

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

Zeit für die nächste Bewegung: ist das Bereitschaftspotential abhängig von zeitlichen Rahmenbedingungen oder beinhaltet es gar innere Taktgebung?

Eine EEG-gestützte Studie

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

vorgelegt von
Mechthild Maria Haake
aus Bremen

Lübeck 2018

1. Berichterstatter: Prof. Dr. rer. soc. Rolf Verleger
 2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Kerstin Oltmanns
- Tag der mündlichen Prüfung: 07.11.2018
- Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 07.11.2018

Promotionskommission der Sektion Medizin

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Das Bereitschaftspotential.....	1
1.2 Das Bereitschaftspotential im Forschungskontext.....	6
1.3 Einblick in die Diskussion um die Willensfreiheit.....	11
1.4 Hypothesen und Fragestellungen.....	17
2 MATERIAL UND METHODEN.....	22
2.1 Experiment 1.....	22
2.1.1 Versuchspersonen.....	22
2.1.2 Versuchsaufbau.....	22
2.1.3 Versuchsdurchführung.....	23
2.1.4 Fragebogen.....	25
2.1.5 EEG.....	25
2.1.6 Verarbeitung der EEG-Daten.....	27
2.1.7 Analyse des Verhaltens.....	30
2.1.8 Analyse der EEG-Daten.....	30
2.1.9 Statistische Analyse.....	33
2.2 Experiment 2.....	34
2.2.1 Versuchspersonen.....	34
2.2.2 Versuchsaufbau.....	34
2.2.3 Versuchsdurchführung.....	34
2.2.4 Fragebogen.....	35
2.2.5 EEG.....	36
2.2.6 Verarbeitung der EEG-Daten.....	36
2.2.7 Analyse des Verhaltens.....	37
2.2.8 Analyse der EEG-Daten.....	37
2.2.9 Statistische Analyse.....	38
3 ERGEBNISSE.....	39
3.1 Experiment 1.....	39
3.1.1 Verhalten.....	39

3.1.2 Fragebogen.....	43
3.1.3 Bereitschaftspotential	44
3.1.3.1 Effekte des Mindestzeitabstands.....	44
3.1.3.2 Effekte durch die Zählbedingung.....	48
3.2 Experiment 2.....	49
3.2.1 Verhalten.....	49
3.2.2 Fragebogen.....	52
3.2.3 Bereitschaftspotential	53
3.2.3.1 Untergruppen.....	54
4 DISKUSSION.....	57
5 ZUSAMMENFASSUNG.....	68
6 LITERATURVERZEICHNIS	70
7 ANHANG	81
7.1 Tabellarische Darstellung der F- und p-Werte.....	81
7.1.1 Experiment 1.....	81
7.1.2 Experiment 2.....	86
7.2 Topografische Karten.....	92
7.3 Votum der Ethikkommission.....	93
7.4 Aufklärungsbogen.....	94
7.5 Einverständniserklärungen.....	95
7.4 Deutsche Fassung des Edinburgh Handedness Inventory.....	97
7.6 Standardisierte Versuchsanweisungen.....	98
7.7 Fragebögen und Antworten im Freitext.....	100
8 DANKSAGUNG.....	105
9 LEBENSLAUF.....	106
10 PUBLIKATIONSLISTE.....	107

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	analysis of variance = Varianzanalyse
AUC	area under the curve = Fläche unter der Kurve
BP	Bereitschaftspotential
CNV	kontingente negative Variation
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
ECoG	Elektrokortikogramm
EEG	Elektroenzephalogramm
EKP	Ereigniskorreliertes Potential
EOG	Elektrookulogramm
EP	Evoziertes Potential
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
hEOG	horizontales Elektrookulogramm
LRP	Lateralisiertes Bereitschaftspotential/ lateralized readiness potential
M1	primärer Motorkortex
n. s.	nicht signifikant
PET	Positronenemissionstomografie
s.	siehe
SD	standard deviation = Standardabweichung
SMA/ Prä-SMA	Supplementär motorisches Areal/ Prä-supplementär motorisches Areal
vEOG	vertikales Elektrookulogramm
VEP	Visuell Evoziertes Potential
vergl.	vergleiche
vs.	versus
zeitl.	zeitlich

„Ich weiß, dass ich nicht(s) weiß.“ Sokrates

1 Einleitung

In dieser Arbeit werden Fragen über das Bereitschaftspotential (BP, engl. readiness potential, RP) gestellt – einem Phänomen der Elektroenzephalographie (EEG). Antworten werden in den Ergebnissen zweier Experimente gesucht, in welchen die Teilnehmer wiederholt gleichförmige Bewegungen freiwillig und spontan einleiteten und durchführten. Dies wies die Experimente als klassische BP-Experimente aus. Mittels zeitgleich geschriebenen EEG wurde die Potentialdifferenz an der Kopfoberfläche als Ausdruck der elektrischen Aktivität des Gehirns gemessen. Insbesondere der Einfluss zeitlicher Rahmenbedingungen auf das BP wurde in den Experimenten untersucht.

Das Bereitschaftspotential ist über sein Ursprungsgebiet, die Neurophysiologie, hinaus bekannt und wird in philosophischen, politischen und juristischen Debatten als ein möglicher Beleg gegen die Existenz des freien Willens angeführt. Die Freiwilligkeit der Versuchspersonen, an diesen Experimenten teilzunehmen, soll daher bereits an dieser Stelle besonders betont werden. Als Grundlage für das Verständnis empfiehlt sich die Auseinandersetzung mit Bioelektrizität, exzitatorischen und inhibitorischen postsynaptischen Potentialen und dem Aufbau und der Funktion der Großhirnrinde. In der nun folgenden Einleitung werden zuerst die Eigenheiten und Bedingungen des Bereitschaftspotentials und anhand einiger Experimente zum BP der aktuelle Stand der Forschung beschrieben. Auf die Diskussion um den freien Willen und die Rolle des BP darin wird in einem Unterkapitel soweit im Rahmen dieser Arbeit möglich eingegangen. Die Einleitung schließt mit einer Darstellung der Hypothesen und Fragestellungen dieser Arbeit. Ziel derselben ist, die ideologische Überfrachtung des BP nicht weiter auszubauen, sondern auf wissenschaftlichem Wege eine Eigenschaft des BP zu untersuchen.

1.1 Das Bereitschaftspotential

Im Studium begegnet allen Studierenden der Medizin das Bereitschaftspotential in der Physiologie und in der Auseinandersetzung mit der Elektroenzephalographie. Dort wird es als ein EEG-Phänomen eingeführt, welches einer willkürlichen Bewegung um etwa 1,5 s vorangeht. Ähnlich wie die elektrische Aktivität der Herzmuskelzellen in der Elektrokardiographie (EKG) sichtbar wird und in Form zweidimensionaler Muster analysiert werden kann, ermöglicht das EEG die nicht-invasive Ableitung der Potentialdifferenz als Ausdruck der summierten elektrischen Aktivität der Neuronen der Großhirnrinde und macht sie einer Analyse zugänglich. Anders als beim Herzen, dessen vorrangige Funktion eine mechanische ist – die Pumpfunktion –, sind die Funktionen des Gehirns vielfältig und komplex und die Mechanismen insbesondere hinter abstrakten Empfindungen wie dem *Ich*, *Bewusstsein* und dem Ausbilden eines *Willens* nicht hinlänglich verstanden. Die Zuordnung von Mustern im EEG zu Vorgängen und Funktionen gestaltet sich entsprechend schwierig und Interpretationen sind nur begrenzt möglich. EEG-Phänomene lassen sich vor allem mit beobachtbarem Verhalten und der Wahrnehmung von Ereignissen korrelieren. Erkenntnisse aus der EEG-Forschung lassen

sich weiterhin mit Erkenntnissen aus anderen Untersuchungsverfahren, etwa der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), der Positronenemissionstomographie (PET), der invasiven Elektrokortikographie (ECoG), aber auch mit histo(patho)logischer Aufarbeitung der Anatomie des Gehirns und den Erkenntnissen aus der Neurochirurgie ergänzen. Das EEG bietet hier gegenüber anderen Untersuchungsmethoden den Vorteil der hohen zeitlichen Auflösung, welcher bei Vorgängen, die nur Millisekunden bis Sekunden andauern, von Bedeutung ist. Ein charakteristischer Verlauf der an der Kopfhaut gemessenen Potentialdifferenz, welcher abstrakte Informationen über die Aktivierungszustände neuronaler Zellen der Großhirnrinde im Vorfeld einer Willkürbewegung enthält, wurde bekannt unter dem Namen Bereitschaftspotential, den ihm seine Erstbeschreiber Hans Helmut Kornhuber und Lüder Deecke (1965) gaben. Es war und ist Objekt einer Reihe origineller und kontrovers aufgefasster Experimente, die mit Benjamin Libets Versuchen aus den Jahren 1982 bis 1985 begannen.

Das Bereitschaftspotential wird gemessen, indem die Versuchsteilnehmer wann immer sie mögen eine einfache Bewegung, etwa die Beugebewegung eines Zeigefingers, durchführen, und diese Bewegung in vorgegebener Anzahl wiederholen (Kornhuber & Deecke, 1965). Der Impuls für die Bewegung soll dabei nicht von außen gegeben oder beeinflusst sein, gar eine Reaktion auf einen äußeren Reiz darstellen. Deswegen wird in vielen Experimenten den Versuchspersonen auch keine externe Information über den Verlauf der Zeit bereitgestellt (eine Ausnahme stellen aber die Experimente von Libet et al., 1983 dar: hier simulierte ein rotierender Lichtpunkt auf einem Oszilloskop einen beschleunigten Uhrzeiger; siehe unten). Die Versuchspersonen bestimmten den Zeitpunkt der Bewegung selbst und initiierten sie spontan und aus *freiem Willen* heraus. Spezifisch für einen BP-Versuch ist insbesondere auch, dass die Bewegung nicht rhythmisch erfolgen soll, was einer vorzeitigen Festlegung des Zeitpunkts gleichkommen würde. In Vergleichsversuchen mit passiv ausgelösten Bewegungen fanden sich im EEG keine BPs (Kornhuber und Deecke, 1965). Die Bewegung wird mittels Elektromyographie (EMG), oder der Effekt der Bewegung mit einer Computermaus oder Computertastatur registriert. Zeitgleich mit den mehrfach wiederholten Bewegungen wird kontinuierlich ein EEG aufgezeichnet und der Zeitraum kurz vor der Bewegung, die sogenannte Epoche, auf Änderungen der Potentialdifferenz untersucht.

Da zwischen den Elektroden des EEG und der Hirnoberfläche einiger Abstand sowie der schlecht leitfähige Schädelknochen, Kopfhaut und Kopfhaare liegen, wird die Amplitude eines Potentials als um den Faktor 100 bis 1000 kleiner im EEG registriert, als sie tatsächlich ist (Schmidt et al., 2000). Darüber hinaus ist das BP mit einer Größe von etwa 10 μV im EEG ohnehin ein vergleichsweise kleines Potential, welches in einer Momentaufnahme des EEG in der Signalfut anderer Hirnaktivität untergeht. Erst durch die Tatsache, dass es im festen zeitlichen Zusammenhang mit einer Bewegung auftritt, und durch entsprechende Methodik, der Mittelung der EEG-Daten, wird es überhaupt sichtbar (Kornhuber und Deecke, 1965). Dies macht die vielfachen Wiederholungen der Bewegung notwendig, deren Anzahl in bisherigen Studien bei 20 bis sogar 512, in jüngerer Vergangenheit aber regelhaft bei 40 Wiederholungen angegeben wird (Kornhuber und

Deecke, 1965; Haggard und Eimer, 1999; Jo et al. 2015). Durch die Unvorhersehbarkeit der spontan-initiierten Bewegung wird eine Auswertung der Epochen entgegen der Zeitrichtung nötig, mit einer Koppelung der Daten an das Ereignis, hier die Bewegung, bei $t = 0$ ms. Kornhuber und Deecke bezeichneten ihre 1965 publizierte Methode als "chronologische Datenspeicherung und Rückwärtsanalyse", welche damals mittels Magnetbandspeicherung etabliert wurde und heute digital erfolgt. Die interessierenden Zeitabschnitte vor der Bewegung, also die Epochen mehrerer Durchgänge, werden quasi grafisch übereinandergelegt und rechnerisch gemittelt. So wird das zufällig bedingte Hintergrundrauschen herausgerechnet, das zuverlässig vor der Bewegung erscheinende BP jedoch aufsummiert und sichtbar gemacht (Kornhuber und Deecke, 1965, 2016).

Anhand der Einordnung des BP in existierende Klassifikationsschemata und der so vollzogenen Abgrenzung zu anderen wissenschaftlich deklarierten EEG-Mustern können die Eigenschaften des BP verdeutlicht werden. Einigkeit besteht darin, dass das BP nicht zur *Spontanaktivität* des Gehirns zählt, etwa dem Alpha-Rhythmus (Abgrenzung bereits durch Kornhuber und Deecke, 1965). Vielmehr ergibt sich ein wichtiger Ansatz der Klassifizierung durch die feste zeitliche Koppelung an ein Ereignis. Das BP zählt demnach zu den ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs, engl. event related potentials, ERPs). Da es sich bei diesem Ereignis zuverlässig um eine Bewegung oder die Vorstellung einer Bewegung handelt, wird das BP auch als bewegungskorreliertes Potential (engl. movement-related potential) bezeichnet (Jahanshahi und Hallett, 2003; Cunnington et al., 1996).

Da es sich bei der Willkürbewegung nicht um eine Reaktion auf einen äußeren Reiz oder ein *exogenes Ereignis*, sondern um einen von Innen gestarteten, *endogenen Prozess* handelt, wird anhand des Ursprungsortes des Ereignisses die Abgrenzung zu einer Untergruppe der ereigniskorrelierten Potentiale vollzogen, den evozierten Potentialen (EP, engl. evoked potentials). Die EPs werden durch Ereignisse der Außenwelt, also Reize, die mit den Sinnesorganen erfasst werden, ausgelöst. So gibt es etwa akustisch evozierte Potentiale (AEPs), visuell evozierte Potentiale (VEPs) und somatosensorisch evozierte Potentiale (SEPs), die in der Sinnesphysiologie untersucht werden.

Nach einem weiteren wichtigen Merkmal, seinem zeitlichen Verlauf, wird das BP als zu den langsamen Potentialen (engl. slow waves, slow potentials, slow cortical potentials, SCPs) zugehörig klassifiziert (Rockstroh et al. 1989b). Es wird auch gemeinsam mit der kontingenten negativen Variation (engl. contingent negative variation, CNV) und der Stimulus-vorangehenden-Negativierung (engl. stimulus-preceding negativity, SPN) nach der Ausrichtung auf ein zukünftig liegendes Ereignis zu den langsamen antizipatorischen Potentialen (engl. anticipatory slow waves) gezählt (Brunia et al., 2012). Langsame Potentiale dauern mehrere hundert Millisekunden bis Sekunden an und werden meist als Abbild komplexer kognitiver Prozesse verstanden, die etwa mit Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeit und Erwartung (Rockstroh et al., 1989a) oder Vorbereitung und Steuerung von Vorgängen und Verhalten in Verbindung stehen (Seifert, 2003).

Dem BP, der CNV und der SPN ist auch die negative Polarität gemeinsam. Diese wird im EEG konventionellerweise häufig, und etwas entgegen der eigenen Intuition, als Ausschlag oberhalb der Nulllinie dargestellt. Um diesen Sachverhalt und weitere Eigenschaften des BP zu verdeutlichen, ist in Abbildung 1 eine Schemazeichnung zu sehen.

