen Gruppenfaktor (Gruppe 1 mit Kontrollfilm G.C und Gruppe 2 mit Kontrollfilm S.B).

3.3. Ergebnisse

3.3.1. Abstände zwischen den Tastendrücken

Mittelwert der Abstände zwischen den Tastendrücken

Beim Schauen des C.C.-Films lagen die Abstände zwischen der Bewegung bei beiden Gruppen mit 13,5 sec bei Gruppe 1 und 13,7 sec bei Gruppe 2 sehr eng beieinander (siehe Abbildung 13). Bei dem Kontrollfilm in derselben Abbildung

(Gruppe 1 = Grand Canyon Film, Gruppe 2 = schwarzer Bildschirm) hatte Gruppe 1 Abstände von 15,2 sec., Gruppe 2 von 13,2 sec.

Die Mittelwerte der Tastendruckabstände zwischen den Filmen unterschieden sich nicht signifikant ($F_{1,16} = 0,41$; $p = 0,53$; n.s.) ebenso unterschied sich der Mittelwert zwischen Gruppe 1 und 2 nicht signifikant ($F_{1,16} = 0,1$; $p = 0,78$; n.s.). Die Wechselwirkung zwischen Film und Gruppe war ebenfalls nicht signifikant ($F_{1,16} = 1,3$, $p = 0,27$; n.s.).

Abbildung 14 und 15 veranschaulichen die Unterschiede der Mittelwerte der Tastendruckabstände der einzelnen Probanden.

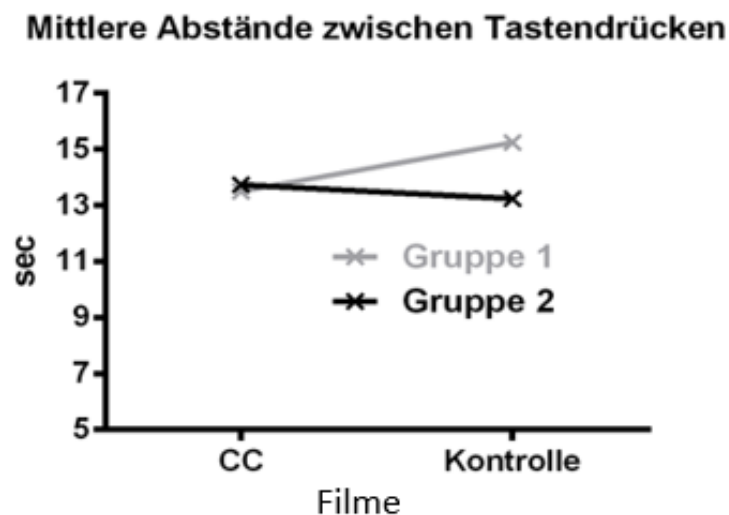


Abbildung 13: Mittelwert der Tastendruckabstände. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (Charlie Chaplin und die jeweilige Kontrollbedingung). Gruppe 1 steht für Grand Canyon Film, Gruppe 2 für schwarzen Bildschirm. Die hellgraue Linie stellt den Mittelwert der Tastendruckabstände von Gruppe 1 ($n=10$) dar, die schwarze Linie den der Gruppe 2 ($n=8$).

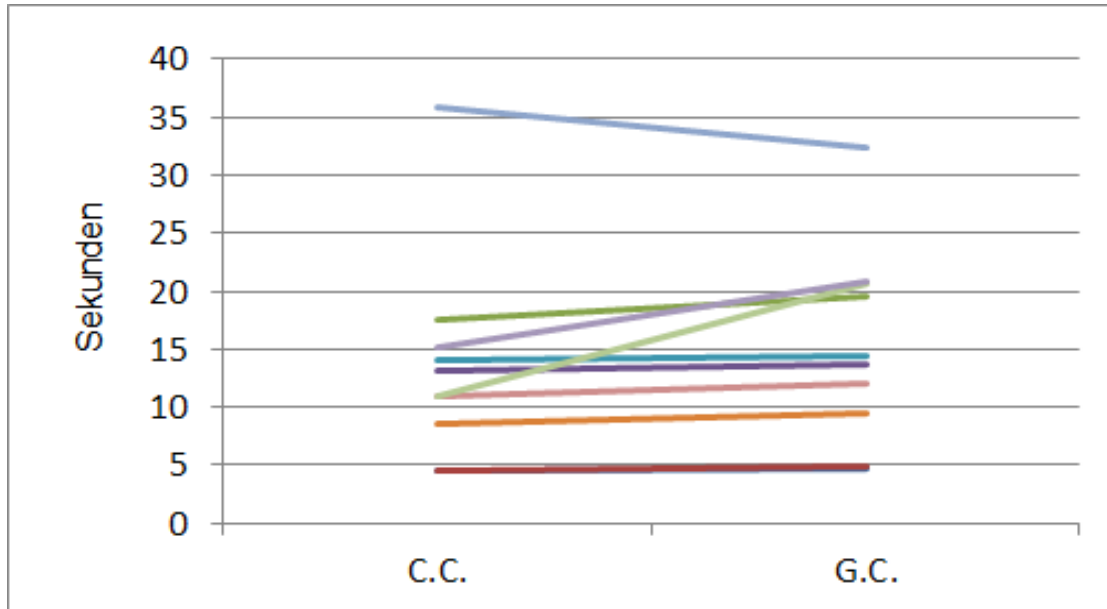


Abbildung 14: Mittelwert der Tastendruckabstände der einzelnen Probanden der Gruppe 1. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (C.C. und die Kontrollbedingung G.C.). Die bunten Linien stellen jeweils die Standardabweichungen eines Probanden dar.

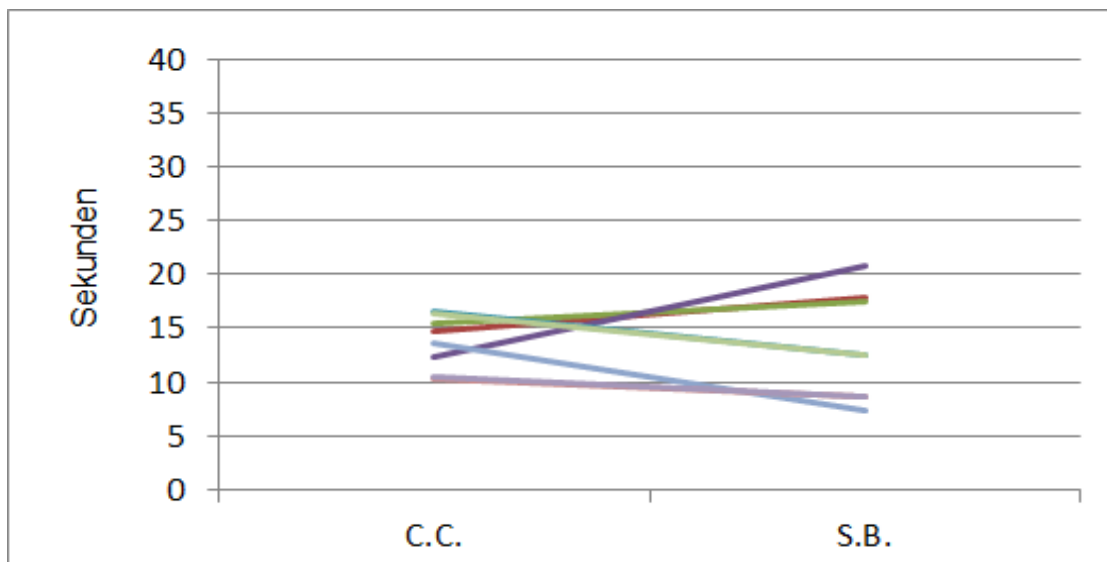


Abbildung 15: Mittelwert der Tastendruckabstände der einzelnen Probanden der Gruppe 2. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (C.C. und die Kontrollbedingung S.B.). Die bunten Linien stellen jeweils den Mittelwert eines Probanden dar.