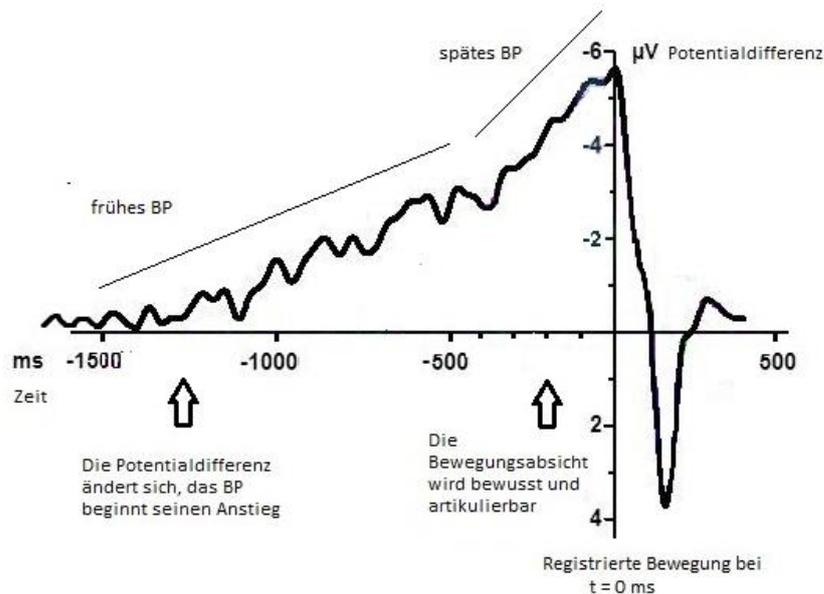


Abbildung 1: Schema des BP. Definitionsgemäß ist der negative Ausschlag des Potentials oberhalb der Grundlinie dargestellt. Da das BP sehr klein ist, wird es in einer Momentaufnahme im EEG durch andere Hirnaktivität überlagert. Es wird erst als gemitteltes Potential durch Übereinanderlegen mehrerer unter gleichen Bedingungen aufgenommener EEG-Epochen sichtbar. Mit dieser Methode lässt sich das zufällig bedingte Rauschen herausrechnen. Eine Epoche entsteht durch zeitliche Koppelung an die Bewegung (den Mausklick) bei $t = 0$ ms. Hier wurde sie auf ca. -1500 ms vor dem Mausklick und +500 ms nach dem Mausklick begrenzt. Etwa 400 ms vor Ausführen der Bewegung zeigt das BP einen steileren Anstieg, welcher ein Charakteristikum für die späte, lateralisierte Phase des BP ist. Wesentlich früher und mit einem sanfteren Anstieg beginnt das bilaterale „BP proper“ oder die frühe Phase des BP. Bei Libet et al. (1983) wurde ihren Versuchspersonen etwa 200 ms vor Ausführen der Bewegung bewusst, dass sie sich bewegen wollten.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der CNV und dem BP sind Gegenstand einer lebhaften Kontroverse und sollen hier kurz dargestellt werden. Die CNV wird zwischen einem Warnstimulus S1 und einem imperativen Stimulus S2, der mit einer Handlungsaufforderung verknüpft ist, gemessen. Diese Situation ist vergleichbar mit dem „Fertig“, „Los“ des Sports. Die CNV kumuliert als negatives Potential vor dem Stimulus S2. Sie wurde von ihren Erstbeschreibern als physiologisches Korrelat der Erwartung interpretiert (Walter et al. 1964). Da die mit der CNV verknüpfte Handlungsaufforderung meist motorischer Natur ist, vertreten einige Autoren die Meinung, die späte Phase der CNV sei tatsächlich ein BP (z. B. Rohrbaugh et al. 1976). Als großer Unterschied zwischen diesen beiden EKPs bleibt jedoch die Tatsache, dass die CNV eindeutig von außen getriggert wird (durch den Stimulus S1), und das BP durch einen endogenen Prozess ausgelöst wird (durch die in irgendeiner Form geartete Entscheidung, eine Bewegung durchzuführen und diese in der Folge einzuleiten). Vor diesem Hintergrund argumentieren viele Autoren dahingehend, dass das BP und die CNV unterschiedliche Phänomene darstellen, und betonen ihre

abweichenden Eigenschaften (etwa Ikeda et al., 1994, 1997; Cui et al., 2000a; Deecke, 2014). Gemäßigte Positionen gehen davon aus, dass sich das BP und die CNV eine gewisse gemeinsame Aktivität teilen (van Boxtel und Brunia, 1994; Cui et al., 2000a; Verleger et al., 2000), die von nahe der Mittellinie gelegenen (supplementären und cingulären) Motorarealen erzeugt werden (Cui et al., 2000 a,b).

Anhand der Abbildung 1 kann auch nachvollzogen werden, welche Parameter sich zur Beschreibung des BP eignen. Untersuchbar sind in erster Linie sein Beginn und seine Latenz (verstrichene Zeit zwischen Beginn und maximaler Ausprägung des Potentials) und die Amplitude (die hier eine Durchschnittsamplitude sein muss, da sie bei langsamen Potentialen als Mittelwert der Messwerte um den Potentialgipfel herum bestimmt wird; Seifert, 2003). Außerdem können die BPs aller EEG-Elektroden (zumeist 60 über dem Kopf verteilt) miteinander verglichen und die Topographie des Potentials zum Zeitpunkt ihres größten Ausschlags bestimmt werden. Dies ermöglicht eine grobe Lokalisation der Ursprungsgebiete des BP, wenn auch die räumliche Auflösung eines EEG mit mehreren Zentimetern sehr niedrig ist. Über das Ansprechen all dieser Parameter auf variierende Versuchsbedingungen versucht man Rückschlüsse auf Eigenschaften und Funktionen des BP zu ziehen. Verkompliziert wird dies dadurch, dass die Amplitude als relative Amplitude zu verstehen ist, da bioelektrische Aktivität keinen absoluten Nullpunkt aufweist. Hierauf fußt auch das Problem der Definition einer geeigneten Bezugslinie (engl. baseline), die als "Hilfs-Null-Linie" dienen muss und in der Regel durch Mittelung von Messpunkten, die eindeutig vor dem Beginn des Potentials liegen, bestimmt wird.

In der Literatur wird das BP in der Regel in zwei Phasen untergliedert (Kornhuber und Deecke, 1965; Shibasaki und Hallett, 2006). Die frühe Phase (engl. „BP proper“, early BP) ist charakterisiert als eine nicht-lateralisierte Negativierung über dem Vertex (der Kopfmittle), die ungefähr 1,5 s vor der Bewegung ihren langsamen Anstieg beginnt (Kornhuber und Deecke, 1965). Als ihre Ursprungsquelle gelten der supplementär-motorische Kortex (engl. supplementary motor area, SMA) und die davorliegenden Areale (prä-supplementär-motorischer Kortex oder pre-SMA und anteriore Anteile des mittleren cingulären Kortex) (Deecke und Kornhuber, 1978; Deecke et al., 1987; Ball et al., 1999; Cunnington et al., 2002, 2003; Shibasaki und Hallett, 2006; Nguyen et al., 2014).

In der späten, ca. 400 ms vor der Bewegung beginnenden Phase vermischt sich das eigentliche BP, das "BP proper", mit lateralisierten Potentialen des primären Motorkortexes (M1) und Prämotorkortex derjenigen Hemisphäre, welche die vom Versuchsteilnehmer durchgeführte Bewegung (etwa des Zeigefingers) steuert (Kornhuber & Deecke, 1965; Kutas & Donchin, 1980, Deecke, 1976, Shibasaki und Hallett, 2006). Seine Topographie zeigt also eine asymmetrische Verteilung. Die Steigung des BP in der späten Phase verläuft wesentlich steiler. Die lateralisierten Anteile des späten BP werden auch als „lateralisiertes Bereitschaftspotential“ bezeichnet (engl. lateralized readiness potential, LRP).

Bereits Kornhuber und Deecke begannen in ihrer Arbeit von 1965 zu untersuchen, ob Faktoren auf die Amplitude und den Verlauf des BP Einfluss nahmen. Sie stellten eine Abhängigkeit zwischen Größe der Amplitude und „intentionaler Beteiligung“ sowie eine inverse Abhängigkeit zur Habituation (Gewöhnung) fest.

Die Auswirkungen vieler weiterer Faktoren wurden in nachfolgenden Studien identifiziert und der frühen und späten Phase des BP zugeordnet. Darunter fanden sich viele psychologische Größen, die schwer abgrenzbar und messbar sind, wie Grad der Intention („level of intention“), Motivation, Zustand bewusster Vorbereitung („preparatory state“) und Lerneffekte. Auch Veränderungen des BP bei Vorliegen neurologischer Erkrankungen, darunter Parkinson, Dystonien, Kleinhirnläsionen und Hemiparesen, wurden festgestellt, sowie Auswirkungen spezifisch die Bewegung charakterisierender Parameter wie Forciertheit, Schnelligkeit, Präzision und Komplexität (Lang, 2003; Übersichtstabelle bei Shibasaki und Hallett, 2006, S. 2344, Tabelle 2).

1.2 Das Bereitschaftspotential im Forschungskontext

Wie kaum eine andere EEG-Komponente ist das BP hinsichtlich seiner Bedeutung diskutiert und mit ideologischen Gedanken überladen worden. Grundlage für seine Bekanntheit sind zum einen die Arbeiten von Kornhuber und Deecke (1965) und zum anderen von Libet, Gleason, Wright und Pearl (1982, 1983, 1985). Kornhuber und Deecke schrieben über ihren Fund im Jahre 1965, dass sie ihn als Ausdruck von Hirnprozessen verstanden, „die im Bewusstsein als *Bereitschaft zum Handeln* erscheinen“ und in eine Willkürbewegung mündeten. Sie grenzten somit das BP von der durch Walter et al. im Jahre 1964 erstmals beschriebenen CNV und ihrer Verhaltenszuordnung, der Erwartung, ab.

Fiel die oben angeführte Formulierung noch recht vage und vorsichtig aus, ließ sich weiteren Aussagen der Erstbeschreiber doch deutlich entnehmen, dass sie glaubten, hier das neurophysiologische Korrelat von Selbstwirksamkeit und Willensfreiheit gefunden zu haben. In ihrem 2003 veröffentlichten Aufsatz „Human freedom, reasoned will, and the brain: the Bereitschaftspotential story“ stellten sie die Experimente, die zur Entdeckung des BP führten, in den Kontext ihrer Frustration über einen ihrer Meinung nach weltweit vorherrschenden Forschungsansatz, der das Gehirn als ein passives System untersuche. Dies zeigte sich etwa in dem populär gewordenen, radikalen Behaviorismus, der jegliches menschliche Verhalten als Reaktion auf einen Reiz reduzierte und lange eines der einflussreichsten wissenschaftstheoretischen Psychologiekonzepte in den USA darstellte. „Wir dagegen wollten das aktive, das tätige Gehirn untersuchen“ (Spiegel Nr. 34, 20.08.2016, S. 104). Auch im Rückblick schrieb Lüder Deecke noch: „Das BP war kein Zufallsbefund; wir haben gezielt nach Zeichen selbst-aktiver Intention und Willen gesucht.“, (Deecke, 2015).

Vor dem Hintergrund, dass u. a. die SMA (siehe S. 6) als eine der Ursprungsregionen des BP gilt, kann die von dem Nobelpreisträger für Physiologie oder Medizin Sir John Carew Eccles und dem Philosophen Karl Popper entwickelte Theorie von der SMA als „Liaison-Hirn“, als die Gehirnregion, in der die mentale Welt mit der materiellen Welt in Interaktion tritt, als in einer Linie mit Kornhubers und Deeckes Dualismus von Wille und Gehirn verstanden werden (The self and its brain, 1977; dt. Das Ich und sein Gehirn, 1989). Dieser Dualismus blickt auf die lange Tradition der Unterscheidung zweier grundsätzlich unterschiedlicher Seinsbereiche, dem Materiellen (Körper, Atome) und dem Immateriellen (Homers Psyche, Platons und

Sokrates' Seele, das Leben nach dem Tod im Christentum) und auf das Leib-Seele-Problem von Descartes zurück.

Libet et al. wollten mit der Untersuchung der Chronologie Objektivität in die Debatte bringen (Libet, 1985). Sie fanden die in Kornhubers und Deeckes Arbeit anklingende Interpretation, das BP entspreche der Materialisierung des freien Willens, wohl etwas hochgegriffen. Libet und seine Kollegen ließen ihre Versuchsteilnehmer, wie für die BP-Situation üblich, wiederholt willentlich Bewegungen der rechten Hand durchführen. Sie sollten dabei in sich hineinhorchen und den Zeitpunkt des Auftretens ihres Willens oder Drangs, sich zu bewegen, berichten. Dies gelang, indem ein oszillierender Lichtpunkt als beschleunigter "Uhrzeiger" diente, der sich in weniger als 3 Sekunden einmal über das Ziffernblatt bewegte. Da das Beobachten der „Uhr“ eine zusätzliche visuelle und kognitive Tätigkeit darstellte, wurde ein Kontrollexperiment durchgeführt, in dem extern zugefügte Hautstimuli ebenfalls mit dem Oszilloskop zeitlich datiert werden sollten. Die Fehler in der zeitlichen Einordnung der Sinneswahrnehmung wurden bei der Deutung der Angaben bezüglich des Bewusstwerdens des Willens mitberücksichtigt. Die angegebenen „Zeigerpositionen“ bestätigten, dass der bewusst gewordene Wille der ausgeführten Bewegung voranging, jedoch nur um etwa 200 ms. Was überraschte, war, dass er nicht auch dem BP voranging, sondern dieses wiederum einige Hundert Millisekunden zuvor im EEG zu sehen war. Libet et al. zeigten so, dass eine bewusste Willensbildung zur Bewegung, wenn überhaupt, erst nach Beginn des BPs erlebbar ist.

Das zeitliche Aufeinanderfolgen von BP und Bewegung führte zu dem Schluss, dass letztere durch ersteres vorbereitet wird. Aus der Reihenfolge wurde ein Kausalitätszusammenhang. Weiterhin untermauerten die Studien, in denen Anteile des sekundären und primären Motorkortex¹ als hauptsächliche Ursprungsgebiete des frühen und späten BP festgestellt wurden (siehe S. 5), die funktionelle Zuordnung des BP zur Bewegungsvorbereitung. Der Begriff „Bereitschaftspotential“ und die Funktionsbeschreibung „Bewegungsvorbereitung“ bleiben hier recht ungenau, wie u. a. auch Schmidt et al. (2016) anmerkten. Klassischerweise scheint hier Bereitschaft im Sinne von *allgemeiner Bewegungsvorbereitung* verstanden zu werden (etwa bei Jahanshahi und Hallett, 2003), inklusive unbewusster und bewusster Prozesse wie Entscheiden, Planen und Mobilisieren von Ressourcen, die zur Ausführung der Bewegung erforderlich sind. Die Funktion der *allgemeinen Bewegungsvorbereitung* wird insbesondere der frühen Phase des BP zugerechnet. Als *spezifische Bewegungsvorbereitung* hingegen, die sich insbesondere auch in der Lateralisation in der Topographie zeigt, gilt die späte Phase des BP. Wird etwa der rechte Zeigefinger bewegt, lässt sich die LRP-Aktivität vor allem über dem somatotopisch zuständigen Bereich des linken Motorkortex messen (Kutas und Donchin, 1980; Deecke, 1976; Shibasaki und Hallett, 2006; Eimer, 1998).

¹ Der Motorkortex liegt anatomisch rostral des Sulcus centralis und wird als mit der Motorik funktionell verknüpfte Einheit angesehen, da er zum einen auf elektrische Reizung von außen mit einer Bewegung reagiert und zum anderen einen typischen zytoarchitektonischen Aufbau ausweist. Der primäre Motorkortex bedarf in Abgrenzung zum sekundären Motorkortex der niedrigsten Stimulationsintensität um eine Bewegung auszulösen (Schmidt et al., 2011). Interessanterweise werden Bewegungen, die durch kortikale Stimulation ausgelöst werden, nicht als dem eigenen Willen unterworfenen Aktionen wahrgenommen, sondern als *einem angetane Bewegungen* (Penfield, 1958).

Wenn die neuronale Bewegungsvorbereitung aber schon angestoßen ist, bevor wir uns bewusst dazu entschließen, eine Bewegung durchzuführen, erscheint der freie Wille plötzlich wie bloßes Beiwerk, wie ein Epiphänomen oder eine nachträgliche Illusion, man halte die Zügel in der Hand.

Anstatt zu ernüchtern, erhitzen die Ergebnisse von Libet et al. den Diskurs über das BP. Ein entgegengesetztes Verständnis von Dualismus bahnte sich seinen Weg bis in die öffentliche Wahrnehmung: Gehirn vor Bewusstsein, Physiologie vor Psyche, Materie vor Geist. Gleichmaßen spielten die Ergebnisse denjenigen in die Karten, die den Monismus des strikten Materialismus hochhielten, dass nämlich mit dem Willen auch das *Ich*, das Bewusstsein, Gedanken und Gefühle auf rein physikalische und chemische Prozesse zurückzuführen seien. Diese Vorstellung, die ebenfalls eng mit einem naturwissenschaftlich geprägten Weltbild verknüpft ist, besitzt gleichfalls eine lange Tradition, wenn man Demokrits Theorie, dass alles und damit auch die Seele aus „Atomen“ bestehe (Capelle, 1935, 2008) oder das Menschenbild Hobbes' in seinem Werk „Leviathan“ und La Mettries in „L'Homme Machine“ bedenkt.

Es folgten diverse Experimente mit Abwandlungen und Ergänzungen. Haggard und Eimer (1999) reproduzierten das Libet-Experiment, ließen den Probanden jedoch die Wahl zwischen einer Zeigefingerbewegung der rechten oder linken Hand. Sie entkräfteten somit den Einwand, dass Libets Experiment keine Situation eingefangen haben könnte, in der überhaupt Willensfreiheit möglich gewesen war, da die Probanden keine Handlungsalternative besaßen. Die Handlungsalternative Bewegen oder Nichtbewegen schien hier nicht gelten zu dürfen.

Auch Miller et al. wiederholten 2011 den Libet-Versuch und stellten ihm ein Vergleichsexperiment zur Seite, in welchem auf das Präsentieren eines rotierenden Lichtpunktes als beschleunigte „Uhr“ als Hilfestellung zur Zeitdatierung verzichtet wurde und keine weitere Aufgabe mit den willentlichen Bewegungen verknüpft war. Im EEG zeigten sich signifikant geringere Amplitudenwerte des BP in dem Versuch ohne Uhr, sodass die Autoren schlussfolgerten, dass ein Großteil des BPs nicht auf die Bewegungsvorbereitung, sondern auf das Beobachten der Uhr zurückzuführen sei. Ebenso könnte auch die Introspektion hier eine Rolle gespielt haben. Dem entgegen stehen die Ergebnisse von Libet et al. (1985), in denen vor den Hautstimuli, die mit der gleichen Methodik wie der wahrgenommene Wille zeitlich eingeordnet werden sollten, keine dem BP ähnliche Negativierung der Potentialdifferenz festgestellt werden konnte (S. 531, 537). Dies konnten Miller et al. wiederum in einem weiteren Experiment, in dem ein über Lautsprecher eingespielter Ton zeitlich datiert werden sollte, reproduzieren. Die Schlussfolgerung war, dass die BP-Negativierung nicht per se durch das Beobachten der Uhr, sondern in einer Kombination aus Uhr-Beobachtung und der Art der Aufgabenstellung (motorisch vs. somatosensorisch oder akustisch) begründet liege. Dies könnte entweder erneut die hier jedoch nicht mehr vorrangige Rolle der Bewegungsvorbereitung bekräftigen oder aber auf einen signifikanten Unterschied zwischen EKP und EP (endogene versus exogene Ereignisquelle) oder auch Aktivität oder Passivität der Versuchsperson in der Aufgabenstellung (Reizperzeption versus motorische Handlung) hinweisen.

Libet selbst wollte die Ergebnisse seiner Experimente nicht als Gegenbeweis zum freien Willen verstanden wissen und versuchte, einen Ansatzpunkt zu dessen Verteidigung zu finden. Er vermutete, dass in den 200-150 ms, die der bewusst gewordene Wille der ausgeführten Bewegung vorangeht, willentlich die bereits eingeleitete Bewegungsvorbereitung gestoppt werden könne. Dies leitete er zum einen (a) aus Berichten introspektiver Wahrnehmung ab, in denen Versuchspersonen angaben, dass sie gelegentlich Bewegungsintentionen verspürten und ihnen aber bewusst nicht nachgingen. Zum anderen sah er dies in den Ergebnissen eines Experiments (b) bestätigt, in welchen die Versuchspersonen eine Bewegungsintention entwickeln sollten, die Bewegungsvorbereitung beginnen sollten, und diese aber vor Ausführen der Bewegung stoppen mussten (Libet, 1985). Ersteres ließ sich schwer objektivieren, da ohne resultierende Bewegung im Nachhinein kein Fix-Punkt zur Mittelung der EEG-Daten und Sichtbarmachung des BP festgelegt werden konnte. In dem Experiment wurde dies umgangen, indem die Versuchspersonen die Bewegung wenn überhaupt zu einer bestimmten Zeigerposition des Oszilloskops hin planen sollten (etwa die 12 Uhr Position), und den Akt bei einer „Zeigerposition“ 2,5 bis 5 Sekundenstriche vor 12 Uhr (durch die höhere Geschwindigkeit des Zeigers also 150-250 ms vor dem Fixpunkt) stoppen sollten. Die gemittelte Potentialdifferenz ähnelte im Wesentlichen dem BP in den ursprünglichen Versuchsdurchläufen. Häufig ließ sich 150-250 ms vor dem Fixpunkt ein Stagnieren oder Absinken der Amplitude beobachten. Die zentralen Kritikpunkte an Libets Versuchen zum Veto-Recht des Willens liegen einerseits in der fehlenden Nachweisbarkeit der eingeleiteten Handlung oder vorbereiteten Bewegung. Der Experimentator ist hier auf die Wahrnehmungen und Angaben der Probanden angewiesen. Und die mögen davon beeinflusst sein, dass die Versuchspersonen schon vor Einleiten der Bewegung wussten, dass sie die Bewegung nie ausführen würden. So kam es denn auch, dass Trevena und Miller (2010) eine mit dem BP vergleichbare Negativierung im EEG fanden, wenn die Probanden die Entscheidung trafen, sich ausdrücklich nicht zu bewegen. Andererseits könnte auch dem Abbruch der Bewegungsvorbereitung wieder ein unbewusster neuronaler Prozess vorangegangen sein.

Die Schwierigkeit, Beobachtungen über Versuchsteilnehmer in der dritten Person zu machen und mit Wahrnehmungen aus der Ich-Perspektive derselben zu korrelieren, gingen Jo et al. mit Experimenten an, in denen sie professionelle Meditierende hinzuzogen und zu Introspektion, Wahrnehmung, Bewusstsein und Entscheiden befragten (Jo et al. 2014, 2015). Der Drang oder Impuls sich zu bewegen wurde von dem befragten Meditationsexperten (Jo et al. 2014) als prä-konzeptionelle Bewegung empfunden, die nicht zwangsläufig zur Bewegung führe (hierfür sei eine gewisse Selektion notwendig), was die Annahme von Libet (2015) unterstützen würde, dass Bewegungsimpulsen bewusst nicht nachgegangen werden kann (siehe Veto-Recht-Experiment im vorherigen Absatz).

Weitere spitzfindige Kritikpunkte und alternative Interpretationen kamen auf: Etwa, dass bei der Vielzahl an wiederholten Bewegungen vielmehr automatisierte Prozesse gemessen würden als eine immer wiederkehrende bewusste Entscheidung (Keller und Heckhausen, 1990). Oder dass im Grunde der freie Wille lediglich in der Entscheidung zur Teilnahme an dem Experiment lag und gemeinsam mit „Jacke und Hut“ an

der Garderobe gelassen wurde (vergl. Jo et al. 2014, S. 13). Dies entspricht in etwa der Auffassung von Handlungssteuerung von Goschke et al. (2003, 2013), der zufolge Absichten nicht schlicht als direkte Ursache im Ursache-Wirkungs-Modell verstanden werden könnten, sondern eine Absicht vielmehr die Wahrscheinlichkeit für eine Handlung mitunter langfristig erhöhe oder erniedrige. Weiterhin könnte man die Ergebnisse von Schurger et al. (2012) entsprechend deuten, wenn man annimmt, dass die Versuchspersonen in das Experiment einwilligten, für dessen Umsetzung eine neuronale fluktuierende Aktivität implementierten, deren Negativierung dann eine stochastische Begünstigung der Bewegungsausführung herbeiführte. Keller und Heckhausen (1990) wiederum gingen davon aus, dass in den BP-Experimenten lediglich die Aufmerksamkeit auf immer wiederkehrende unbewusste Bewegungsimpulse gelenkt werde. Diese Impulse würden den Menschen ebenso außerhalb eines Versuchs in unregelmäßigen Abständen ereilen und zu Bewegungen führen, die uns derweil auch meist unbewusst blieben. In dem klassischen BP-Experiment würden diese Impulse quasi kanalisiert und zum Ausführen der geforderten Bewegung genutzt (vergl. auch Jo et al. 2014, S. 12).

Haggard und Eimer (1999) befanden, dass man die frühe Phase des BP eher als abstrakte Bewegungsvorbereitung verstehen sollte und man die Argumentationslage auf das LRP (die späte BP-Phase), welches die Bewegung der gegenüberliegenden Körperhälfte konkret vorbereite, übertragen müsse. In ihren Versuchen korrelierte ein früheres Bewusstwerden der Willensbildung mit einem früheren LRP-Beginn, nicht aber mit einem früheren Einsetzen des „BP proper“ (wobei Jo et al. 2015 jedoch feststellten, dass es durchaus eine Korrelation zwischen dem Bewusstwerden des Willens und der Steigung des „frühen BP“ gibt). Da gerade die zeitliche Abfolge von BP, bewusstgewordener Bewegungsintention und Bewegung die entscheidende Grundlage für den angenommenen Kausalitätszusammenhang zwischen unbewussten neuronalen Entscheidungsprozessen, bewusster Entscheidung als Epiphänomen und der resultierenden Bewegung darstellt, muss ihr eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Bemerkenswerterweise verspürten zwei der acht Probanden (im Mittel) ein Bewusstwerden der willentlichen Entscheidung, welches vor dem LRP im EEG lag (Haggard und Eimer, 1999, S.132, Tabelle 2). Auch bei Trevena und Miller (2002) trat die Lateralisation der späten Phase des BP erst nach der bewussten Bewegungsentscheidung auf, was einer bewussten Entscheidung (rechts oder links) vor neuronaler, spezifischer Bewegungsvorbereitung bedeuten könnte. Sie wiesen ebenfalls darauf hin, dass die zeitliche Verschmierung durch das Mitteln über die zahlreichen Durchgänge dazu führen kann, dass der Beginn gemittelter EKPs früher erscheinen mag, als er es tatsächlich ist.

Generell kann die breite Streuung der zeitlichen Angaben der Willenswahrnehmung sowohl zwischen verschiedenen Studien (Libet et al. 1983; Keller und Heckhausen, 1990; Haggard und Eimer, 1999; Trevena und Miller, 2002), zwischen den einzelnen Versuchspersonen innerhalb einer Studie, aber auch bei ein und derselben Versuchsperson Hinweis dafür sein, wie schwer definierbar, wahrnehmbar und datierbar die Entität „Willensentscheidung“ sein kann. Dieses bunte Bild von Gründen zur Skepsis und variierenden

Interpretationen reichte jedoch nicht aus, um das öffentliche Bild, das BP sei ein geltendes Argument gegen die Willensfreiheit, maßgeblich zu verändern.

In jüngerer Zeit erregten allerdings Arbeiten von Wissenschaftlern aus dem Team um John-Dylan Haynes große mediale Aufmerksamkeit. Sie schafften es, die Auswertung der Experimente mit einer Gehirn-Computer-Schnittstelle (engl. brain-computer-interface) in die Echtzeit zu verlegen. Im Jahre 2008 veröffentlichten sie ein verschärftes Libet-Experiment, in welchem mittels einer Computersoftware bereits 10 s vor einer Bewegung vorhergesagt werden konnte, ob der Proband die rechte oder linke Hand bewegen würde (Soon et al., 2008). Dies geschah nicht auf Basis von EEG-Daten, sondern mithilfe rascher statistischer Auswertung von fMRT-Bildern. Es ging den Wissenschaftlern hier weniger um die Erfolgsrate bei der Vorhersage, die mit im Mittel 60 % nur knapp über 50 % lag, sondern darum, dass bereits deutlich früher als bisher berichtet spezifische Hirnaktivität vor einer Bewegungsentscheidung zu verzeichnen ist.

In einer Erweiterung des Experiments zum Veto-Recht des bewussten Willens (Libet, 1985), diesmal wieder auf Grundlage von EEG-Daten, konnte jedoch durch Haynes' Arbeitsgruppe festgestellt werden (Schultze-Kraft et al., 2016), dass die Bewegungsvorbereitung bis 200 ms vor der tatsächlichen Bewegung gestoppt werden kann, obwohl das BP bereits begonnen hat. Im Experiment simulierte der Computer eine Ampel, die auf Rot umsprang, sobald das Muster des BP die Bewegungsvorbereitung verriet. Nicht nur war die Bewegung komplett verhinderbar, sondern sogar nachdem im EMG der Beginn motorischer Aktivität erfasst worden war, konnte diese noch abgewandelt und auf ein Minimum reduziert werden. Folglich scheint der Wille doch nicht durch seine neuronalen Vorläuferprozesse determiniert zu sein, und die Annahme, das Gehirn entscheide, nicht wir selbst, vorerst überwunden (Deecke and Soekadar, 2016). Da das grüne Licht der Ampel jedoch den Versuchspersonen anzeigte, ab wann sie sich bewegen durften, kamen Schultze-Kraft et al. nicht um die Kritik herum, dass es sich hierbei doch wohl eher um die Untersuchung einer CNV gehandelt habe, oder doch zumindest der Freiraum eines klassischen BP-Experiments verkleinert wurde (Deecke and Soekadar, 2016).

1.3 Einblick in die Diskussion um die Willensfreiheit

Ob die lange vorherrschende Sicht auf das BP, dass es die Existenz eines freien Willens widerlege, in dem Umfang gerechtfertigt war, kann aus neurowissenschaftlicher Perspektive am ehesten auf Grundlage der Ergebnisse von Schultze-Kraft et al. aus dem Jahre 2016 angezweifelt werden. In der Ausgabe des Magazins Der Spiegel vom 20.08.2016 gratulierte Lüder Deecke seinem jüngeren Kollegen und nannte die Debatte, wie sie sich um das BP entfacht hatte, aus der Retrospektive „hysterisch“. Endlich sei wieder „Vernunft eingekehrt“.

Deecke lobte denn auch die „Selbstreinigung der Wissenschaft“, wenn sie auch Jahrzehnte hierfür brauchte.

Freilich ist das Thema Willensfreiheit eine klassische Frage der Philosophie und wird auch in anderen Fachdisziplinen intensiv behandelt. Die regelmäßige feuilletonistische Berichterstattung der BP-Forschung (u. a. DIE ZEIT Nr. 17 vom 17.04.2008 „Der unbewusste Wille“; Sonderdruckbeilage Publik-Forum zu Heft Nr. 21 vom 10.11.2017 „Wer ist Herr im Hirn? Der Streit um den freien Willen“; Der Spiegel Nr. 15, 2016 „Der freie Un-Wille“; Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 30.01.2016 „Ist das Gehirn fremdgesteuert? Endlich befreit!“) mag Indiz dafür sein, dass in jüngerer Zeit die Frage, „ob der Mensch einen freien Willen hat?“ wieder auf größeres Interesse stößt. Diese Frage erscheint auf den ersten Blick konkret formuliert, da „Freiheit“ und „Wille“ aber sowohl vielfältig und uneinheitlich genutzte Begriffe des Alltags als auch Begriffe der Fachwelt mit hier ebenfalls verschiedenen Definitionen und Interpretationen sind, ist ihre Beantwortung deutlich erschwert. So wurde und wird etwa der Begriff „Wille“ im Sinne der Aufklärung vor allem mit Bewusstsein und Vernunft in Verbindung gebracht und erlaubt dem Menschen, sich von der Natur abzugrenzen. Er erfuhr aber bei Arthur Schopenhauer (1804-1818) eine radikale Umdeutung, wonach „jede Bewegung, Gestaltung, Streben, Seyn, daß dies Alles Erscheinung... des Willens ist [...]“ (zitiert nach von Hübscher, 1985, S. 353) und der zufolge Schopenhauer sogar die Bewegungen der Tiere, der Pflanzen und der anorganischen, leblosen Natur als Ausdruck eines zugrundeliegenden Willens, nämlich dem blinden, dumpfen Drang zum Dasein und Leben, verstehen könne (vergl. Schopenhauer, 1836). Die Willensdefinition Schopenhauers verweist also eher auf das Animalische, Triebhafte, auch im Menschen, und ist Baustein unseres heute vergleichsweise biologisch geprägten Weltbildes. In eine ähnliche Richtung zielte auch die Psychoanalyse Freuds; dieser meinte jedoch mit der neuen Domäne des Unbewussten auch einen Konflikt offenbart zu haben. So sah Freud es doch als „dritte narzisstische Kränkung der Menschheit“ an, dass sich das Unbewusste der Kenntnis und Kontrolle des Bewusstseins entzieht und „das Ich nicht Herr sei in seinem eigenen Haus“ (Freud, 1917, S. 4 und 7). Der unbewusste und bewusste Wille scheinen hier gegeneinander zu arbeiten. Heutzutage integrieren wiederum viele Philosophen das Unbewusste in ihre Definitionen von Willen. Es wird dann auch von einer bedingten Willensfreiheit gesprochen und nachgehakt: warum kann eine Entscheidung, die unbewusst auf Grundlage meiner Persönlichkeitsmerkmale, meiner Motive und Wünsche entstanden ist, nicht frei sein, wenn sie doch mein *eigen* ist, nicht mit meinem bewussten Selbst in Widerspruch steht und mir nicht aufgezwungen wurde?

Es wird verständlich, warum Geisteswissenschaftler nicht müde werden zu betonen, dass die Unschärfe der Begriffe in dieser Debatte nicht unterschätzt werden dürfe. Sie ist gar für viele Philosophen der Grund, nachdrücklich zu betonen, dass empirische Forschung die Frage nach der Willensfreiheit nicht beantworten könne (vergl. Prof. Dr. Dr. Manfred Frank im Interview in DIE ZEIT Nr. 36 vom 27.08.2009). „Willensfreiheit lasse sich nämlich nur implizit definieren, als eine Erläuterung eines Phänomens, das bereits bekannt ist und dessen Kenntnis ausdrücklich oder unausdrücklich vorausgesetzt werde“ (vergl. Ferber, 2003, S. 156). Unter anderem liege die Schwierigkeit darin, eine brauchbare Definition ohne Rückbezug auf die Begriffe „Freiheit“ und „Wille“ zu finden. „Wenn ich also nicht schon weiß oder zumindest erfahren habe, was (Willens-)Freiheit ist, kann sie mir weder durch philosophische Begriffsanalyse noch durch empirische Demonstration erläutert werden“ (Kläden, 2010, S. 31). Es muss in empirischer Forschung – wie etwa am Dilemma der großen

Variation von Zeitangaben bezüglich des verspürten Willens ersichtlich wurde (siehe S. 9 dieser Arbeit) – also die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass nicht alle Versuchsteilnehmer ein einheitliches Verständnis von Willensfreiheit oder auch gleichermaßen einen Zugang zu sich selbst haben. In dem Fall des Libet-Experiments wird schließlich elektrische Hirnaktivität, wie etwa das BP, nach den Maßstäben der Naturwissenschaften gemessen, der Zeitpunkt der Willenswahrnehmung aber mit der Methode der Introspektion. Ein drastischer Schluss hieraus wäre, dass sich die Willensfreiheit auf Grundlage empirischer Daten weder beweisen noch widerlegen lasse (Kläden, 2010, S. 32).