Die Standardabweichung (SD)

Die SD der mittleren Tastendruckabstände (siehe Abbildung 16) sank während des C.C.-Films, jedoch mit zu großen Unterschieden zwischen den Konditionen, um signifikant zu sein. Im Detail lag die SD der Gruppe 1 bei 6,9 sec und der Gruppe 2 bei 5,9 sec. Während des Kontrollfilms hatte Gruppe 1 einen Wert von 10,2 sec und Gruppe 2 einen Wert von 7,1 sec. Demnach zeigte Gruppe 1 eine höhere SD, jedoch unterschieden sich die beiden Gruppen auch hier nicht signifikant ($F_{1,16} = 0,002$; $p = 0,96$; n.s.). In Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die SDs der mittleren Tastendruckabstände nach Probanden einzeln aufgezeigt.

Der Unterschied der SD zwischen den Filmen war ebenfalls nicht signifikant ($F_{1,16} = 0,74$; $p = 0,40$; n.s.). Auch die Wechselwirkung zwischen Film und Gruppe war nicht signifikant ($F_{1,16} = 1,7$, $p = 0,89$; n.s.)

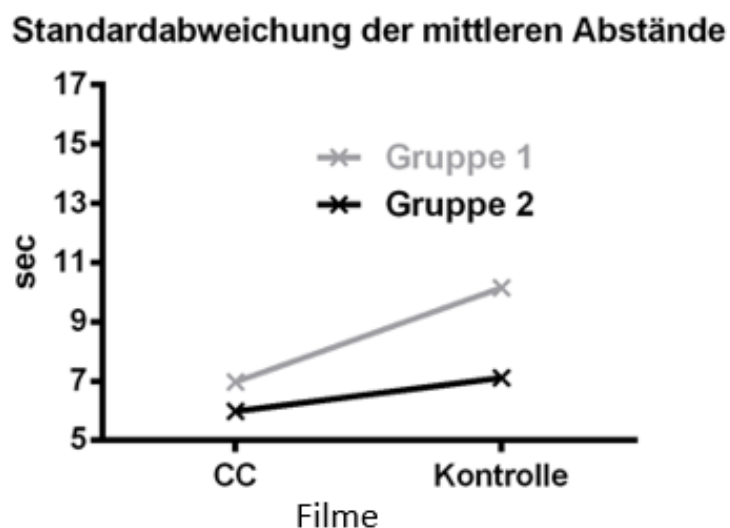


Abbildung 16: Standardabweichung (SD) der mittleren Tastendruckabstände. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (Charlie Chaplin und die jeweilige Kontrollbedingung). Die hellgraue Linie stellt die Standardabweichung der Tastendruckabstände von Gruppe 1 dar. Die schwarze Linie die SD der Gruppe 2.

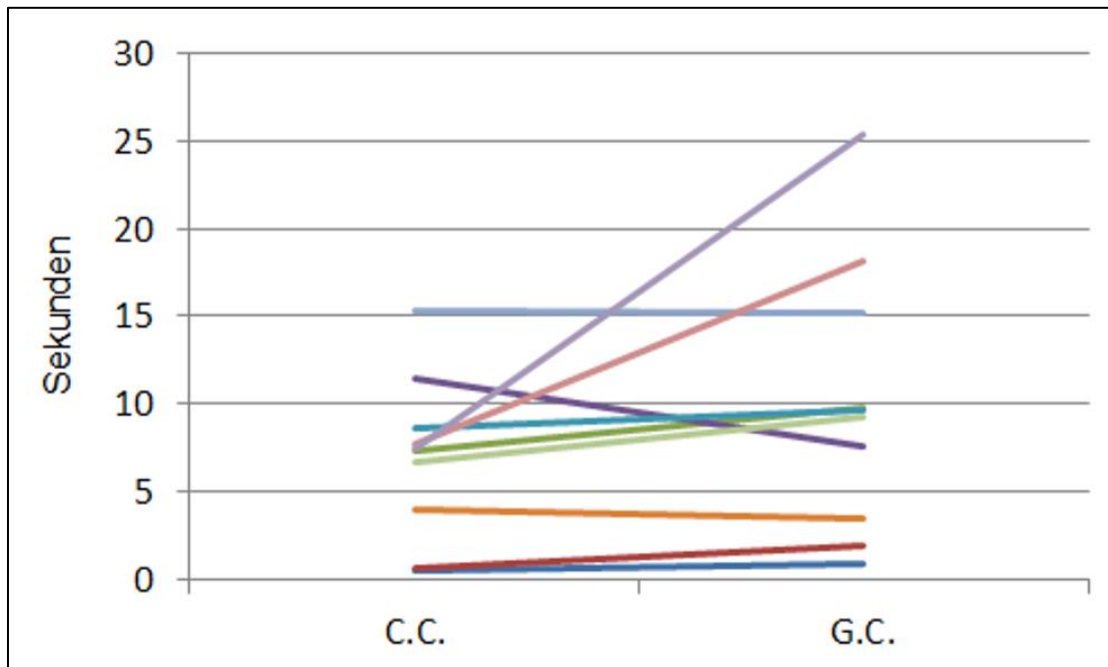


Abbildung 17: Standardabweichung der mittleren Tastendruckabstände der einzelnen Probanden der Gruppe 1. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (Charlie Chaplin und die Kontrollbedingung Grand Canyon). Die bunten Linien stellen jeweils die Standardabweichungen eines Probanden dar.