Mit diesem Kapitel 1.3 soll nun also nicht die Ansicht unterstützt werden, dass die Frage nach der Existenz des freien Willens mit der BP-Forschung überhaupt beantwortet werden könnte. Vielmehr soll eine Ahnung der Komplexität der Argumentation und ein Eindruck der Größe der Thematik vermittelt werden, die doch viele Überschneidungen mit anderen gewichtigen Fragen aufweist, wie „Was ist Geist?“, dem Verhältnis von „Geist und Körper“, nach dem „Ich“ und „Bewusstsein“ und der Sinnhaftigkeit des Lebens. Es soll dazu ermutigt werden, sich über dieses kurze Kapitel hinaus weiter mit den existenziellen Fragen der Menschheit auseinanderzusetzen, die auch Tore öffnen hin zur Phänomenologie, Metaphysik, Erkenntnistheorie und Theologie. Angemessen ist dieser Einschub vor dem Hintergrund, dass das BP als Klassiker in der Debatte um die Willensfreiheit gilt. Der Ausgang der Debatte – oder auch nur ihre Tendenz hinsichtlich eines Ausgangs – hat schließlich Auswirkungen auf nahezu alle erdenklichen Lebensbereiche; sie berührt unser Selbstverständnis und unsere Gesellschaftsformen. Demokratie basiert auf der Annahme, eine Wahl zu haben, unsere Rechtsprechung auf der Prämisse, dass es Verantwortung gibt, unser Menschenbild und unsere sozialen Interaktionen auf der Selbsterfahrung und Fremderfahrung, dass wir zwar nicht unbeeinflusst sind, so aber doch zu einem gewissen Grad unabhängig und frei entscheiden können. Die Schriftstellerin Juli Zeh brachte die Konsequenzen eines etwa von Hirnprozessen abhängigen, unfreien Willens insbesondere für das Thema Schuld und Verantwortung pointiert auf den Punkt und schrieb, „dass sie sich auf die ersten strafrechtlichen Prozesse freue, in denen der Täter sich mit dem Ausruf verteidigt: "Ich war's nicht, das war mein Gehirn!" (SZ-Magazin vom 08.09.2006, S. 54)

Aus der philosophiehistorischen Vogelperspektive lässt sich feststellen, dass es immer wieder Zeiten gab, in denen das Thema Willensfreiheit den Zeitgeist besonders prägte. Andersherum stand die Debatte um die Willensfreiheit selbstverständlich immer unter dem Einfluss des jeweiligen Zeitgeists. Die Argumentationsschleifen wiederholen sich in abgewandelter Form, mal schwingt das Pendel in Richtung mehr, mal in Richtung weniger Freiheit. Durchgehend bleibt jedoch eine Art Ambiguität, ein im Grunde gleichzeitiges Glauben an Unfreiheit einerseits und Freiheit andererseits, wobei jeder Gesellschaft, jedem Individuum mehr oder weniger gelingt, diese beiden Gegensätze miteinander in eine Kohärenz, in einen Einklang zu bringen. So kommt, wer sich heutzutage die Frage nach dem freien Willen stellt, nicht umhin, sich mit soziologischen und naturwissenschaftlichen Erkenntnissen auseinanderzusetzen. Würden wir nicht durchaus zustimmen, dass wir als Person so etwas wie eine Summe aus (Epi-)Genetik, frühkindlicher Prägung und Erziehung, Bildung und gesellschaftlichem Einfluss sind? Und trotzdem spüren wir tagtäglich

unser Ich, erleben uns als selbstbewussten Urheber unserer Handlungen, fühlen uns in der Lage, abzuwägen, langfristige Ziele zu setzen, uns Einflüssen gewahr zu werden, uns aber auch von ihnen zu distanzieren und Neues zu schaffen. Wir leben mit diesem Widerspruch, mit dem gleichzeitigen Glauben an Freiheit und Unfreiheit, der sich aber tatsächlich wie ein roter Faden durch die Geschichte spannt. Fand sich etwa einerseits in der Antike der Glaube an das unabänderliche Schicksal, griechisch mythologisch dargestellt durch die drei Moiren Klotho, Lachesis und Atropos, die den Lebensfaden spinnen, lässt doch andererseits die starke Bedeutung von Tugend und gutem Lebenswandel darauf schließen, dass an die Willensfreiheit der irdischen Bewohner, diese zu üben bzw. jenen zu führen, geglaubt wurde. So ließ Platon Lachesis in seinem Werk *Politeia* (dt. *Der Staat*) die Seelen vor ihrer Reinkarnation ihre nächste Lebensbahn wählen, an welche sie dann nach dem „Gesetze der Notwendigkeit“ gebunden blieben. „Die Tugend ist aber ungebunden, von ihr erhält ein jeder weniger oder mehr, je nachdem er sie in Ehren hält oder vernachlässigt. Die Schuld liegt am Wählenden, Gott ist schuldlos.“ (Buch X, 617d/e). Auch kann, was heute als „stoische Ruhe“ bezeichnet wird, entweder als Schicksalsergebenheit interpretiert werden, welche sich auch in Marc Aurels Ausspruch als Vertreter der jüngeren Stoa wiederfinden lässt: „Liebe das, was dir widerfährt und zugemessen ist; denn was könnte dir angemessener sein?“ (Selbstbetrachtungen VII, 57, hier zitiert aus der Übersetzung von Wittstock, 1949). Sie kann aber auch als stoische Lebensweise, gleichermaßen als Methodik zum Erlangen von Freiheit verstanden werden, indem Ertragen und Entsagen das Maximieren von Unabhängigkeit ermöglichen. Hierzu sagt Marc Aurel: „Schmücke dich mit Harmlosigkeit, Bescheidenheit und Gleichgültigkeit gegen alles, was zwischen Tugend und Laster in der Mitte liegt.“ (Selbstbetrachtungen VII, 31). Ähnliches verfolgte wohl Diogenes, der Autarkie und Bedürfnislosigkeit demonstrativ in seiner Tonne auslebte.

Mit dem Aufblühen des Christentums, insbesondere aber zu Zeiten der Reformation, war die Frage nach dem freien Willen der Menschen nicht ohne Sorge, die Allmacht Gottes zu beschneiden, zu beantworten. Im Kern ging es dabei darum, ob der Mensch sich freiwillig, aus sich heraus, zu Gott und zum Guten hinwenden kann, oder er dafür auf Gottes Gnade angewiesen sei. Dies führte zum Streit zwischen dem Gelehrten Erasmus von Rotterdam und Martin Luther, die in reger Korrespondenz miteinander standen und ihre Meinung zu diesem Thema je in einer Schrift an die Öffentlichkeit trugen: „*De servo arbitrio*“ (dt. *Über den geknechteten Willen*, Luther, 1525) als Antwort auf „*De libero arbitrio*“ (dt. *Über den freien Willen*, v. Rotterdam, 1524). „Wenn wir glauben, es sei wahr, dass Gott alles vorherweiß und vorherordnet, [...] dann kann auch nichts geschehen, wenn er es nicht selbst will.“ Da muss der vernünftige Mensch erkennen, „dass es einen freien Willen weder im Menschen noch im Engel, noch in sonst einer Kreatur geben kann.“ (Luther, 1525, hier zitiert nach Schäfer, 2003, S. 1, drittletzter Absatz). Dem entgegen stand Erasmus von Rotterdams Auffassung von Willensfreiheit „als eine Kraft des menschlichen Wollens [...], durch die sich der Mensch dem zuwenden, was zum ewigen Heil führt, oder sich davon abkehren könnte“ (v. Rotterdam, hier zitiert nach Welzig, 1969, S. 37).

An dieser Stelle eine kurze Definition zum Determinismus, die laut Meyers Enzyklopädischem Lexikon (1972, S. 483f) eine Lehrmeinung darstellt, der zufolge „alles Geschehen in der Welt durch Gesetzmäßigkeiten in

seinem Verlauf unabänderlich ist“. Demnach determiniert die Gesamtheit aller Zustände der Vergangenheit die Gegenwart und es kann nur einen Weltverlauf geben. Heutzutage werden in Auseinandersetzung mit dem Determinismus verschiedene Positionen unterschieden: der Kompatibilismus oder „weiche Determinismus“, erkennt eine Vereinbarkeit von Willensfreiheit und einer determinierten Welt an. Nach Max Scheler und Karl Jaspers kann dies damit begründet werden, dass im Entscheiden "eine Seite unserer Existenz zum Vorschein [kommt], die sich prinzipiell einer 'Verobjektivierung' entzieht (Zippelius, 2011, § 25 III). Der Inkompatibilismus verneint diese Vereinbarkeit hingegen und besagt, dass wenn es Determinismus gibt, es keinen freien Willen geben kann.

Wie nahe sich Fatalismus, der Glaube an einen Willen Gottes (gepaart mit Negierung der menschlichen Willensfreiheit) und der Glaube an eine mechanistisch-kausale Erklärbarkeit aller Zustände der Welt eigentlich sind, wird deutlich, wenn man bedenkt, dass sich aus allen dreien Passivität, Ausgeliefertsein, Unabwendbarkeit oder Vertröstung ins Jenseits ableiten lassen. Ebenso ergäben sich Schwierigkeiten für unser Verständnis von Schuld und Verantwortung und unsere Rechtsprechung.

Einige Wissenschaftler bleiben heute hiervon recht unbeeindruckt. So treten etwa der Biologe und Hirnforscher Gerhard Roth und der Neurophysiologe Wolf Singer immer wieder in den öffentlichen Diskurs und proklamieren, dass es keinen freien Willen gäbe. So waren sie auch Mitautoren der Deklaration „Das Manifest“ (2004), in welcher sich außer ihnen 9 weitere „führende Neurowissenschaftler über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung“ äußerten und prophezeiten, dass es nur eine Frage der Zeit (und verbesserter Technik) sei, dass die Frage nach dem freien Willen beantwortet werden könne. Aktuell meldet sich auch häufig der emeritierte Professor für Strafrecht und Rechtsphilosophie, Reinhard Merkel, zu Wort und verlangt, dass wenn etwa auf Grundlage der Hirnforschung in ferner Zukunft Entscheidungsvorhersagen über eine Straftat getroffen werden könnten (bevor diese ausgeführt würde), man vorbestraften Individuen anbieten müsse, dass sie sich einen „Chip“ implantieren ließen, der das Ausführen der Straftat etwa durch elektrische Modulation der Gehirnaktivität verhindere (vergl. Podiumsdiskussion vom 26.11.2013 mit Prof. Dr. John-Dylan Haynes, Prof. Dr. Reinhard Merkel, Prof. Dr. Reinhard Werth und Dr. Richard Wetzell, unter Moderation von Martina Kothe, NDR: <https://www.youtube.com/watch?v=XKJrHFRE1IE>, ab Minute 41:23).

Gerhard Roth (2006) sieht eine Autonomie höherer Lebensformen oder einen Zuwachs an Freiheitsgraden des Verhaltens gegenüber dem bloßen Reflex oder der unmittelbar reizinduzierten Reaktion evolutionär bedingt in der Entwicklung von *antizipativer Handlungssteuerung* und Selbstkontrollstrategien. Er bezeichnet diesen Zuwachs in seinem Buch „Das Gehirn und seine Freiheit“ zwar als immens, schreibt aber auch: „Dass wir Handlungen aufgrund einer mehr oder weniger rationalen Abwägung ihrer antizipierten Effekte im Lichte unserer kurz- und langfristigen Ziele und Wünsche auswählen, ändert nichts daran, dass unsere Handlungen und die ihnen vorausgehenden Antizipations- und Abwägungsprozesse vollständig kausal determiniert sind. Zielrepräsentationen oder Selbstkontrollstrategien sind keine spontanen Schöpfungen eines „Unverursachten Verursachers“, der durch keinerlei Vorbedingungen bestimmt ist, sondern sind das Ergebnis der komplexen Interaktion von genetischen Anlagen, Lernerfahrungen, aktuell verarbeiteter Reizinformation und dem momentanen Motivationszustand des Individuums. Tatsächlich verhält es sich umgekehrt: wären die

Ereignisse in der Welt (inklusive der Effekte, die unsere Handlungen in der Welt haben) nicht kausal determiniert, hätten sich weder die Fähigkeit zur Antizipation zukünftiger Handlungseffekte noch das zielgerichtete Handeln jemals entwickeln können. Insofern steht der Determinismus nicht im Widerspruch zum willentlichen Handeln, sondern ist eine Bedingung seiner Möglichkeit (Roth, 2006, S. 127, vergl. auch Dennett, 2003).“

Gerhard Roth setzt hier voraus, dass die Welt deterministisch ist. Er lässt jedoch außer Acht, dass der mechanistisch-kausale Determinismus auch als Arbeitshypothese verstanden werden kann, die erst eine Suche nach Gesetzmäßigkeiten in der Natur sinnvoll macht (Wissenschaftstheorie Galilei, Meyers Enzyklopädisches Lexikon, 1972, S. 483f). Man könnte sagen, der Determinismus stellt eine Methode zum Verstehen der Welt dar. Dass der Mensch eine Neigung dazu hat, seine Umwelt kausal verstehen zu wollen, beschreibt auch der Psychologe und Nobelpreisträger für Wirtschaft Daniel Kahnemann (2011, S. 100-103) in seinem Buch „Schnelles Denken, langsames Denken“ und führt hier Studien an, in denen bereits Säuglinge Ereignisse nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip beurteilten (Leslie und Keeble, 1987). Letzteres unterstützt das Konzept von Determinismus als Methode, im Gegensatz zur Annahme einer tatsächlich deterministischen Welt, die wir durch Beobachtung als solche erkannt haben. Kahnemann sieht neben der Neigung, kausal zu denken, aber auch das soziale Bedürfnis danach, Handelnde zu erkennen und ihnen Motive und Intentionen zuzuordnen. Gerhard Roth (2006) nennt dies „Alltagspsychologie“ (vergl. auch Fodor, 1987) und behauptet, dass, solange wir keine äußeren oder inneren Zwänge erkennen können, wir annehmen, mit dem Handelnden auch den Verantwortlichen vor uns zu haben (Roth, 2006, S. 147). Kahnemann vermutet, dass hier eine Tendenz, an den freien Willen zu glauben, begründet liegen kann (2011, S. 103), er würde aber im Zweifelsfall Ereignisse und Entscheidungen, im Gegensatz zu Roth, wohl eher dem Zufall zuschreiben und nicht der Determiniertheit aus vorherigen Zuständen.

Eine Verallgemeinerung von Determinismus (und damit auch seine Übertragung auf Anthropologie und Gesellschaftstheorie) ist ohnehin schwierig, wenn man die (in Meyers Lexikon, 1972, S. 483f genannten) Bedingungen für Determinismus allesamt erfüllt wissen will: dass eine wahrhaftige, objektiv existierende Außenwelt (*Realität*), ein objektiver Zugang der Menschen zu ihr und eine ideale, die Wirklichkeit erfassende und vermittelnde Sprache (*Realismus*) existieren (vergleiche Unzulänglichkeit der Begriffsdefinitionen, siehe oben). Überlegungen, die sich aus der Quantenmechanik ergeben, greifen hier. So kann, wenn ein Quantenobjekt eine physikalische Eigenschaft nicht mehr *hat oder nicht hat*, sondern sich die Eigenschaft erst durch die Messung manifestiert, die Wirklichkeit nicht mehr objektiv sein (sie verändert sich durch unsere Betrachtung) und die Sprache auch nicht sicher die Eigenschaft definieren (vergleiche auch Schrödingers Katze). Die Quantenmechanik legt hier einen gewissen Indeterminismus der Welt nahe.

Außerdem betonen jüngere philosophische Strömungen an dieser Stelle (in Bezug auf den objektiven Zugang des Menschen zur Außenwelt) auch wieder vermehrt die Rolle des Subjekts (Baschera, 2003; Prof. Dr. Dr. Manfred Frank im Interview in DIE ZEIT Nr. 36 vom 27.08.2009). Der französische Philosoph Jean-Luc

Marion unterscheidet etwa den Leib (*la chair*) vom Körper (*le corps*), und nur letzterer könne zum Objekt der Wissenschaft werden. Ersterer zeichnet sich dadurch aus, dass *ich* zu ihm einen priorisierten, unvergleichlichen Zugang habe. Er unterscheidet sich als „*mein Körper* von allen anderen Körpern dieser Welt dadurch, dass er fühlen und spüren kann, und vor allem dadurch, dass ich mich erst durch ihn hindurch selbst fühlen und spüren kann“ (Baschera, 2003, S. 53). Und obwohl der Leib mit wissenschaftlich-technischen Mitteln nicht fassbar ist und „nicht zu erscheinen mag, liegt er trotzdem allen meinen Wahrnehmungen zu Grunde“. Das heißt, nur, weil Subjektivität/ eine Leibese Erfahrung nicht naturwissenschaftlich fassbar ist, heißt es nicht, dass sie nicht existiert.

In Bezug auf die Neurowissenschaften und den freien Willen existiert im Übrigen bereits das durch einen britischen Mathematiker und einen amerikanischen Arzt entwickelte und nach ihnen benannte Penrose-Hameroff-Modell der Nervenzelle. Demnach bearbeite jede einzelne Zelle Informationen nicht in vollem Maße berechenbar, was freien Willen ermögliche. Quantenmechanischer Austragungsort seien die Mikrotubuli, die kontrahiert oder nicht-kontrahiert sein könnten, gelegentlich in ihrem Zustand aber auch unbestimmt seien. Erst durch objektive Reduktion (OR), welche sich an die Theorie eines Kollapses der Wellenfunktion von Materie (Kopenhagener Interpretation) anlehnt, manifestiere sich der Zustand. Kritik gibt es auch hier (u. a. durch Gerhard Roth). Und es ist unklar, ob quantenmechanische Überlegungen auf biologische Systeme zutreffen können, und ob zum Verständnis quantenmechanischer Zustände nur Variablen fehlen, deren Entdeckung die Welt wieder determinierter erscheinen lassen würden (frei nach Albert Einstein: „Gott würfelt nicht.“). Ebenso entspricht die Idee eines konsequent indeterministischen, unbedingten, von allem losgelösten freien Willens, der nach dem Zufallsprinzip Entscheidungen trifft und den sogenannten „Libertariern“ (Belsham, 1789) zugeschrieben wird, auch nicht unserer menschlichen Erfahrung. So erleben wir doch auch Abhängigkeiten und fühlen uns, wenn auch nicht gebunden, doch zumindest verbunden. Ob die Antwort wohl irgendwo dort zwischen liegt? Es zeigt sich, dass die Frage nach der Willensfreiheit vor allem erst einmal verstanden werden will. Jede Argumentationskette und jede Perspektive auf das Thema Willensfreiheit birgt ihre eigenen Kontroversen. Voreilig zu glauben, eine umfassende Antwort gefunden zu haben, erscheint naiv. Aktuell ist die Frage nach der Willensfreiheit wohl eher unbeantwortet als beantwortet.

1.4 Hypothesen und Fragestellungen

Wenn auch das BP vorerst nicht mehr uneingeschränkt als Gegenbeweis gegen die Existenz des freien Willens gelten kann, so bleibt das BP ein spannendes Forschungsobjekt mit vielen ungeklärten Facetten. In den Debatten über die Beziehung von Gehirn und Bewusstsein und die menschliche Willensfreiheit, und auch in dem Experiment von Schultze-Kraft et al., lautet die zentrale Frage, ob das BP der bewussten Bewegungsentscheidung vorangeht und inwieweit bewusste Modulation möglich ist (Libet, 1985; Deecke und Kornhuber, 2003; Navon, 2014; Deecke und Soekadar, 2016; Schultze-Kraft et al., 2016). Diese Fragestellung beruht auf der Annahme eines kausalen Zeitpfeils, welcher unseren Alltag sehr gut zu erklären

vermag und hier zum Prüfmittel für Ursache-Wirkung-Beziehungen wird. Dabei steht und fällt die Existenz des freien Willens ebenso mit der Beantwortung der Frage, ob es sich bei dem Prozess hinter dem BP wirklich um Bewegungsvorbereitung oder Entscheidungsfindung handelt oder nicht um etwas ganz Anderes. Zweifelsohne wirkt diese funktionelle Zuordnung eindeutig und folgerichtig, wo doch die Versuchsteilnehmer im Experiment eine immer gleiche Bewegung wiederholen sollen, während nichts Weiteres zu passieren scheint. Die Verknüpfung von BP und Bewegungsvorbereitung wurde daher auch bislang nicht ernsthaft angezweifelt. Führt man sich die Versuchsbedingungen jedoch noch einmal genau vor Augen, fällt auf: Da eine weitestgehend freiwillige Handlung untersucht werden soll, wird den Versuchspersonen zugestanden, den Zeitpunkt der Bewegung selbst zu bestimmen. Das Vermeiden, eine Zeitvorgabe zu machen, um hier Freiheit zu gewährleisten, ist aber nicht gleichzusetzen mit der Abwesenheit jeglicher zeitlicher Vorgaben. Diese Vorgaben verbergen sich zum einen hinter dem Hinweis an die Probanden, die Bewegungen nicht zu schnell aufeinander folgen zu lassen und z. B. mindestens 3 s (Shibasaki et al., 1980; Wessel et al., 1994) bis hin zu sogar 15 s (Kornhuber und Deecke, 1965) zwischen zwei Bewegungen verstreichen zu lassen, damit die zu analysierende Epoche frei von Aktivität durch vorherige Bewegungen ist und das BP gut dargestellt werden kann. Zum anderen steckt auch hinter der explizit oder implizit ausgesprochenen Erwartungshaltung, dass das Experiment nach einiger Zeit beendet sein soll, sprich, dass die Probanden nicht ewig viel Zeit zwischen zwei Bewegungen verstreichen lassen sollen, eine Zeitvorgabe.

So lässt sich schlussfolgern, dass – mit wenigen Ausnahmen – die Versuchsteilnehmer eines BP-Experiments ihre Bewegungen sehr wahrscheinlich in Zeiträumen durchführten, die an die Zeitvorgaben angepasst waren. Bei Kornhuber und Deecke (1965) mögen dies etwa grobe Zeiträume von 20 – 40 s gewesen sein (das heißt, die vorgegebenen 15 s Mindestzeitabstand klar überschreitend, aber nicht endlos abwartend). Oder bei Shibasaki und Hallett (2006) Intervalle von 5 – 15 s, was einer Bewegung „once every 5 s or longer“ entsprechen würde und so in ihrem Übersichtsartikel als Beschreibung der Bewegungsplatzierung zu lesen ist (S. 2342). Leider wurden die tatsächlichen Intervalle zwischen Bewegungen kaum gemessen oder veröffentlicht. Hier sind insbesondere die klassischen BP-Studien gemeint, in denen keinerlei externe Orientierung zurzeit gegeben wurde, im Gegensatz zu den Experimenten etwa von Libet et al.

Bei der Umsetzung der Versuchsanweisung, eine gleichförmige Bewegung in einem grob abgesteckten zeitlichen Rahmen vielfach zu wiederholen, erscheint es plausibel, dass die Probanden beginnen, sich an einer inneren, vagen, rhythmischen Aktivität zu orientieren, vergleichbar mit einer inneren Uhr. Diese Aktivität könnte periodisch eingeleitet werden und sich zeitabhängig steigern, bis ein subjektiver Schwellenwert überschritten wird, was dann für die Versuchspersonen einen optionalen Anreiz für den Bewegungsbeginn darstellen kann. Das BP könnte eben diese periodische Aktivität widerspiegeln bzw. die letzte Negativierung vor der Bewegung darstellen. Tatsächlich sind beobachtete Zusammenhänge zwischen sowohl SMA als auch pre-SMA (Ursprungsgebieten des BP) und Zeitschätzung in fMRT-Studien keine Neuheit (Schubotz et al., 2000; Coull et al. 2004, 2015) und blieben auch in frühen BP-Studien über den Bezug der (pre-)SMA zum BP nicht unerwähnt (Deecke et al. 1985). Weiterhin gibt es über die Bedeutung der SMA-Neurone für die

Zeitschätzung einige beeindruckende Studien an Affen, zuletzt beispielsweise von Merchant et al. (2011, 2015), in welchen die Affen einen regelmäßigen Takt mit Intervallen von ≤ 1 s einhalten mussten. Die Intervalle waren in dieser Studie deutlich kürzer als die für ein BP-Experiment typischen Bewegungsabstände, ganz abgesehen von der Tatsache, dass die Intervalle strikt gleich lang, die Bewegungen also rhythmisch sein sollten. Ein Vergleich ist daher schwierig. Den BP-Experimenten ähnlicher ist dagegen eine Studie von Lebedev et al. (2008), in welcher Affen einen Knopf für eine Dauer zwischen 2,5 und 4,5 s gedrückt halten sollten bevor sie ihn losließen. Dieses variable Intervall vor dem Akt des Loslassens mag bei Lebedevs Affen durch innere Prozesse zeitlich ähnlich grob definiert worden sein wie ein Intervall zwischen zwei Bewegungen in einem BP-Experiment. Die Nähe zwischen Lebedevs Experiment und einem BP-Experiment zeigte sich auch im gemessenen zeitlichen Verlauf der neuronalen Aktivität im Prämotor- und Motorkortex der Affen, welcher Ähnlichkeit mit dem Verlauf eines typischen BP aufwies.

Interessant ist, dass in einer Studie mit menschlichen Versuchsteilnehmern bereits eine vergrößerte Amplitude des BP festgestellt werden konnte, wenn für die Bewegungen explizite Zeitvorgaben gegeben wurden (Baker et al., 2012). Relevant für das Thema ist in jedem Fall auch, dass die kontingente negative Variation (contingent negative variation, CNV) als mit zeitlicher Koordinierung zusammenhängend gilt. Wenn man annimmt, dass das BP und die CNV eine gewisse gemeinsame Aktivität teilen (siehe Kapitel 1.1; van Boxtel und Brunia, 1994; Cui et al., 2000a; Verleger et al., 2000), könnte es sich bei dieser Aktivität, wie gemeinhin angenommen, um Bewegungsvorbereitung handeln, alternativ jedoch auch um mit zeitlicher Planung verbundene Prozesse, wie Zeitschätzung (Casini und Vidal, 2011) oder zeitbezogene Erwartungshaltung (van Rijn et al. 2011). Vor dem Hintergrund, dass als verursachende Gehirnareale dieser gemeinsamen Aktivität im Allgemeinen die SMA genannt wird (Cui et al., 2000 a, b), lässt sich letztere Annahme gut mit dem vermuteten Zusammenhang zwischen der SMA und Zeitschätzung (Schubotz et al., 2000; Coull et al. 2004. 2015) sowie den Studien, die explizit die späte CNV mit zeitlicher Prozessierung in Verbindung bringen (Macar et al., 1999; Trillenberget al., 2000; Mento et al., 2015; Faugeras und Naccache, 2016) zu einem stimmigen Gesamtbild zusammenfügen.

Für die Hypothesenbildung in dieser Arbeit ist die Beobachtung wichtig, dass der BP-Beginn von Studie zu Studie oder von Proband zu Proband variiert (wohingegen sich die BP-Aufzeichnungen eines einzelnen Probanden sichtbar ähneln (z. B. Deecke et al., 1976). Die Angaben bezüglich des BP-Beginns liegen so etwa bei 0,5 s (Libet et al. 1982, 1983), 1 s (Kornhuber und Deecke, 1965) oder 2,5 s (Haggard und Eimer, 1999, Jo et al. 2014, Rigoni et al., 2011) vor der Bewegung, sodass sich die Frage stellt, worin eine derartige Variation begründet sein kann. Aus alltäglichen Erfahrungen lässt sich außerdem die Frage ableiten, warum Probanden länger als 1 s brauchen sollten, um sich auf eine simple Bewegung vorzubereiten.

Oftmals liegt der Anstieg des BP-Kurvenverlaufs gleich zu Anfang des untersuchten und dargestellten zeitlichen Abschnitts, sodass sich weiterhin die Frage aufdrängt, ob das gewählte Zeitfenster wirklich den gesamten BP-Verlauf erfasst hat und falls nicht, wo tatsächlich der BP-Beginn zu verorten ist.

So kann dann weiter gefragt werden, ob für den BP-Beginn überhaupt ein Zeitpunkt definiert werden kann oder ob das BP vielmehr einen Teil einer länger andauernden wellenförmigen Aktivität darstellt (Schurger et al., 2012; Jo et al., 2013). Libet et al. (1982, 1983) unterschieden vor dem Hintergrund dieses Problems mehrere BP-Typen voneinander, wobei der häufigere „Typ 1“ ein BP ohne klar definierten Beginn repräsentierte.

Falls das BP also tatsächlich nur Bewegungsvorbereitung widerspiegeln sollte, und die Bewegung eine simple, gleichförmige, sich wiederholende Bewegung ist, bleibt es nach diesen Überlegungen noch schwerer zu begreifen, warum dieser Prozess in vielen Fällen mehr als 2 s vor der Bewegung beginnt.

Um nun die Effekte der zeitlichen Vorgaben während eines BP-Experiments auf das BP zu untersuchen, wurden die implizit bereits in bisherigen BP-Experimenten vorhandenen zeitlichen Einschränkungen in dieser Studie explizit gestellt und variiert. Genauer gesagt wurde den Versuchsteilnehmern in Experiment 1 die Anweisung gegeben, mit der rechten Hand die Taste einer Computermaus zu einem selbst gewählten Zeitpunkt zu drücken, mit selbst gewählten Zeitintervallen zwischen jeweils zwei Bewegungen, die einen festgelegten Mindestzeitabstand nicht unterschreiten sollten. Dieser Mindestzeitabstand variierte von Versuchsblock zu Versuchsblock von 1 s bis 5 s (genauer: 1 s, 2 s, 3 s, und 5 s). Falls das BP Hirnprozesse widerspiegelt, die nötig sind, um eine spontane Bewegung durchzuführen, sollte das BP von dieser Variation zeitlicher Abstände unbeeinflusst bleiben und konstant an einem Zeitpunkt mit gleichbleibendem Abstand zu den Bewegungen beginnen. Sollten dem BP jedoch Prozesse zugrunde liegen, die durch den Versuchsteilnehmer implementiert werden, um den zeitlichen Vorgaben des BP-Experiments gerecht zu werden, würde das BP in seiner Form eine Abhängigkeit zu diesen zeitlichen Parametern zeigen und mit größer werdenden Mindestzeitabständen früher beginnen und in der Breite zunehmen.

Diese Voraussagen über das Verhalten des BP-Beginns können einmal klassisch in definierten Zeitabschnitten vor der Bewegung untersucht werden; also vom Zeitpunkt der Bewegung bei $t = 0$ ms aus rückblickend auf die vorher gemessene elektrische Aktivität im EEG. Die Überlegungen können aber auch in Zeitabschnitten nach der Bewegung, also von $t = 0$ ms an vorwärtsschauend überprüft werden. Hier würde auf den Verlauf der neu einsetzenden BPs, welche bereits zur nächsten Bewegung gehören, geachtet werden.

Die EEG-Daten von der Bewegung an vorwärts zu betrachten entspräche einer neuen Art der Darstellung von BPs und erfordert ein gewisses Umdenken. Falls die Annahme, dass das BP eine langsame, wellenförmig-rhythmische Aktivierung zur Umsetzung der zeitlichen Vorgaben widerspiegelt, zutrifft, müsste sich in dieser Darstellung so gesehen Folgendes zeigen: die BPs sollten mit einem konstanten Zeitabstand nach der vorherigen Bewegung einsetzen, unabhängig von den geforderten Mindestzeitabständen, und nach ungefähr 1 s in allen Fällen eine gleich große Amplitude erreicht haben (bevor dann in den Versuchsblöcken mit dem kleinsten geforderten Mindestzeitabstand von 1 s Länge die nächste Bewegung einsetzt). Falls das BP jedoch Hirnaktivität abbildet, die eine spontane Bewegung ermöglicht, sollte der erneute BP-Beginn sich abhängig

zeigen von den angegebenen Mindestzeitabständen, das heißt, das BP sollte später nach einer Bewegung einsetzen, wenn die nächste Bewegung durch das größere Intervall erst später erfolgt.

Es wurden weitere Hypothesen formuliert, um die Annahme, das BP spiegele innere Prozesse wider, die zur Umsetzung der zeitlichen Vorgaben notwendig seien, zu untersuchen. So sollten diese dem BP zugrundeliegenden inneren Prozesse zur Zeiteinteilung/Zeitschätzung weniger benötigt werden, wenn eine anders geartete zeitliche Orientierung gewährt wird. Als Ausdruck dessen sollte die Amplitude des BP unter einer solchen Bedingung niedriger werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint zunächst die Überprüfung, ob das Zählen der Sekunden während eines BP-Experiments Auswirkungen auf das BP hat, interessant. In BP-Experimenten ist es offenbar gängige Praxis, die Versuchsteilnehmer anzuweisen, das Mitzählen der Sekunden zu unterlassen (explizit genannt z. B. in den Arbeiten von Matsushashi und Hallett, 2008; Misirlisoy und Haggard, 2014), vermutlich aus dem Gedanken heraus, dass das Mitzählen der Sekunden im Geiste eine autonome, freiwillige Entscheidung, sich zu bewegen, verhindere. Eine Studie, die die Effekte dieser Handlungsanweisungen auf das BP zuvor untersucht hat, scheint es bislang nicht zu geben. So wurden die Teilnehmer des ersten Experiments dieser Arbeit gebeten, in einer Hälfte der Versuchsdurchgänge in Gedanken die Sekunden mitzuzählen, um den geforderten Mindestzeitabstand einzuhalten, in der anderen Hälfte, das Mitzählen der Sekunden ausdrücklich zu unterlassen.