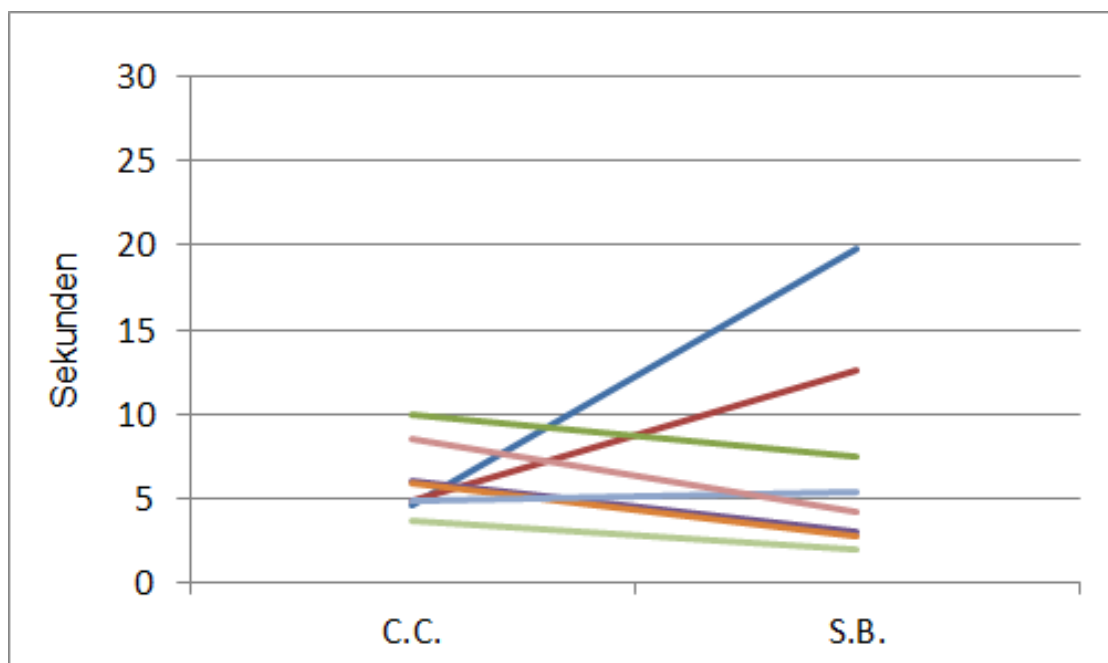


Abbildung 18: Standardabweichung der mittleren Tastendruckabstände der einzelnen Probanden der Gruppe 2. Die Y-Achse zeigt die Sekunden an.

Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (Charlie Chaplin und die Kontrollbedingung Schwarzer Bildschirm). Die bunten Linien stellen jeweils die Standardabweichungen eines Probanden dar.

3.3.2. "Zu früh gedrückt"-Quoten

Im Durchschnitt drückte jeder Proband beim Schauen des C.C. Films zu 14,3 % und bei den Kontrollbedingungen zu 9,5 % zu früh auf die Maustaste. In Gruppe 1 lag dies beim C.C. Film bei 24,6 %, in Gruppe 2 hingegen bei der gleichen Bedingung nur bei 4,1 % (siehe Abbildung 19). In den Kontrollbedingungen lag der Mittelwert der "Zu früh gedrückt"-Quote nur bei 12,4 % beim G.C. Film (Gruppe 1) und bei der Kontrollbedingung S.B. (Gruppe 2) bei 6,5 %. Die Werte waren im Durchschnitt zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 nicht signifikant unterschiedlich ($F_{1,16} = 3,7$; $p = 0,07$; n.s.). Ebenso zeigte der Unterschied des Zu-früh-Drückens zwischen den Filmen keine Signifikanz ($F_{1,16} = 0,6$; $p = 0,46$; n.s.). Die Wechselwirkung zwischen Film und Gruppe war ebenfalls nicht signifikant ($F_{1,16} = 1,3$, $p = 0,27$; n.s.)

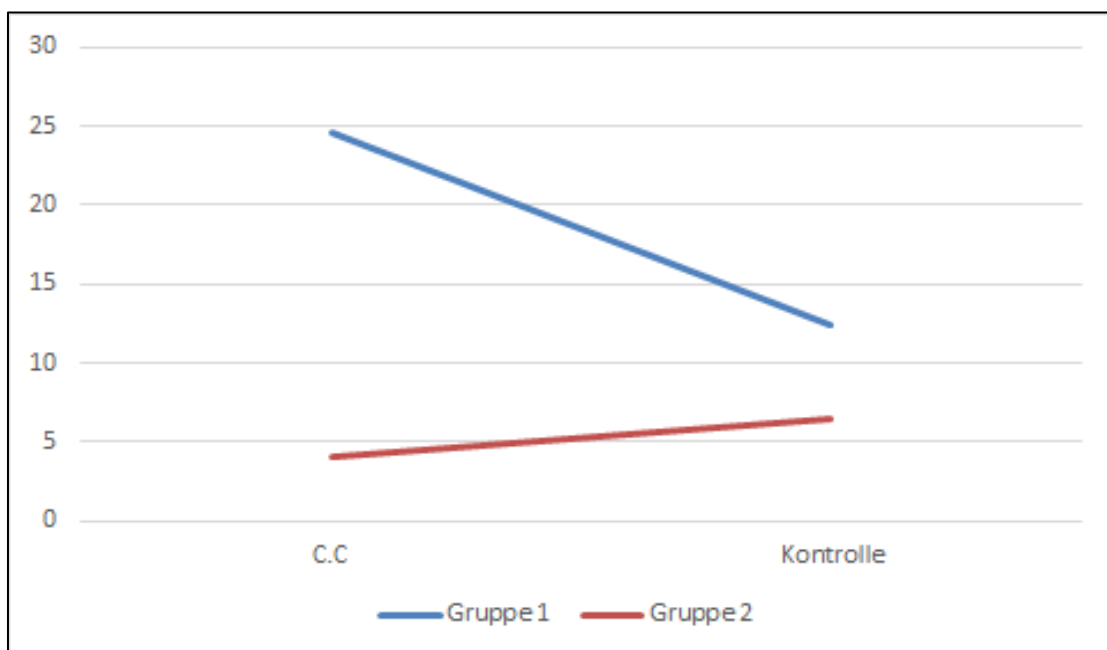


Abbildung 19: Mittelwert der Zu-früh-gedrückt-Quote aller Probanden. Die Y-Achse zeigt die Prozent des Zu-früh-Drückens an und die X-Achse zeigt die verschiedenen Bedingungen an.

Die blaue Linie veranschaulicht den Mittelwert der Gruppe 1 und die rote Linie den der Gruppe 2. Die Kontrollbedingung war bei Gruppe 1 der G.C. Film und bei Gruppe 2 der S.B.