Wir unternahmen diesen Versuch in der Annahme, dass sich die Amplitude beim Mitzählen der Sekunden verringern würde, da durch bewusste innerliche zeitliche Strukturierung möglicherweise andere Mechanismen als die dem BP zugrundeliegenden inneren Prozesse die Aufgabe der Zeiteinteilung übernehmen.

In Experiment 2 wurde von außen Hilfestellung zur zeitlichen Orientierung gegeben, indem in einem Drittel der Durchgänge eine stetig mit zweimaligem Ticken pro Sekunde zu hörende Uhr eingespielt wurde. Erneut vermuteten wir, dass die BP-Amplitude unter nun äußerlicher Zeitstrukturierung abnehmen würde, da innere Zeitschätzung weniger notwendig wäre, und verglichen sie mit der BP-Amplitude aus dem Drittel der Versuchsdurchgänge ohne jegliche zeitliche Strukturierung von außen. Weiterhin wurde über Lautsprecher in einem weiteren Drittel des Experiments 2 eine irregulär, mit wechselnden Abständen tickende Uhr eingespielt, deren Tick-Abstand sich nach jeder Bewegung änderte. Hier vermuteten wir, dass das BP in seiner Amplitude zunehmen würde, da die innere Zeitschätzung verstärkt aktiviert werden müsste, um die externen, störenden Faktoren zu überlagern.

2. Material und Methoden

2.1 Experiment 1

2.1.1 Versuchspersonen

Für Experiment 1 wurden 25 gesunde Freiwillige rekrutiert. Sie erhielten vor Versuchsbeginn einen Aufklärungsbogen, eine deutsche Fassung des Edinburgh Handedness Inventory und unterzeichneten eine Einwilligungserklärung (s. Anhang). Aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurde eine Aufwandsentschädigung von 8€ pro Stunde gezahlt. Eine Genehmigung durch die Lübecker Ethikkommission lag vor. Die Teilnehmer wurden aus der Lübecker Umgebung, aus dem Umfeld der Universität und der Fachhochschule angeworben und waren ausschließlich Studenten. Über die den Experimenten zugrundeliegenden Hypothesen wurden die Versuchsteilnehmer nach Beendigung des Experiments informiert. Es wurde angeboten, die Teilnehmer wegen der Ergebnisse und etwaiger Veröffentlichungen zu kontaktieren. Voraussetzung für die Teilnahme waren Volljährigkeit und gesundheitliches Wohlbefinden am Versuchstag. Ausschlusskriterien waren eine vorangegangene Nachtschicht, bekannte neurologische oder psychiatrische Erkrankungen und die Einnahme zentral wirksamer Substanzen. Die Versuchspersonen sollten nicht älter als 35 Jahre sein. Die Teilnehmer wurden angehalten, vor dem Versuchstermin kein Haargel oder -spray zu benutzen und bei Sehschwäche ihre Brille mitzubringen. Alle Probanden wiesen so eine normale oder korrigierte Sehfähigkeit vor.

Die Daten von 9 der 25 Versuchsteilnehmer mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Bei fünf von ihnen geschah dies aufgrund der Artefaktlast im EEG (s. *Kapitel 2.1.6 Verarbeitung der EEG-Daten*), bei vier wegen Auffälligkeiten des Verhaltens im Zuge des Experiments oder Abweichungen von der Aufgabenstellung (s. *Kapitel 2.1.7 Analyse des Verhaltens*). Die verbliebenen 16 Versuchsteilnehmer waren zwischen 22 und 32 Jahre alt (Mittelwert \bar{x} = 25 Jahre, Standardabweichung, engl. standard deviation, SD = 3). Es nahmen 8 Frauen und 8 Männer teil. 15 waren laut Selbsteinschätzung im Edinburgh Handedness Inventory rechtshändig, ein Versuchsteilnehmer ambidexter (20 bis 100 Prozentpunkte, \bar{x} = 76 %).

2.1.2 Versuchsaufbau

Die Versuchsteilnehmer saßen bequem auf einem mit Armlehnen und einer ausschwenkbaren Ablage versehenen Polstersessel. Mit Hilfe zweier Kästen wurden die Füße, wenn erforderlich, auf eine komfortable Höhe gebracht. Die für den Versuch benötigte Computermaus wurde auf der Ablage in für die Versuchsperson angenehmer Reichweite platziert. In ca. 1,20 m Entfernung zu dem sitzenden Probanden wurde ein 17-Zoll-Röhrenbildschirm aufgestellt und mittig zum Gesichtsfeld ausgerichtet. Ein Röhrenbildschirm fand in diesem Labor gegenüber einem LED-Bildschirm bevorzugte Verwendung, da mit einer Bildwiederholfrequenz von 100 Hz gegenüber den Standard-LED-Bildschirmen mit 60 Hz das rasche Einblenden von Zeichen oder Bildern in anderen Versuchen besser möglich war. Eine Grafikkarte vom Typ

Radeon X1650 Series (ATI Technologies Inc., PCI Express, 256 MB) fand Verwendung. Die Bildschirm-Auflösung betrug 768 x 512. Über den Monitor wurde die Versuchsperson anhand der Software Presentation (Version 17.0) durch das Experiment geführt. Auf dem Kopf der Probanden wurde eine vorgefertigte EEG-Haube befestigt, in deren Halterungen die EEG-Elektroden platziert wurden. Mit diesen wurde kontinuierlich ein EEG aufgezeichnet. Auf einem Tisch hinter den Probanden standen zwei Verstärker mit ihrem Akku. Die gemessenen, verstärkten und digital übermittelten neuronalen Potentialdifferenzen konnten in Echtzeit im Nachbarraum begutachtet werden. Hier standen die Computer zur Überwachung und Aufzeichnung des Experiments. Für letzteres wurde das Programm BrainVisionRecorder (Version 1.20, www.brainproducts.de) verwendet. Die Tür zu dem etwa 15 m² großen Versuchsraum wurde vor Versuchsbeginn geschlossen. Der Versuchsraum wurde abgedunkelt und Geräusche im und um den Versuchsraum minimiert. Die Verwendung eines Zweiraumlabor erleichterte dabei die ungestörte Versuchsdurchführung. Handys und andere elektronische Geräte wurden aus dem Versuchsraum entfernt.

2.1.3 Versuchsdurchführung

Eine standardisierte Versuchsanweisung wurde verwendet, um die Probanden über den Ablauf des BP-Experiments zu informieren (s. Anhang). Der Versuch bestand aus acht Blöcken, die sich in 2 x 4 verschiedene Versuchsbedingungen gliederten. Die Probanden wurden angehalten, ihren Blick während der acht Messblöcke durchgehend auf ein mittig auf dem Monitor abgebildetes, kleines, schwarzes Fixierkreuz vor hellgrauem Hintergrund zu halten. Sie wurden dazu aufgefordert, während der Messung möglichst ruhig zu sitzen und ausschließlich die im Experiment geforderte Bewegung des rechten Zeigefingers durchzuführen. Diese Bewegung resultierte im Klicken der linken Taste einer Computermaus. Aufgabe war, den Mausklick 50 Mal pro Block durchzuführen; 3 weitere Tastendrucke zu Beginn jedes Blocks dienten der Übung und Einstellung auf die wechselnden Versuchsbedingungen. Der Zeitpunkt des Mausklicks sollte – bis auf eine Einschränkung – frei gewählt werden. Die Einschränkung bestand in dem Einhalten eines Mindestzeitabstandes zwischen zwei Mausklicks, der entweder 1, 2, 3 oder 5 Sekunden betrug. Der Mindestzeitabstand war von Block zu Block verschieden und wurde über eine visuelle Instruktion auf dem Monitor und eine mündliche Ansage vor jedem Block von neuem mitgeteilt. Eine Begrenzung der Zeitabstände nach oben wurde nicht mitgeteilt, um mit einem großen Freiraum in der Wahl des Zeitpunktes für die Bewegungsinitiation möglichst nah an den Versuchsbedingungen eines klassischen BP-Experiments zu bleiben. Das Blinzeln der Augen wurde in der Versuchseinweisung nicht angesprochen (Verleger, 1991; Weerts und Lang, 1973). Als Feedback für den Probanden änderte das Fixierkreuz nach jedem erfolgreichen Mausklick seine Farbe von Schwarz in Ultramarinblau. Der Farbwechsel setzte 100 ms nach der Bewegung ein und dauerte 100 ms an. Die Versuchsteilnehmer wurden darauf hingewiesen, dass bei Unterschreiten des geforderten Mindestzeitabstandes eine Fehlermeldung auf dem Monitor erscheinen würde. Zu lesen war „Zu früh gedrückt!“ in großen, roten Buchstaben (Helvetica, 30 pt.). Die Meldung wurde nach 4 s wieder ausgeblendet. Die Probanden wurden aufgefordert, nach dem Ausblenden dieser Fehlermeldung erneut für

die Dauer des vorgegebenen Mindestzeitabstands oder länger zu warten und erst dann mit der nächsten Fingerbewegung durch Klicken der linken Maustaste fortzufahren.

Die acht Versuchsblöcke einer Sitzung verteilen sich auf zwei Versuchshälften: in der einen Hälfte sollten die Probanden in Gedanken die verstrichenen Sekunden mitzählen, um so den geforderten Mindestzeitabstand einzuhalten, in der anderen Hälfte sollten sie das Mitzählen ausdrücklich unterlassen. Je eine Hälfte bestand aus vier Blöcken, die sich wie oben beschrieben in ihren Mindestzeitabständen unterschieden, welche 1 s, 2 s, 3 s oder 5 s betragen. Die Hälfte der Versuchsteilnehmer begannen mit den Blöcken, in denen das Mitzählen der Sekunden gefordert war, die andere begann mit dem Nicht-Zählen, und innerhalb jeder dieser Gruppen wurden die Mindestzeitabstände je zur Hälfte in entweder aufsteigender (1, 2, 3, 5 s) oder absteigender (5, 3, 2, 1 s) Anordnung präsentiert. So war die Abfolge der Bedingungen über die 16 Probanden ausbalanciert, um eine systematische Verzerrung durch Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Die gesamte Messung dauerte je nach Schnelligkeit des Probanden zwischen 40 und 80 min. Das Anbringen der Elektroden und Optimieren des EEG-Signals vor der Messung dauerte etwa 40 min. Zwischen den acht Messblöcken gab es Pausen, in denen das Ändern der Sitzposition, das Durchbewegen der Muskulatur sowie eine kurze Trinkpause möglich waren. Die Pause wurde in Absprache mit dem Probanden beendet und der nächste Messblock durch die Versuchsleiterin gestartet. Um die Mausclicks zu registrieren, auf dem Bildschirm das Fixationskreuz und die Meldungen einzublenden und Ereigniscodes an einen zweiten Computer, der das EEG aufzeichnete, zu schicken, wurde das Programm Presentation (Version 17.0) verwendet.



Foto 1: Versuchsteilnehmerin mit Ansicht von hinten im Versuchsraum. Zwei Verstärker mit Akku, Elektrodenkabel, Haube, Monitor.



Foto 2 und 3: Probandin seitlich und von vorne im Versuchsraum. Gesichtselektroden. (Einwilligung zur Verwendung der Fotografien liegt vor, s. Anhang)

2.1.4 Fragebogen

Mit Beenden der Sitzung wurde jedem Versuchsteilnehmer ein Fragebogen ausgehändigt (s. *Anhang*). Darin enthalten waren Fragen zur Machbarkeit der Aufgabe und ob die Zeitschätzung bei einer der beiden Bedingungen (Zählen oder Nicht-Mitzählen der Sekunden) schwerer fiel. Die Probanden gaben an, zu wieviel Prozent sie einerseits in der Lage waren, durchgehend während einer Messung gedanklich mitzuzählen, und andererseits, zu wieviel Prozent sie das Mitzählen vermeiden konnten. Außerdem wurden im Freitext Strategien genannt, die die Probanden angewandt hatten, um das Mitzählen der Sekunden zu unterlassen. Die Antworten der 16 Probanden wurden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS statistics (Version 22) ausgewertet.

2.1.5 EEG

Das EEG wurde unter Verwendung von 60 Ag/AgCl Ringelektroden aufgezeichnet. Der Kopfumfang der Versuchsperson wurde gemessen und eine entsprechende Haube herausgesucht (Elektroden und Haube: Easycap GmbH, Steingrabenstraße 14, DE-82211 Herrsching, www.easycap.de). Durch Bestimmung des Schnittpunktes der Verbindungslinien zwischen Nasion und Inion und rechtem und linkem Ohr konnte die zentrale Position der Elektrode Cz bestimmt werden. Ausgehend von dieser wurden die Elektroden in festgelegter, relativer Anordnung entsprechend dem internationalen 10-20-System nach Jasper in den Plastikhalterungen der Haube befestigt (Jasper, 1958). Auf der Kopfoberfläche befanden sich so acht Mittellinienelektroden (AFz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz und Oz) und in symmetrischer Verteilung jeweils 26 Elektroden auf der rechten und der linken Schädelhälfte. Die genaue Anordnung ist der Abbildung 3 zu entnehmen. Eine Elektrode an der Position Fpz diente als Erdungselektrode (Ground), eine Elektrode auf der Nasenspitze als Offline-Referenz-Elektrode. Die Online-Referenz-Elektrode befand sich an Position Fz.

Kopfhaut und Haare unterhalb der Elektroden konnten mit einem in 80-prozentigen Ethanol getränkten Wattestäbchen durch die ringförmigen Elektroden hindurch erreicht und in kreisenden Bewegungen gereinigt und entfettet werden. Eine 10 ml Spritze erleichterte die Applikation von sandhaltiger Elektrolytpaste in den Zwischenraum zwischen Elektrode und Kopfhaut (abrasives Elektrodengel, NaCl, Lapis Pumicis, Traganth, Glycerin, Kal. Hydrogentart. Phenol. Liqu. 0,2 % in wässr. Lsg., Theodor-Körner-Apotheke, Graz). Dieses Verfahren fand Anwendung nach Bauer et al. (1989). Unter Zugabe der Elektrolytpaste und Drehen mit einem Wattestäbchen wurde die Impedanz aller Elektroden gleichmäßig auf $< 5 \text{ k}\Omega$ gesenkt (die Referenz- und Erdungselektrode $< 1 \text{ k}\Omega$). Das Einhalten einer Wartezeit von 10 min zwischen Anbringen der Elektroden und Start des Experiments (ausgenommen bei den Versuchspersonen 2 und 3) wurde nachträglich eingeführt, mit der Erwartung, dass sich mit der Zeit ein elektrochemisches Gleichgewicht einstellen würde und die Artefaktlast durch langsames Abdriften der Elektrodenpotentiale, welches in der Regel nicht kortikalen Ursprungs ist, sondern u. a. durch Veränderungen im elektrochemischen System zwischen Kopfhaut,

Elektrodengel und Ableitelektrode beispielsweise durch Schwitzen zurückzuführen ist (Seifert, 2003), gesenkt werden konnte.

Um Augenartefakte kontrollieren und herausrechnen zu können, wurde parallel ein Elektrookulogramm (EOG) aufgezeichnet, zum einen in vertikaler Ausrichtung (vEOG) mit Elektroden oberhalb und unterhalb des rechten Auges, und zum anderen horizontal (hEOG) mit Elektroden lateral je des rechten und linken äußeren Augenwinkels. Vor Anbringen der Gesichtselektroden wurde die Gesichtshautareale vorsichtig mit einem in 80-prozentigem Alkohol getränkten Tupfer gereinigt und entfettet. Eine dünne Schicht konduktiven und abrasiven Elektrodengels (Spes Medica s. r. l., Battipaglia, Italien) wurde mit einem Tupfer flächig auf der Haut verteilt und behutsam einmassiert. Der Zwischenraum zwischen Haut und Elektrode wurde mit der oben beschriebenen abrasiven Elektrolytpaste aufgefüllt. Die Versuchspersonen sollten wie in dem Versuch die Monitormitte fixieren, damit die Elektroden in Höhe der Pupillen platziert werden konnten. Die Elektroden wurden mit einem Klebestreifen befestigt.