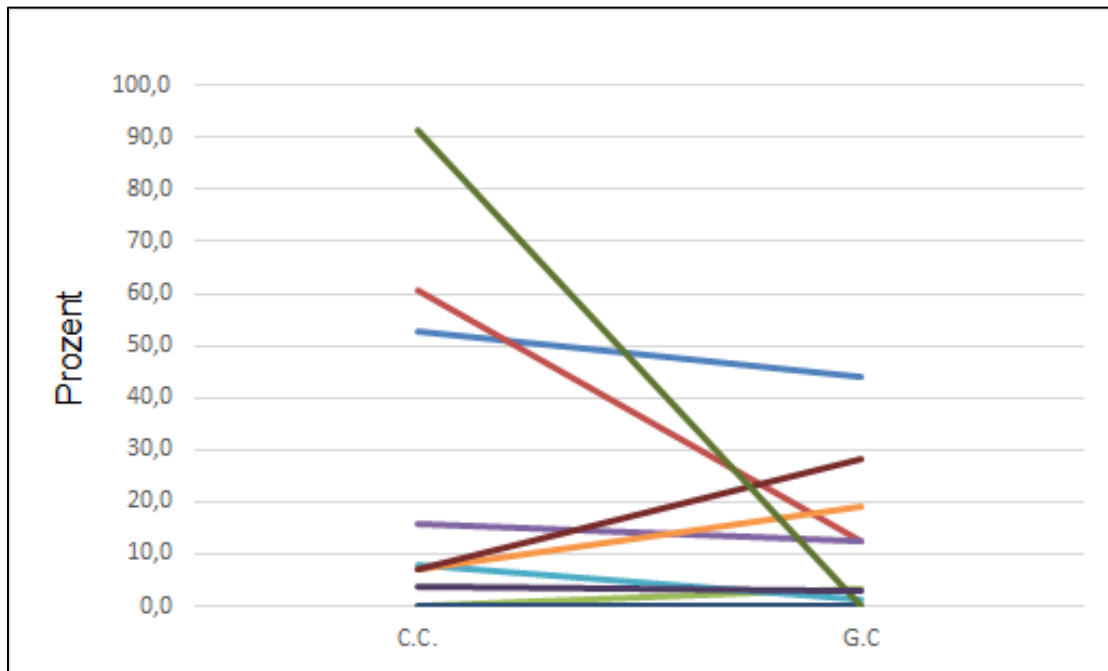


Abbildung 20: Mittelwerte der Zu-früh-gedrückt-Quoten der einzelnen Probanden der Gruppe 1 in Prozent. Die Y-Achse zeigt die Anzahl an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (Charlie Chaplin und die Kontrollbedingung Grand Canyon). Die bunten Linien stellen jeweils den Mittelwert eines Probanden dar.

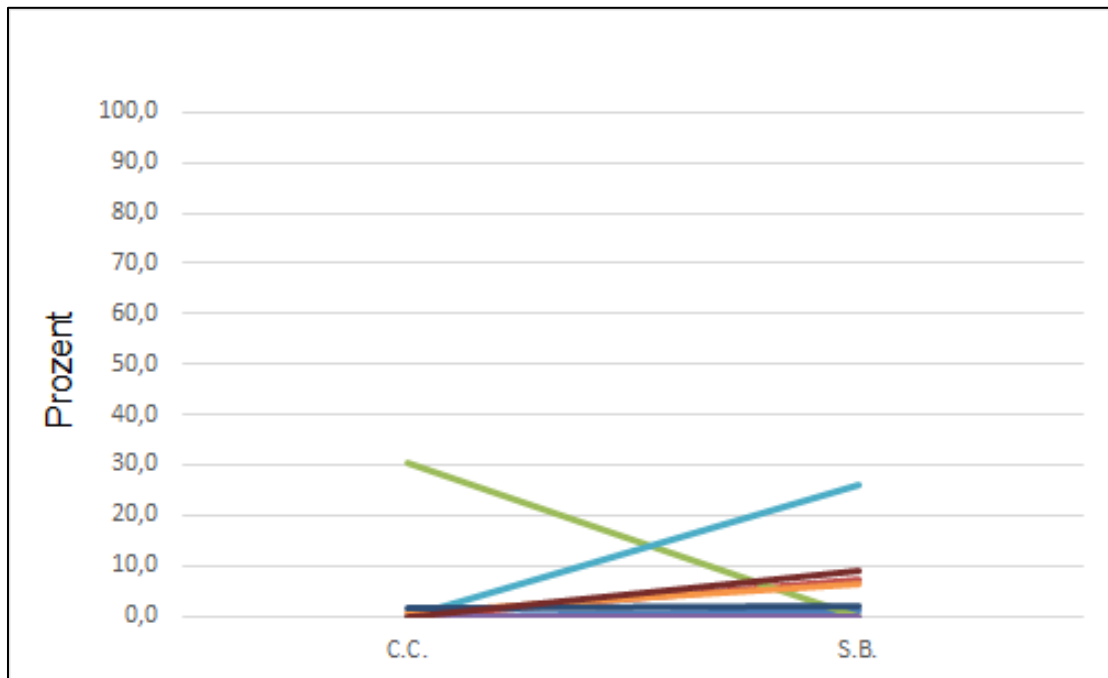


Abbildung 21: Mittelwerte der Zu-früh-gedrückt-Quoten der einzelnen Probanden der Gruppe 2 in Prozent. Die Y-Achse zeigt die Anzahl an. Die X-Achse stellt die Bedingungen dar (Charlie Chaplin und die Kontrollbedingung Grand Canyon). Die bunten Linien stellen jeweils den Mittelwert eines Probanden dar.

3.3.3. Bereitschaftspotential bei Ablenkung

Auf die mittlere Amplitude bei Cz von 0,5 - 0,0 sec vor der Bewegung (grau hinterlegte Fläche in Abb. 22) gab es keine Effekte. Weder unterschieden sich die Gruppen generell ($F_{1,16} = 0,3$, n.s.) noch gab es einen generellen Unterschied zwischen dem C.C.-Film und den Kontrollfilmen ($F_{1,16} = 0,2$, n.s.) noch gab es, entgegen dem Eindruck aus der Grafik, signifikant gegenläufige Tendenzen der beiden Gruppen (Film x Gruppe $F_{1,16} = 2,5$, $p = 0,14$). Wurde trotz der nicht-signifikanten Wechselwirkung der Effekt von Film separat für die beiden Gruppen berechnet, dann war dieser Effekt ebenfalls nicht signifikant, weder für Gruppe 1 ($F_{1,9} = 1,5$, $p = 0,26$) noch für Gruppe 2 ($F_{1,7} = 2,0$, $p = 0,21$).

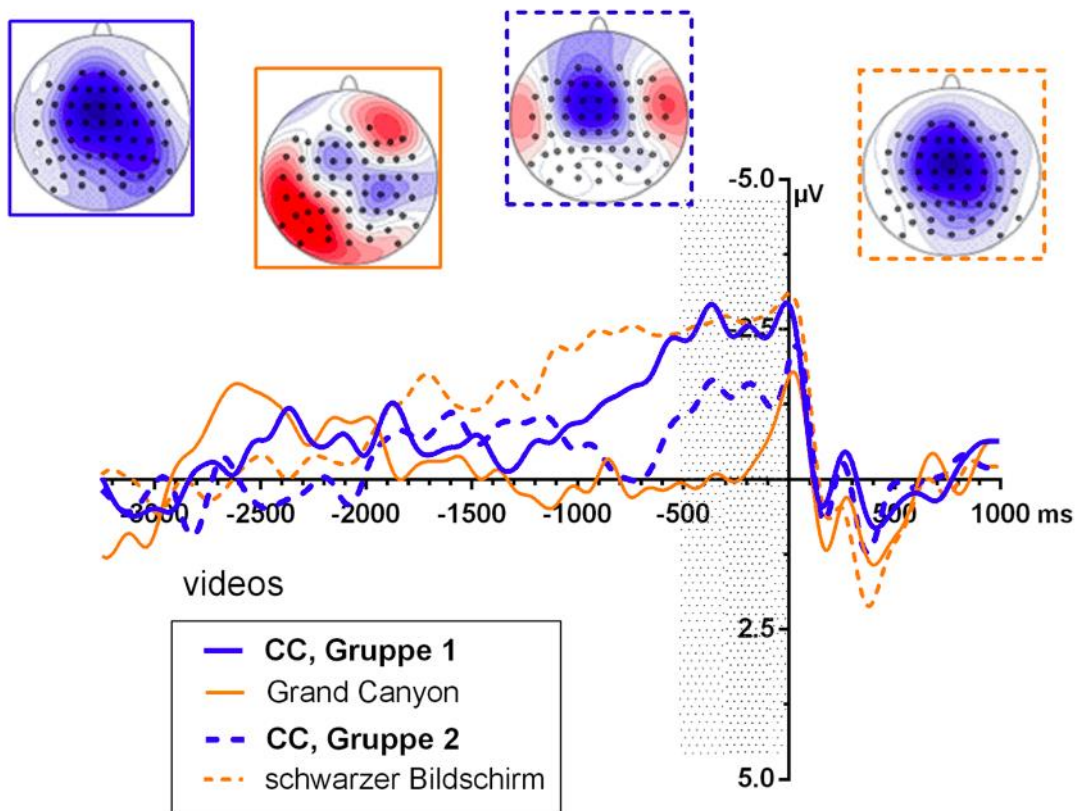


Abbildung 22: Die abgebildete Graphik veranschaulicht die durchschnittlich gemessenen BP Amplituden unter Ablenkung mit den jeweiligen dazugehörigen topographischen Darstellungen der Hirnaktivität. Messorte waren FCz und Cz. Zeitpunkt 0 ist der Zeitpunkt des Tastendrucks. Der grau transparente Balken (500-0 ms vor der Bewegung) kennzeichnet das Messintervall. Die durchgehend blaue Kurve zeigt den Mittelwert der BP-Amplitude von Gruppe 1 während des C.C.-Films (n=10) an. Die durchgehend gelbe Kurve zeigt den Mittelwert der BP Amplitude von Gruppe 1 während des G.C.-Films (n=10) an. Die blau gestrichelte Kurve zeigt den Mittelwert der BP-Amplitude von Gruppe 2 während des S.B.s (n=8) an. Die gelb gestrichelte Kurve zeigt den Mittelwert der BP-Amplitude von Gruppe 2 während des C.C.-Films (n=8) an. Die je nach Bedingung unterschiedlich eingerahmten Topographien des Kopfes zeigen die Lokalität der Hirnaktivität zum Zeitpunkt der Messung an. Die Ansicht des Kopfes ist von oben, mit dem Ohrenlevel (=120°) an der Außenlinie und der Nase oberhalb der Topographie. Die blaue Farbe zeigt die negative, die weiße keine und Rot die positive Polarität an. Die Skalierung ist immer Minimum zu Maximum variierend zwischen den Topographien.

In der C.C.-Bedingung der Gruppe 1 und den beiden Bedingungen der Gruppe 2 ist ein klares Minimum im präzentralen Bereich zu erkennen, welches typisch für die Lokalisation des BPs ist.

3.3.4. Fragebogenanalyse

Der Fragebogen sollte bewirken, dass die Probanden sich auf den Film konzentrieren. Jedoch wurden nur von 50% sowohl Frage 1 als auch Frage 2 richtig beantwortet. 16% hatten beide falsch beantwortet. 3 von 5 Probanden der ersten Gruppe die den C.C.-Film als zweiten Film gezeigt bekamen, konnten beide Fragen richtig beantworten, hingegen nur ein Proband der ersten Gruppe, die den C.C. als ersten Film gezeigt bekam. In Gruppe (2) waren die Unterschiede geringer. Nur 2 von 5 Probanden, die den C.C. Film als zweiten Film gezeigt bekamen, konnten beide Fragen richtig beantworten. Im Vergleich dazu konnten 3 von 5 Probanden der Gruppe 2 beide Fragen richtig beantworten.

37% gaben bei Frage 3 (Abbildung 12) an, willkürlich gedrückt zu haben, 25% gaben an, einen Rhythmus gefunden zu haben, ebenfalls 25% handelten an Aktionen geknüpft (Bild- oder Kamerawechsel, spannende Szene), weitere 13% handelten nach anderen Methoden.

3.4. Diskussion

Das Ziel dieses Experiments war zu testen, ob die Höhe der BP-Amplitude konzentrationsabhängig ist oder nicht. Das Experiment basierte auf der Hypothese, dass die BP-Amplitude unter Ablenkung größer wird, da diese ein Störfaktor ist und eine erhöhte Konzentration für die Bewegungsausführung vonnöten wäre. Auf Grund dessen, dass kein signifikanter Unterschied in Gruppe (1) zwischen C.C. und G.C. gesehen werden konnte, wurde Gruppe (2) nur der schwarze Bildschirm als Kontrolle gezeigt, um absolut jede vermeidbare Ablenkung auszuschließen. Bei dieser zeigte sich jedoch ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen dem C.C.-Film und der Kontrolle S.B.

Zudem konnten lediglich 50% der Probanden sowohl Frage 1 als auch Frage 2 des Fragebogens am Ende beider Filme richtig beantworten. Dies könnte einmal daran gelegen haben, dass die Probanden den Filmen nicht die von uns gewünschte Aufmerksamkeit schenkten und sich eher auf das Drücken konzentrierten, oder dass die Zeitspanne für die Anzahl an Ereignissen bis zur Befragung zu lange war. Auf letzteres deutet die Tatsache hin, dass es bei den Probanden, die den schwarzen Bildschirm als Kontrolle hatten, keinen Unterschied machte, ob der C.C. Film als erstes oder zweites gezeigt wurde. Interessant ist, dass die Probanden, die zuerst den G.C. Film und dann den C.C. Film gesehen hatten, dreimal besser abschnitten als diejenigen, die zuerst den C.C. Film und dann den G.C. Film gesehen hatten. Für die Theorie, dass die Probanden den Filmen zu wenig Aufmerksamkeit schenkten spricht, dass einzelne Probanden sehr oft zu früh gedrückt haben und dass dies daran gelegen haben könnte, dass sie sich zu sehr aufs Tastendrücken konzentrierten; dies wiederum könnte der Grund für ihre etwas (wenn auch nicht signifikant) kleineren BP Amplituden gewesen sein.

Mit den vorliegenden Ergebnissen kann die Hypothese nicht bestätigt werden. Den Grund hierfür kann man nur vermuten. Möglicherweise konnte der Zusammenhang von uns nicht nachgewiesen werden oder die BP Amplitude steht lediglich in negativem Zusammenhang mit der Aufmerksamkeit. Um die Annahme zu bestätigen, dass die Amplitude des BP kleiner wird, je höher die Aufmerksamkeit des Probanden ist, bräuchte man noch mehr Probanden und eine Signifikanz.