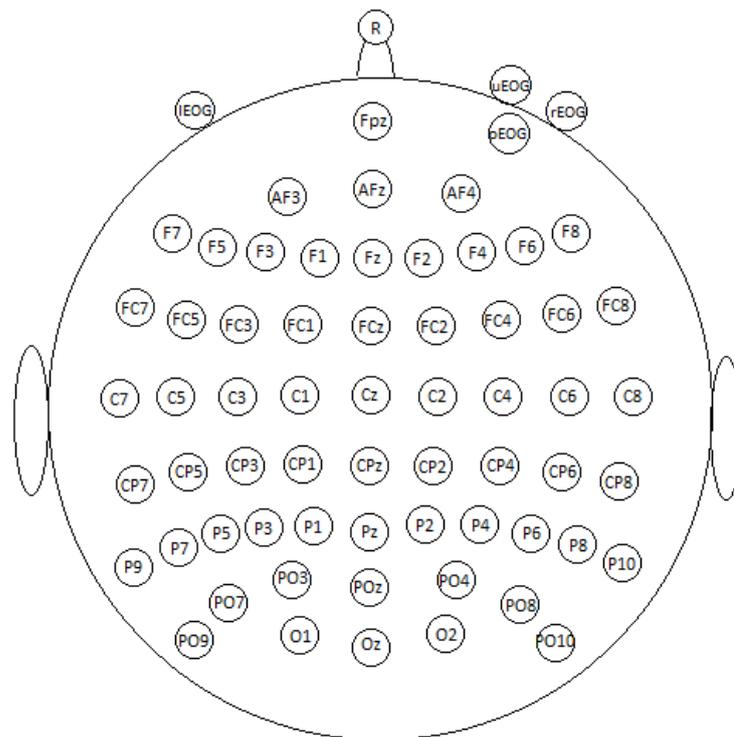


Abbildung 2 Position der EEG-Elektroden. Kopfansicht von oben, mit Cz im Zentrum, den Ohren am Außenrand und der Nase nach vorne zeigend.
R = Referenzelektrode, uEOG = Elektrode unterhalb des rechten Auges,
oEOG = Elektrode oberhalb des rechten Auges, rEOG = Elektrode rechtslateral des rechten Auges,
lEOG = linkslateral des linken Auges, uEOG und oEOG ergaben das vertikale EOG (vEOG), rEOG und lEOG das horizontale EOG (hEOG). Erdung: Fpz; Offline-Referenz: Nasenspitze; Online-Referenz: Fz.

2.1.6 Verarbeitung der EEG-Daten

Die Aufzeichnung des EEG erfolgte mittels der Software BrainVision Recorder (Version 1.202). Die gemessenen Signale wurden mit einem BrainAmp MR plus-Verstärker (Brain Products, Gilching, Deutschland, www.brainproducts.com) im Gleichspannungsbereich (engl. direct current, DC) mit einer Bandbreite von 0 bis 1000 Hz verstärkt und mit einer 500 Hz Abtastrate je Kanal zu 16-bit-Ziffern digitalisiert. Die Daten wurden auf einer Festplatte gespeichert. Die weitere offline-Verarbeitung der EEG-Daten wurde mithilfe der Software BrainVision Analyzer (Version 2.12, Brain Products GmbH, München) durchgeführt. Hier erhielten die EEG-Daten die Elektrode an der Nasenspitze als neuen offline-Referenzpunkt (Kornhuber und Deecke, 1965; Haggard und Eimer, 1999).

Ein Tiefpassfilter bei 8 Hz wurde angewandt. Um etwaige Veränderungen im BP-Kurvenverlauf in Abhängigkeit vom Mindestzeitabstand abbilden und später analysieren zu können, wurden die EEG-Daten in angemessene Zeitabschnitte unterteilt. Die Segmentierung erfolgte bewegungsgekoppelt, oder, genauer gesagt, die EEG-Daten wurden ausgehend von der Fingerbewegung (Mausklick) bei $t = 0$ s in zweierlei Weise in Epochen (aut Segmente) aufgeteilt. Sie begannen entweder vor der Bewegung, den zugehörigen Anstieg des BP mitverfolgend, wie in BP-Studien allgemein üblich (Kornhuber und Deecke, 1965; Haggard und Eimer, 1999) oder nach dieser, den Neubeginn des nächsten BP nach der Bewegung abbildend. Für die Epochen, die den Abschnitt vor der Bewegung betrachteten, wurden die EEG-Daten im Zeitfenster 5 s vor dem Mausclick bis 1 s nach dem Mausclick verwendet. Für die Bedingung mit einem Mindestzeitabstand von 5 s wurde das Zeitfenster auf 7 s vor dem Mausclick erweitert. Die gängige Praxis in bisherigen Studien sieht häufig kürzere Epochen vor (Epochenbeginn 1,5 s vor der Bewegung bei Libet et al., 1982, 1983; 2,5 s vor der Bewegung bei Haggard und Eimer, 1999 und Jo et al., 2014; 3 s vor der Bewegung bei Kornhuber und Deecke, 1965). In diesen Arbeiten befindet sich der BP-Beginn oft gleich zu Anfang der dargestellten Zeitfenster, sodass der Eindruck entsteht, dass möglicherweise nicht der gesamte Verlauf des Anstiegs miterfasst wurde. Für diese Arbeit fiel daher die Entscheidung zugunsten größerer Zeitfenster aus.

Für die Epoche mit Fokus auf die Entwicklung der Potentialdifferenz nach einer Bewegung wurden die EEG-Daten vom Mausclick an bis 2,5 s nach dem Mausclick verwertet. Ein größeres Zeitfenster war in diesem Fall nicht notwendig, da hier vor allem das erneute Einsetzen des BP interessierte.

Um die so erhaltenen Segmente auf ihre Verwertbarkeit zu überprüfen, wurden Kriterien zur Artefaktidentifizierung festgelegt. Alle Elektrodenableitungen eines Zeitabschnitts wurden mithilfe des BrainVision Analyzer daraufhin überprüft. Fiel auch nur eine Ableitung in einer Epoche unter die Artefaktkriterien, wurde die Epoche von der Auswertung ausgeschlossen. Als Ursachen für Artefakte wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Quellen angenommen.

Biologisch	Muskelaktivität, EKG, Pulswellen, Lidbewegungen, Bulbusbewegungen, Schwitzen, Atembewegungen, Körperbewegungen
Exogen	schlechter Elektrodensitz, defektes Elektrodenkabel, ungleiche Elektroden, Kriechströme, elektrostatische & elektromagnetische Induktion, Störungen im Verstärker, schlechte Erdung, Zahnprothesen und andere metallische Gegenstände in der Nähe des Kopfes

Tabelle 1: Übersicht Artefaktquellen, aus Seifert (2003), S. 13.

Als Grobes Artefakt galt eine Differenz $> 250 \mu\text{V}$ zwischen Potentialdifferenzminimum und Potentialdifferenzmaximum einer Epoche. Lag zwischen aufeinanderfolgenden Datenpunkten ein Sprung in der Potentialdifferenz $> 50 \mu\text{V}$, war auch dies Grund zur Ablehnung des Segments. Von diesem Kriterium ausgeschlossen waren die 4 Augenelektroden uEOG, oEOG, rEOG und lEOG sowie die augennahen Kopfelektroden AF3, AFz und AF4. Hier ist das Auftreten solcher Sprünge in der Potentialdifferenz durch Lidbewegungen nicht ungewöhnlich, sodass an dieser Stelle das Ausschließen großer Datenmengen aufgrund von Blinzlern und Blickrichtungsänderungen vermieden werden sollte. Die Augenartefakte wurden in einem späteren Schritt ausgeglichen.

Zunächst wurde die Bezugslinie (engl. baseline) bestimmt. Als solche wurden für die Auswertung der Zeitfenster vor den Mausclicks die gemittelten Messwerte der ersten 100 ms einer Epoche (z. B. -5000 ms bis -4900 ms in der 5 s-Epoche) definiert. Für die nach der Bewegung zu untersuchenden Zeitfenster wurden die gemittelten Werte 700 – 900 ms nach dem Mausclick als Baseline definiert, hier war etwas zeitlicher Abstand zu der Bewegung erwünscht, um die Überlagerung mit dem vorherigen Potential möglichst klein zu halten. Okuläre Artefakte (Blinzeln, gerichtete Augenbewegungen) wurden näherungsweise herausgerechnet, indem die aufgezeichnete Potentialdifferenz im EOG in Teilen von den aufgezeichneten Werten des EEG subtrahiert wurde. Wie groß der abgezogene Spannungswert sein sollte, wurde anhand linearer Faktoren ermittelt, die wiedergeben, wieviel EOG-Signal im EEG-Signal einer Elektrode enthalten ist. Diese Faktoren wurden durch lineare Regression bestimmt, die als Anwendung in der BrainVision Analyzer Software verfügbar ist. Die Baseline wurde nach diesem Schritt erneut anhand oben beschriebener Schritte bestimmt. Nach dem Entfernen der durch Blinzler verursachten großen Spannungssprünge wurde nochmals mit einem empfindlicheren Kriterium nach Artefakten gesucht: Es wurden Segmente verworfen, in denen an einer der Ableitungen ein Potentialwert außerhalb eines Bereichs von $\pm 150 \mu\text{V}$ gemessen worden war.

Sich langsam aufbauende Potentiale wie das BP haben häufig die gleiche Frequenz wie sog. langsame Drifte, die durch Schweißartefakte auf der Haut oder nicht korrekt platzierte Elektroden hervorgerufen werden können. Deswegen musste hier eine Artefaktkorrektur mit Vorsicht genossen werden. Bei den langsamen Driften handelt es sich um Nullpunktverschiebungen, die insbesondere dann auftreten, wenn, wie in dieser Arbeit, das EEG in sekundenlangen Segmenten im DC-Modus aufgezeichnet und kein Hochpass-Filter

verwendet wird (Handy, 2004). Um diese kaum vermeidbaren, langsamen Drifte zu erkennen und auszugleichen, wurden die ersten und letzten 100 ms einer Epoche miteinander verglichen und auf eine lineare Abweichung hin untersucht. Eine Funktion, die das Verhältnis dieser Abweichung zum EEG-Signal beschrieb, wurde von den EEG-Daten eines jeden Segmentes abgezogen.

Für die Auswertung der Epochen, welche die vor der Bewegung bzw. dem Mausklick lokalisierten Potentiale abbildeten, mussten viele Segmente aufgrund großer Artefaktlast ausgeschlossen werden. Dies führte dazu, dass fünf Versuchspersonen in der weiteren Auswertung unberücksichtigt blieben. Für die separate Auswertung der Zähl- und Nichtzählbedingung hatten zwei weitere Teilnehmer in einer der Bedingungen zu wenig verwertbare Durchgänge. Bei den verbliebenen 14 Probanden lag die durchschnittliche Anzahl eingeschlossener Durchgänge bei 41, mit einer Minimumanzahl von 9 bei maximal 53 möglichen auswertbaren Durchgängen (Mittelwerte \pm SD für die 1 s, 2 s, 3 s und 5 s Bedingungen der Zählbedingung: $n = 41 \pm 9$, 42 ± 6 , 43 ± 8 , 38 ± 10 , Minima: $n = 24$, 32 , 20 , 11 ; und der Nicht-Zählbedingung: $n = 43 \pm 10$, 42 ± 10 , 43 ± 11 , 35 ± 13 , Minima: $n = 16$, 24 , 12 , 9). Die Minimumanzahl von 9 Segmenten fand sich bei einem Probanden. Versuchspersonen mit weniger als 9 Segmenten in einem der Versuchsblöcke wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Um die Zahl der Durchgänge für die Auswertung der 4 variierenden Mindestzeitabstände zu erhöhen, wurden die Daten der Zähl- und Nichtzählbedingung gebündelt und ergaben so durchschnittlich 80 verwertbare Durchgänge, mit einer Minimumzahl von 20 Durchgängen (Mittelwerte sowie Standardabweichung für die Bedingungen mit einem Mindestzeitabstand von 1 s, 2 s, 3 s und 5 s: $n = 85 \pm 14$, 84 ± 11 , 82 ± 21 , 69 ± 22 , Minima: $n = 51$, 62 , 43 , 20). Dies waren die Ergebnisse für die Epochen, die die vor einer Bewegung ablaufenden Potentiale abbildeten.

Für die Auswertung der Epochen, die die Zeit nach den Mausklicks abbildeten, blieben nach der Auslese artefaktbehafteter Segmente mehr Daten erhalten. Ein wichtiger Faktor könnte hier die geringere Größe des Zeitfensters gewesen sein (2,5 s versus 6 bzw. 8 s). Die mittlere Anzahl verwertbarer Durchgänge betrug 49, mit einer Minimumanzahl von 16 (Mittelwerte \pm SD für die Bedingungen mit einem Mindestzeitabstand von 1 s, 2 s, 3 s und 5 s in der Zählbedingung: $n = 50 \pm 3$, 49 ± 4 , 49 ± 4 , 50 ± 4 , Minima $n = 40$, 38 , 35 , 39 ; und in der Nicht-Zählbedingung: $n = 49 \pm 6$, 49 ± 6 , 47 ± 8 , 47 ± 9 , Minima $n = 31$, 27 , 28 , 16). Die verbliebenen Epochen wurden separat für jede der zu vergleichenden Versuchsbedingungen für jede Versuchsperson vom Auswertprogramm quasi übereinandergelegt und rechnerisch gemittelt. Anschließend wurden die Daten aller Probanden je Bedingung zu Gesamtmittelwerten, sog. „grand means“ oder „grand averages“ gemittelt. So entstand für jede Versuchsbedingung ein repräsentativer Gesamt-Potentialverlauf, welcher die elektrokortikale Situation in einem für unsere Versuchsteilnehmer „durchschnittlichen Gehirn“ während der BP-Experimente dieser Arbeit zeigt. Zur besseren Darstellung wurden die Gesamtmittelwerte außerdem mit einem Tiefpassfilter bei 5 Hz mit einer Absenkung von 48 dB/Oktave bearbeitet.

2.1.7 Analyse des Verhaltens

Während der Messungen wurde durch das Programm Presentation für jeden Probanden eine Ereignisprotokolldatei geschrieben. Darin wurden die tatsächlichen Zeitabstände zwischen den einzelnen Ereignissen (Mausklicks) vermerkt. Um das Klickverhalten der Versuchspersonen zu analysieren, wurde der Inhalt dieser Dateien in das Programm Excel (Version 14.0) importiert. Für jeden der Versuchsteilnehmer und jeden einzelnen der acht Versuchsblöcke wurden die Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen (engl. standard deviation, SD) der Zeitabstände bestimmt. Auch wurde die absolute Anzahl der Fehler (d. h. der Durchgänge, in denen der Mindestzeitabstand nicht eingehalten worden war) pro Block ermittelt. Zur besseren Übersicht über das Klickverhalten aller Probanden wurde für jede der statistischen Größen ein Diagramm erstellt, welche im Ergebnisteil in Abbildungen 3 – 6 zu sehen sind.

Alles Verhalten innerhalb von 3,5 SD war Einschlusskriterium für die Analyse. Gewünscht war ein streng monotoner Anstieg der realen Zeitabstände mit dem Größerwerden der vorgegebenen Mindestzeitabstände. Vier der ursprünglich 25 Versuchsteilnehmer zeigten in einer oder mehreren Bedingungen grob abweichendes Verhalten (in den Standardabweichungen oder Mittelwerten und Medianen). Bei einem der vier Teilnehmer kamen auffallend hohe Fehlerraten hinzu (33 % in der Zähl-Bedingung mit dem Mindestzeitabstand von 2 s). Dies mag überraschend sein, erscheint die Aufgabe in ihrer Durchführung doch geradezu simpel. Tatsächlich hatte kein Versuchsteilnehmer die Instruktion missverstanden oder im engeren Sinne falsch umgesetzt: ein Mindestzeitabstand zwischen zwei Klicks sollte eingehalten werden, dies war den Teilnehmern gelungen. Für die Analyse erwünscht, aber nicht ausgesprochen, war jedoch auch eine Orientierung an der vorgegebenen Mindestzeit. Das heißt, dass in der Bedingung mit 5 s Mindestzeitabstand die Abstände zwischen zwei Klicks länger sein sollten als etwa in der Bedingung mit 2 s Mindestzeitabstand. Da ein maximaler Zeitabstand nicht Teil der Aufgabenstellung war (und auch nicht erwünscht, da der Zeitpunkt der Bewegung möglichst frei bestimmt werden sollte), war es also nicht falsch, wenn viele Sekunden lang keine Bewegung durchgeführt wurden. Das Klickverhalten war bei vier Personen allerdings nicht eindeutig abhängig von den Vorgaben zum Mindestzeitabstand, die tatsächlichen Zeitabstände richteten sich also ungenügend nach den größer werdenden Mindestzeitabständen. Zwei dieser 4 Probanden berichteten ungefragt von einem Verlust des Zeitgefühls während der Messungen, begünstigt durch Dunkelheit und Stille im Versuchsraum. Dies mag ein Grund für das nicht-monotone Verhalten dieser Teilnehmer gewesen sein. Die vier Versuchsteilnehmer wurden von der Studie ausgeschlossen.

2.1.8 Analyse der EEG-Daten

Für die Daten der verbliebenen Probanden mussten Vergleichspunkte definiert werden, die den Kurvenverlauf des BP deskriptiv erfassen sollten, wie etwa Minimum und Maximum, die Latenz und der BP-Beginn. Hierfür wurden Algorithmen festgelegt, die einen Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen erlaubten. Sie wurden als mathematische Funktion durch das Programm Excel auf die Daten angewandt. Für die

Überprüfung der Sinnhaftigkeit der Algorithmen waren die Gesamtmittelwerte (engl. grand averages oder grand means), die durch Mittelung der artefaktkorrigierten Durchgänge im BrainVision Analyzer gebildet worden waren, hilfreich. Diese grafischen Darstellungen der arithmetischen Mittelwerte aller BPs ergaben visuelle Anhaltspunkte, worin Unterschiede zwischen den verschiedenen Versuchsbedingungen liegen könnten. Exemplarisch wurden hierfür die Messwerte der Elektrode Cz herangezogen, da das BP dort die größten Amplituden erreicht (Shibasaki & Hallett, 2006). Die Gesamtmittelwerte sind in Form von Graphen im Ergebnisteil in den Abbildungen 16, 19 und 21 veranschaulicht.