4 Diskussion der beiden Experimente

Das Ziel dieser zwei Experimente war herauszufinden, zu welchem Ausmaß das BP vom zeitlichen Rahmen und der Aufmerksamkeit abhängig ist. Das Hauptergebnis war, dass in keinem der beiden Experimente signifikante Effekte auf das BP nachzuweisen waren.

Das Experiment 1 basierte auf der Idee, dass ein Ersatz der inneren Uhr durch eine externe Zeitvorgabe die BP-Amplitude verkleinert und damit das BP entbehrlich macht. Diese Hypothese konnte leider nicht bestätigt werden. Im Gegensatz zu meiner Annahme vergrößerten sich die BP-Amplituden sogar leicht bei der regelmäßig tickenden Uhr und verkleinerten sich bei der unregelmäßig tickenden Uhr, jedoch jeweils nicht signifikant im Vergleich zur Kontrollbedingung, in der keine Uhr tickte. Es machte somit keinen signifikanten Unterschied, ob eine regelmäßig tickende Uhr den Probanden half, in einen 4 sec-Rhythmus zu finden, oder ob keine Uhr tickte. Auf diesen Ergebnissen und jenen des Experiments Eins von Verleger et al. (2016) basiert die Erkenntnis, dass das BP zwar in Übereinstimmung mit den zeitlichen Einschränkungen bei den Intervallen zwischen den Bewegungen variiert, der Prozess, der durch das BP veranschaulicht wird, aber nicht dem des Zeitmechanismus entspricht.

Verleger et al. (2016) vermuteten, dass das BP nicht die Vorbereitung auf die Bewegung an sich ist. Demzufolge kann auch die Konzentration auf die Bewegung das BP nicht herauf- und herunterregulieren. Vielmehr setzen die Versuchspersonen selbst diesen langsamen Rhythmus der Potentialverschiebung um, um instruktionsgemäß in regelmäßig-unregelmäßigen Abständen die Bewegung durchzuführen.

In Experiment 2 stellte ich die Hypothese auf, dass das BP, im Gegensatz zur klassischen BP Hypothese, möglicherweise doch konzentrationsabhängig ist. Die BP-Amplitude sollte unter Ablenkung, während des C.C.-Films – so die Theorie – größer werden, da die Versuchspersonen mehr Konzentration auf die Bewegungsausführung aufwenden müssten. Die Hypothese, dass das BP von der Aufmerksamkeit abhängig ist, konnte leider nicht bestätigt werden, die Ergebnisse des Experiments 2 unterstützen eher die beiden folgenden BP Hypothesen: Einmal die klassische BP-Hypothese, dass das BP eine Bewegungsvorbereitung darstellt und vor einer willentlichen Bewegung konzentrationsunabhängig

aufgebaut wird. Zum anderen auch Eccles', Schurgers und Schmidts (Eccles, 1985; Schurger et al., 2012; Schmidt et al., 2016) Hypothese von der spontanen Fluktuation, die nur manchmal, konzentrationsunabhängig, zufällig zu einer Negativierung führt.

Einige negative wie positive methodische Aspekte wie die Grundlinie, die Datenqualität und die erfassten Verhaltensparameter sollten hier angesprochen werden. Denn die Messungen der BP-Amplitude und deren Anfänge hängen maßgeblich von der Wahl der Grundlinie ab. Die Grundlinie in Experiment 1 ist nicht stabil, da die vorangegangene Bewegung nur 4,4 sec zuvor erfolgt ist. Das post-Bewegungs-Potential ist zwar das gleiche - 4,4 sec vor der Bewegung wie 0-1 sec nach der Bewegung - jedoch sieht man es 4,4 sec vor der Bewegung weniger deutlich, da die 4,4 sec nur der Mittelwert sind; durch die Mittelung des Potentials der vorigen Bewegung verschmiert es zeitlich und drückt die Grundlinie phasenweise in den positiven Bereich. Die Grundlinie in Experiment 2 ist durch die größeren Tastendruckabstände stabiler. Die Kurve des BPs variiert zudem wie üblich zwischen den Messlokalisationen, abhängig von der Kopfhautverteilung dieser post-Bewegungs-Positivität. Die unterschiedliche Grundlinie könnte ein Grund sein, weshalb die Kopftopographien in Experiment 1 mehr posterior erscheinen als normalerweise (z.B. Cui et al., 1999; Schultze-Kraft et al., 2016). Als zusätzlicher Grund wäre in Betracht zu ziehen, dass dies durch unsere Platzierung der Referenzelektrode auf der Nase, anstatt wie normalerweise auf dem Schläfenbein, verursacht wurde.

Die Datenqualität stellte sich als größeres Problem heraus als erwartet. Die beschriebenen Experimente fanden inmitten von P3-Experimenten statt, bei denen Reiz-evozierte Potentiale in einem Intervall von 1,5 sec in guter Datenqualität gemessen wurden (zum Beispiel Verleger et al., 2015; Verleger & Śmigasiewicz, 2016). Hier jedoch, mit erfassten Messstrecken von 6 sec und mehr, gab es Probleme mit allgegenwärtigen Nullliniendrifts in den Daten, auch nach der Anwendung unserer üblichen Kriterien, um Artefakte auszusortieren. Wir waren somit gezwungen, die lineare DC-Detrend-Prozedur des Brain Analyzer auf unsere Daten anzuwenden. Das bedeutet, dass der Unterschied zwischen den ersten 100 ms (5 sec vor dem Tastendruck) und den letzten 100 ms des Zeitraums (1 sec nach dem Tastendruck) minimiert wurde.

Da die Prozedur linear ist, verändert sie eigentlich nicht die Form der einer Bewegung vorausgehenden Negativität im Verhältnis zum gesamten Zeitraum, lässt aber doch einiges an niederfrequenten Messwerten - gleichermaßen Rauschen oder Signal - weg oder fügt sie hinzu. Dies geschah bei allen Versuchspersonen und jeweils allen Bedingungen. Damit könnte überall ein Teil der relevanten Signale entfernt worden sein - möglicherweise ein Grund dafür, dass die Daten so weit von der Signifikanz entfernt waren.

Schlussendlich könnte man anregen, dass Verhaltensparameter, wie sie in diesen beiden Experimenten festgehalten wurden, z.B. die Mittelwerte und Unterschiede der Tastendruckabstände, routinemäßig dokumentiert werden. Zum Beispiel haben drei Versuchspersonen in Gruppe 1 des zweiten Experiments extrem häufig (zw. 53 und 91 Mal) zu früh auf den Knopf gedrückt. Das könnte bedeuten, dass sie Schwierigkeiten mit den Anweisungen hatten, hat aber in jedem Fall auch zur Folge, dass sie weniger verwertbare Daten hergeben. Dies könnte beim Vergleich von bewegungseingeschränkten zu gesunden Probandengruppen von Bedeutung sein. Denn eine Abnormität im BP wäre eventuell eher eine normale Konsequenz eines abnormalen Verhaltens als eine neurophysiologische Abnormität bei normalem Verhalten.

5 Zusammenfassung

Das Bereitschaftspotential (BP) ist ein langsames, negatives, elektrisches Potential, das vor bewussten Bewegungen entsteht. Es kann mittels Elektroden auf der Kopfhaut in einem Elektroenzephalogramm (EEG) abgeleitet werden. Das BP wird üblicherweise als Ausdruck von willentlicher Bewegungsvorbereitung angesehen. Verleger et al. (2016) zeigten aber auch, dass sich das BP in Abhängigkeit von den zeitlichen Einschränkungen verändert, möglicherweise daher vor allem einen Prozess der Zeitschätzung widerspiegelt.

In dieser Arbeit geht es nun um diese mögliche Abhängigkeit des BP vom zeitlichen Rahmen und der Aufmerksamkeit.

Die hier vorliegenden Experimente zielten darauf ab zu klären, ob der Prozess, der durch das BP wiedergespiegelt wird, dem Zeitmechanismus entspricht (Experiment 1) und ob er von der Aufmerksamkeit beeinflusst werden kann (Experiment 2).

Mit Hilfe von Experiment 1 wollten wir die Hypothese überprüfen, derzufolge ein Ersatz der inneren Uhr durch eine externe Zeitvorgabe die BP-Amplitude entbehrlich mache. Die Probanden mussten unter drei Bedingungen (regelmäßig, unregelmäßig oder keine tickende Uhr), ohne aktiv mitzuzählen, über einen Zeitraum von 100 Tastendrücken ca. alle 4 sec eine Bewegung durchführen. Da sich weder die BP-Amplitude noch die zeitlichen Abstände zwischen den Tastendrücken unter den drei Bedingungen veränderten, konnte von uns ein Zusammenhang mit der Zeitschätzung nicht nachgewiesen werden.

Das zweite Experiment wurde durchgeführt um zu untersuchen, ob das BP, im Gegensatz zu der klassischen BP-Hypothese, möglicherweise konzentrationsabhängig ist. Die Probanden sollten sich auf jeweils zwei verschiedene, nacheinander abgespielte Stummfilme (Dauer pro Film war 20 min) konzentrieren und nebenher, ebenfalls ohne aktiv zu zählen, ca. alle 4 sec eine Bewegung durchführen. Es gab zwei Probandengruppen mit jeweils einer Bedingung (Charlie Chaplin) und einer Kontrollbedingung. Der Kontrollfilm von Gruppe eins war ein Grand Canyon Naturfilm, der von Gruppe zwei ein schwarzer Bildschirm.

Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen und damit

den unterschiedlich intensiv ablenkenden Mechanismen. Somit konnte von uns keine Abhängigkeit des BP von der Aufmerksamkeit nachgewiesen werden.

Demnach konnte keine der beiden Hypothesen bestätigt werden. Das lässt vermuten, dass der durch das BP widergespiegelte Prozess zwar der Bewegungsvorbereitung entspricht, jedoch unabhängig von Aufmerksamkeit oder dem zeitlichen Rahmen abläuft.

6 Literaturverzeichnis

Baker, K.S., Piriyaapunyaporn, T., & Cunnington, R. (2012). Neural activity in readiness for incidental and explicitly timed actions. *Neuropsychologia* 50:715-722

Ball, T., Schreiber, A., Feige, B., Wagner, M., Lücking, C. H., and Kristeva-Feige, R., (1999). The role of higher-order motor areas in voluntary movement as revealed by high-resolution EEG and fMRI. *Neuroimage* 10, 682-694. doi: 10.1006/nimg.1999.0507

Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie*, Band 87, 527-570. Neuauflage 2004, Herausgeber: Lücking, C.H., Deutsche Gesellschaft für klinische Neurophysiologie.

Cui R. Q., Huter D., Lang W., Deecke L. (1999). Neuroimage of voluntary movement: topography of the Bereitschaftspotential, a 64-channel DC current source density study. *Neuroimage* 9, 124–134. 10.1006/nimg.1998.0388

Coull, J.T., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science* 303:1506-1508

Deecke L., Lang W., Heller H. J., Hufnagl M., Kornhuber H. H. (1987). Bereitschaftspotential in patients with unilateral lesions of the supplementary motor area. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 50, 1430–1434. 10.1136/jnnp.50.11.1430

Deecke, L., & Kornhuber, H.H., (2003). “Human Freedom, reasoned will and the brain: the Bereitschaftspotential story” in *The Bereitschaftspotential, Movement-related Cortical Potentials*, eds M. Jahanshahi and M. Hallett (Heidelberg: Springer), 283-320.

Deecke, L., & Soekadar, S.R. (2016). Beyond the point of no return: Last-minute changes in human motor performance. Letter to the Editor. *Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A.* 113:E2876.

- Eccles, J.C. (1985).** Mental summation: The timing of voluntary intentions by cortical activity. *The Behavioural and Brain Sciences* 8:542-543
- Fuchs, T. (2013).** Das Gehirn: Ein Beziehungsorgan. Eine phänomenologisch-ökologische Konzeption. Stuttgart: Kohlhammer, 4th edition.
- Haggard, P., & Eimer, M. (1999).** On the relation between brain potentials and the awareness of voluntary movements. *Experimental Brain Research* 126:128-133
- Jo, H.-G., Hinterberger, T., Wittmann, M., Borghardt, T.L., & Schmidt, S. (2013).** Spontaneous EEG fluctuations determine the readiness potential: is preconscious brain activation a preparation process to move? *Experimental Brain Research* 231:495-500
- Jo, H.-G., Wittmann, M., Hinterberger, T., Schmidt, S. (2014).** The readiness potential reflects intentional binding. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8:1-9
- Kornhuber, H.H., & Deecke, L. (1965).** Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 284:1-17
- Kutas, M. and Donchin, E. (1980).** Preparation to respond as manifested by movement related potentials. *Brain Res.* 202, 95-115. doi: 10.1016/0006-8993 (80) 90646-0
- Libet, B., Wright, E.W., & Gleason, C.A. (1982).** Readiness-potentials preceding unrestricted 'spontaneous' vs. pre-planned voluntary acts. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 54:322-335
- Libet, B., Gleason, C.A., Wright, E.W., & Pearl, D.K. (1983a).** Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness potential). *Brain* 106:623-642

- Libet, B., Wright, E.W., Gleason, C.A. (1983b).** Preparation-or intention-to-act, in relation to pre-event potentials recorded at the vertex. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 56 (4):367-372
- Libet, B. (1985).** Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *The Behavioural and Brain Sciences* 8:529-566
- Luck, S.J., (2005).** An introduction to the event - related potential technique. *Cambridge, MA: MIT Press* 1.Aufl., 175-224
- Matsushashi, M., & Hallett, M. (2008).** The timing of the conscious intention to move. *European Journal of Neuroscience* 28:2344-2351.
- Misirlisoy, E., & Haggard, P. (2014).** Veto and vacillation: A neural precursor of the decision to withhold action. *Journal of Cognitive Neuroscience* 26:296-304
- Mudrik, L., & Maoz, U. (2015).** "Me & my brain": Exposing neuroscience's closet dualism. *Journal of Cognitive Neuroscience* 27:211-221.
- Navon, D. (2014).** How plausible is it that conscious control is illusory? *Am. J. Psychol.* 127, 147-155. doi: 10.5406/amerjpsyc.127.2.0147
- Nguyen V. T., Breakspear M., Cunnington R. (2014).** Reciprocal interactions of the SMA and cingulate cortex sustain premovement activity for voluntary actions. *J.Neurosci.*34,16397–16407.10.1523/JNeurosci.2571-14.2014
- Oostenveld R., Praamstra P. (2001):** The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clinical Neurophysiology* 112:713-719
- Schandry, R. (2003).** Biologische Psychologie. 1. Aufl., 562-594. *Weinheim. Basel, Berlin: Beltz Verlag.*
- Schmidt, S., Han-Gue, J., Wittmann, M., Hinterberger, T. (2016).** `Catching the waves` - slow cortical potentials as moderator of voluntary action. *Neuroscience and Behavioral Reviews* 68: 639-650

- Schubotz, R.I., Friederici, A.D., & von Cramon, D.Y. (2000).** Time perception and motor timing: a common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *NeuroImage* 11:1-12
- Schultze-Kraft, M., Birman, D., Rusconi, M., Allefeld, C., Gorgen, K., Dahne, S., Blankertz, B., & Haynes, J.D. (2016).** The point of no return in vetoing self-initiated movements. *Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A.* 113:1080-1085
- Schurger, A., Sitt, J.D., & Dehaene, S. (2012).** An accumulator model for spontaneous neural activity prior to self-initiated movement. *Proceedings of the National Academy of Science* 109: E2904-E2913
- Seifert, J. (2005).** Ereigniskorrelierte EEG Aktivität. *Pabst Science Publishers.*
- Shibasaki H., Barrett G., Halliday E., Halliday A. M. (1980).** Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 49, 213–226. 10.1016/0013-4694(80)90216-3
- Shibasaki H., Hallett M. (2006).** What is the Bereitschaftspotential? *Clin. Neurophysiol.* 117, 2341–2356. 10.1016/j.clinph.2006.04.025
- Verleger R., Asanowicz D., Werner L., Śmigasiewicz K. (2015).** Biased odds for head or tail: outcome-evoked P3 depends on frequencies of guesses. *Psychophysiology* 52, 1048–1058. 10.1111/psyp.12440
- Verleger R., Śmigasiewicz K. (2016).** Do rare stimuli evoke large P3s by being unexpected? A comparison of the oddball effects between standard-oddball and prediction-oddball tasks. *Adv. Cogn. Psychol.* 12, 88–104. 10.5709/acp-0189-9
- Verleger R., Haake, M., Baur, A., & Śmigasiewicz, K. (2016).** Time to Move Again: Does the Bereitschaftspotential Covary with Demands on Internal Timing? *Frontiers in Human Neuroscience.*10: 642

Wessel K., Verleger R., Nazarenus D., Vieregge P., Kömpf D. (1994).
Movement-related cortical potentials preceding sequential and goal-directed finger and arm movements in patients with cerebellar atrophy. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 92, 331–341. 10.1016/0168-5597(94)90101-5

Zschocke, S. (1995). Klinische Elektroenzephalographie. Berlin: *Springer Verlag*

7 Anhang

7.1. Ethikantrag

2.6 Erläuterungen zu den Untersuchungen bei Versuchen am Menschen

Die Experimente wurden an gesunden freiwilligen Teilnehmern durchgeführt, nur nach ihrer vorherigen schriftlichen, informierten Zustimmung.

Das generelle Versuchsverfahren in unserem EEG-Labor wurde von der Ethik-Kommission der Universität zu Lübeck mit Datum vom 21. März 2005 bewilligt (Az 05-043, siehe Abbildung 23). Nach den Vorgaben der Ethik-Kommission formulierte Aufklärungsbögen wurden von jeder an den hier beantragten Experimenten teilnehmenden Person unterzeichnet. Alle Experimente folgten der Deklaration von Helsinki.



Universität zu Lübeck

Medizinische Fakultät - Der Vorsitzende der Ethikkommission

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

Herrn
Prof. Dr. med. Verleger
Klinik für Neurologie

im Hause

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

Datum: 21.03.2005
Aktenzeichen:
(immer angeben !) 05-043

nachrichtlich:
Herr Prof. Kömpf
Direktor der Klinik für Neurologie

Sitzung der Ethik-Kommission am 15. März 2005
Antragsteller: Herr Prof. Verleger / Herr Prof. Kömpf
Titel: EEG-Potentiale bei PINK 1

Sehr geehrter Herr Prof. Verleger,

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

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

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

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

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

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

Ihr

Prof. Dr. med. Lucas Wessel
Stellv. Vorsitzender

anwesende Kommissionsmitglieder: ☒

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

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

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

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken die maßgeblich am Gelingen meiner Arbeit beteiligt waren.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Thomas F. Münte für die Bereitstellung aller notwendigen Mittel sowie des Arbeitsplatzes zur Durchführung dieser Dissertation in seiner Abteilung bedanken.

Großer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. soc. Rolf Verleger für das Thema, die exzellente Betreuung, die außerordentlich kompetente Unterstützung, die äußerst zeitnahe Beantwortung meiner Fragen, sowie seine Unterstützung bei der Analyse und Auswertung der Daten.

Auch möchte ich Dr. Kamila Śmigasiewicz ganz herzlich Danke sagen, für die Einarbeitung in das EEG Labor und die große Unterstützung beim Durchführen der Experimente.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern bedanken, die mich stets unterstützten.

9 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name, Vorname: Baur, Alexandra Elisabeth
Geburtsdatum: 16.05.1987



Hochschulstudium und berufliche Laufbahn

Oktober 2008 - Juli 2010	Studium an der PH Weingarten
September 2010	Beginn des Studiums der Veterinärmedizin, Szent Istvan Universität Budapest
Juni 2012	Physikum, Szent Istvan Universität Budapest
September 2010 - August 2013	Szent Istvan Universität Budapest
Oktober 2013 - März 2016	Studium der Veterinärmedizin, FU Berlin
Oktober 2016 - Laufend	Fachtierärztin für Kleintiere, in Ausbildung

Zeitraum der Dissertation

April 2016	Beginn der Dissertation
April 2016 - August 2016	Experimentelle Untersuchungen für die Dissertation

Publikationen

Verleger R., Haake, M., Baur, A., & Śmigasiewicz, K. (2016). Time to Move Again: Does the Bereitschaftspotential Covary with Demands on Internal Timing? *Frontiers in Human Neuroscience*.10: 642