Die so erfassten Vergleichsparameter waren in hohem Maße abhängig von der Wahl der Grundlinie, welche wie in *Abschnitt 2.1.6* beschrieben, zunächst anhand der gemittelten Messwerte der ersten 100 ms einer Epoche definiert worden war. Vor diesem Hintergrund fiel in den Graphen der Gesamtmittelwerte auf, dass je nach Versuchsbedingung in den ersten 100 ms mal ein Minimum, mal ein Maximum miterfasst wurde. Man könnte vermuten, dass in der Bedingung mit 5 Sekunden Mindestzeitabstand hier im Mittel tatsächlich der Beginn des zu der Bewegung bei $t = 0$ ms zugehörigen BP zu liegen kam, in den drei anderen Bedingungen scheint es, als wäre hier ein früheres BP mit angeschnitten worden.

Um die maximale Amplitudenhöhe des BP zu erhalten wurde daher das BP-Maximum bestimmt und zu seinem Minimum zu Beginn des BPs (und nicht zur Grundlinie) in Bezug gesetzt. Wir vermuteten, dass ähnliche Mechanismen zu den Zeitpunkten der Minima aktiv waren und so eine Verlegung der Bezugslinie zu den entsprechenden Amplitudenwerten rechtfertigte. Jedoch ergab sich folgendes Problem: wenn eine Versuchsperson mindestens 5 Sekunden bis zum nächsten Mausklick warten sollte, konnte in einem 5-Sekunden-Fenster nur ein BP abgebildet sein. Sollte eine Versuchsperson allerdings mindestens eine, zwei oder drei Sekunden bis zur nächsten Bewegung warten, bestand die Möglichkeit, dass in einem 5-Sekunden-Fenster mehr als ein BP erfasst wurde. Dementsprechend fand sich in den Bedingungen mit einem Mindestzeitabstand von 1 s und 2 s neben dem Minimum zu Beginn des BPs je ein prägnantes weiteres Minimum davor (und in der Bedingung mit 1 s Mindestzeitabstand sogar ein weiteres, weniger prägnantes) in den Gesamtmittelwerten. Für die Bedingungen mit 1 oder 2 s Mindestzeitabstand bedeutete dies, dass das absolute Minimum der Epoche zu dem BP gehören konnte, welches mit dem vorherigen Mausklick korrelierte, und nicht zu demjenigen BP, welches zu der Bewegung bei $t = 0$ ms gehörte. Das absolute Minimum einer Epoche beschrieb hier also nicht zwangsläufig den gewünschten BP-Beginn und konnte auch nicht Parameter für die Berechnung der Gesamtamplitude des zur Bewegung bei $t = 0$ ms gehörigen BP sein. Daher wurden die Minima wie folgt bestimmt: es wurde der positivste Messwert der Potentialdifferenz, also definitionsgemäß der ausgeprägteste Ausschlag unterhalb der Grundlinie, innerhalb einer Epoche ermittelt, jedoch das Suchfenster auf den durchschnittlichen Zeitabstand zwischen zwei Bewegungen verkürzt. Dieser lag bei 1,8 s für die Bedingung mit 1 s Mindestzeitabstand, 2,8 s für die Bedingung mit 2 s Mindestzeitabstand, 4,3 s für die Bedingung mit 3 s Mindestzeitabstand und 6,8 s für die Bedingung mit 5 s Mindestzeitabstand. Da sich das Maximum in den Gesamtmittelwerten in dem Zeitraum zwischen etwa -400 und -200 ms vor dem Mausklick befand, bildete -400 ms die hintere Grenze für die

Minimumsuche. Daraus ergaben sich Suchfenster für das Minimum des BP von 1,8 – 0,4 s vor dem Mausclick für die 1-Sekunden-Bedingung, 2,8 – 0,4 s für die 2-Sekunden-Bedingung, 4,3 – 0,4 s für die 3-Sekunden-Bedingung und 6,8 – 0,4 s für die 5-Sekunden-Bedingung.

Als BP-Maximum (größter negativer Wert der BP-Amplitude) wurden die Werte 400 – 200 ms vor einem Mausclick (bei $t = 0$ ms) als Durchschnittsamplitude gemittelt. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da wie in den Gesamtmittelwerten dieser Arbeit ersichtlich die BPs ihre Maxima im Mittel etwa 300 ms vor dem Mausclick erreichten. Das heißt die Amplitude wurde als mittlerer Wert der Potentialdifferenz ± 100 ms um den Zeitpunkt 300 ms vor der Bewegung bestimmt. Die Zeitabstände zwischen BP-Maxima und Bewegung wurden in Studien häufig kleiner angegeben (etwa bei Kornhuber und Deecke, 1965). Die Diskrepanz zu diesen Angaben könnte daher rühren, dass in dieser Arbeit das Drücken der Computermastaste als Indikator für die Bewegung verwendet wurde und kein Elektromyogramm geschrieben wurde, welches den Beginn der Muskelaktivität sicher früher angezeigt und die Zeitabstände verkürzt hätte. Ähnliche Werte fanden sich bei Haggard und Eimer (1999) oder Baker et al. (2012), die den Bewegungsbeginn ebenfalls per Tastendruck definierten.

Die Gesamtamplitude wurde als Differenz der Messpunkte des Kurvenmaximums und Kurvenminimums über den Mittellinienelektroden (FCz, Cz, CPz und Pz) berechnet. D. h. die positiven Werte des Kurvenminimums wurden subtrahiert von den negativen Werten des Kurvenmaximums.

Was augenscheinlich leicht fiel, nämlich den Beginn des BP von anderer elektrischer Aktivität in den Kurvenverläufen der Elektrode Cz abzugrenzen, war mathematisch schwer zu erfassen. Nachdem das Kurvenminimum als Parameter des BP-Beginns ausgeschieden war, wurde ein weiterer Indikator für die Dauer des BP gesucht, der in allen Bedingungen mit demselben Algorithmus zu erfassen war. Als BP-Beginn wurde so der letzte Zeitpunkt vor $t = -400$ ms definiert (dem Beginn der Messepoche für das BP-Maximum), an welchem die Amplitude an den Wert gelangte, der 20 % der BP-Gesamtamplitude betrug.

Die Messgrößen für den Neubeginn der Bereitschaftspotentiale in denjenigen Epochen, die den Zeitraum nach dem Mausclick abbildeten, wurden ebenfalls mit Hilfe der Kurvenverläufe der Gesamtmittelwerte bestimmt. Als Grundlinie wurden die gemittelten Messwerte in dem Zeitraum 0,7 – 0,9 s nach dem Mausclick definiert. Hier sollte weitestgehend vermieden werden, dass der vorherige Verlauf der Potentialdifferenz, der durch die Bewegung bei $t = 0$ ms mitgeprägt worden war, Einfluss auf die Messwerte des Zeitraums hatte, der für die Bestimmung der Bezugslinie dienen sollte. Für die Messung des BP-Neubeginns wurden die Messwerte eines Zeitfensters von 100 ms um die Zeitpunkte 1,4 s und 2,4 s (nach dem Mausclick) herum gemittelt. Die Wahl dieser Zeitfenster ergab sich durch die Betrachtung der Kurvenverläufe und war mit der Erwartung begründet, dass sich die Potentialdifferenz etwa eine Sekunde nach der Bewegung wieder stabilisiert haben würde (als adäquater Vergleichspunkt), bevor dann die ersten Bereitschaftspotentiale in der Bedingung mit 1 s Mindestzeitabstand und anschließend nach und nach auch in den anderen Bedingungen von Neuem beginnen würden.

Für die Anwendung der Algorithmen mussten die Messwerte teilweise aus dem BrainVision Analyzer in Excel (Version 2013) importiert werden, teilweise konnten sie aber auch direkt im BrainVision Analyzer implementiert werden. Die Ergebnisse wurden zur weiteren statistischen Analyse verwendet.

2.1.9 Statistische Analyse

Für die statistische Analyse der EEG-Daten der 16 Probanden mit auswertbaren Daten wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit wiederholten Messungen durchgeführt. Die Statistiksoftware IBM SPSS Statistics (Version 22) fand hierfür Verwendung. Faktoren der ANOVA waren: Mindestzeitabstand (1 s, 2 s, 3 s, 5 s), Zählbedingung (Zählen oder Nichtzählen), Elektrode (dies waren die Mittellinienelektroden, an denen das BP den größten Ausschlag zeigte: FCz, Cz, CPz und Pz). Bei den Epochen, bei denen das Zeitfenster nach dem Mausklick untersucht wurde, kam zudem der Faktor Zeitfenster (1,2 s versus 2,4 s nach dem Mausklick) zur Anwendung.

Bei den Epochen, die den Verlauf der Potentialdifferenz vor der Bewegung abbildeten, mussten die Daten aus der Zähl- und Nichtzählbedingung aufgrund des Datenverlusts durch die Artefaktkontrolle (insbesondere bei 2 Probanden) zusammengefasst werden, nur so konnte der Effekt des Mindestzeitabstandes hinreichend analysiert werden. Die beiden betroffenen Probanden wurden von der Analyse der Zählbedingung mit sämtlichen Faktoren ausgeschlossen. Um festgestellte Interaktionen zwischen den Faktoren aufzuklären, wurden die ANOVAs in diesem Fall separat für die einzelnen Stufen jedes an der Interaktion beteiligten Faktors gerechnet. Die Sphärizität der Daten wurde mit dem Mauchly-Test überprüft. Nur die Faktoren Mindestzeitabstand (1 s, 2 s, 3 s, 5 s) und Elektrode (FCz, Cz, CPz und Pz) wiesen mehr als zwei Stufen auf, sodass nur hier eine Verletzung der Sphärizität möglich war (d. h. die Varianzen der Differenzen zwischen beliebigen zwei Faktorstufen könnten nicht homogen sein). Für eine Greenhouse-Geisser-Korrektur der Freiheitsgrade wurde in diesen Fällen der ϵ -Wert mit angegeben sowie der korrigierte p-Wert. Im Anhang (*siehe Abschnitt 7.7.1*) findet sich eine tabellarische Darstellung sämtlicher F- und p-Werte.

Für einzelne Fragestellungen wurden Mittelwerte mittels des t-Tests für abhängige Stichproben verglichen.

Für die Auswertung kategorialer Daten im Fragebogen (z.B. "Bedingung A war leichter" vs. "Bedingung B war leichter") wurde der Chi-Quadrat-Test durchgeführt.

2.2 Experiment 2

Material und Methodik der Experimente 1 und 2 waren nahezu identisch. Daher wird im Folgenden auf eine eingehende Beschreibung des Experiments 2 verzichtet und vor allem auf die Unterschiede zu Experiment 1 eingegangen.

2.2.1 Versuchspersonen

14 gesunde Freiwillige wurden für die Studie rekrutiert. Keine der Versuchspersonen hatte zuvor an Experiment 1 teilgenommen. Ein- und Ausschlusskriterien waren deckungsgleich mit Experiment 1 (s. *Kapitel 2.1.1*).

Von den 14 Teilnehmern mussten 2 von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Bei einem Teilnehmer geschah dies aufgrund der Artefaktlast im EEG (s. *Kapitel 2.1.6 Verarbeitung der EEG-Daten*), bei einem weiteren wegen Auffälligkeiten des Verhaltens im Zuge des Experiments (s. *Kapitel 2.1.7 Analyse des Verhaltens*). Die verbliebenen 12 Versuchsteilnehmer waren zwischen 18 und 31 Jahre alt ($\bar{x} = 24$ Jahre, $SD = 4$). Es nahmen 6 Frauen und 6 Männer teil. Allesamt waren laut Selbsteinschätzung im Edinburgh Handedness Inventory Rechtshänder (50 bis 100 Prozentpunkte, $\bar{x} = 81$ %).

2.2.2 Versuchsaufbau

Dieser gestaltete sich genau wie in Experiment 1 (s. *Kapitel 2.1.2*). Es wurden jedoch in der Zwischenzeit neue Silber-Silberchlorid-Ringelektroden angeschafft. Hinzu kam außerdem die Verwendung zweier PC-Stereo-Lautsprecher (Hama, AC-150 Cross Sound, <https://de.hama.com/en>), über welche ein in regelmäßigen Abständen wiederkehrendes Geräusch, ähnlich dem Ticken einer Uhr, eingespielt wurde. Das Geräusch wurde durch die Soundkarte des Computers generiert unter Verwendung der Audio-Space-Funktion des Programms Presentation und dauerte 50 ms an. Die Lautsprecher wurden rechts und links des Computermonitors jeweils in circa 1,20 m Abstand zum Versuchsteilnehmer platziert. Das Ticken wurde relativ leise, mit einer Lautstärke von 30 dB (gemessen mit der Sound Meter App von Abc Apps) präsentiert.

2.2.3 Versuchsdurchführung

Eine standardisierte Versuchsanweisung wurde verwendet, um die Probanden über das BP-Experiment zu informieren (s. *Anhang*). Der Versuch bestand aus sechs Blöcken, die sich in 3 x 2 unterschiedliche Versuchsbedingungen untergliederten. Die Versuchsteilnehmer wurden angewiesen, mit dem rechten Zeigefinger die linke Taste einer Computermaus zu drücken und dies sechszigmal zu wiederholen. Der

Zeitpunkt des Mausclicks konnte dabei – bis auf eine Einschränkung – wie in Experiment 1 frei gewählt werden. Die Einschränkung bestand in dem Einhalten eines Mindestzeitabstandes zwischen zwei Mausclicks, der entweder 2 oder 4 Sekunden betrug. Der Mindestzeitabstand wurde wie in Experiment 1 über eine Instruktion auf dem Monitor und eine mündliche Ansage vor jedem Block mitgeteilt. Hinzu kamen Informationen zu drei verschiedenen Rahmenbedingungen: entweder war das regelmäßige Ticken einer Uhr zu hören, oder es wurde gar kein Uhricken vorgespielt, oder das unregelmäßige, unzuverlässige Ticken einer „kaputten Uhr“ begleitete die Messung. Die Reihenfolge der Bedingungen wurde über alle Versuchsteilnehmer balanciert. Die Bedingung ohne Uhr diente als Vergleichsbedingung. Hier fehlte jegliche externe Hilfestellung zur zeitlichen Orientierung. In der Bedingung mit regulär tickender Uhr wurde ein regelmäßiger Rhythmus mit zweimaligem Einblenden des Tickens pro Sekunde eingespielt (wie das gewohnte Ticken einer Uhr). In der Bedingung mit irregulär tickender Uhr änderte sich der Takt mit jedem Mausclick und wechselte zufällig zwischen 2, 3, 5 und 6 Tickgeräuschen pro zwei Sekunden (entsprechend 1, 1,5, 2,5 und 3 Tickgeräuschen pro Sekunde, was eine durchschnittliche Frequenz von 2 Hz ergibt). Dieses irreguläre Ticken mit unvorhersehbaren Taktwechseln sollte als unzuverlässiges, störendes Signal dienen.

Die ersten drei der vorgegebenen 60 Durchgänge dienten der Übung, danach sollten möglichst keine Fehler mehr unterlaufen. Fiel der Zeitabstand zwischen zwei Mausclicks weniger als 4 bzw. 2 s aus, wurde wie in Experiment 1 die Fehlermeldung „Zu früh gedrückt“ eingeblendet. Wie in Experiment 1 änderte das Fixationskreuz als Feedback 100-200 ms nach jedem erfolgreich durchgeführten Durchgang seine Farbe von Schwarz in Ultramarinblau.

Die Messung insgesamt dauerte je nach Schnelligkeit der Versuchsperson zwischen 40 und 80 Minuten. Das Anbringen der Elektroden und Optimieren des EEG-Signals dauerte etwa 40 Minuten.

2.2.4 Fragebogen

Mit Beenden der Messung wurde jeder Versuchsperson ein Fragebogen ausgehändigt (s. *Anhang*). Zunächst sollten die Probanden einschätzen, welche der drei Uhrbedingungen ihnen in der Umsetzung am schwersten fiel. Die Probanden gaben an, zu wie viel Prozent sie sich jeweils an dem regulären und an dem irregulären Ticken orientierten. Außerdem wurden Angaben im Freitext erbeten darüber, was als Orientierung diente, als kein Uhricken zu hören war, und als regelmäßiges und als unregelmäßiges Uhricken eingespielt wurde. Die Antworten der 12 Probanden wurden mit dem Programm IMB SPSS statistics (Version 22) ausgewertet.

2.2.5 EEG

Die Vorbereitung des EEG war in großen Teilen identisch mit der von Experiment 1 (s. *Kapitel 2.1.5*)

Nach Anbringen der Elektroden wurde hier bei allen 12 Probanden eine Wartezeit von 10 Minuten eingehalten. Bei den ersten 7 Probanden wurde für EEG und EOG die gleiche Elektrolytpaste zur Impedanz-Herunterregulierung wie in Experiment 1 verwendet (abrasives Elektrodengel, NaCl, Lapis Pumicis, Traganth, Glycerin, Kal. Hydrogentart. Phenol. Liqu. 0,2 % in wässr. Lsg, Theodor-Körner-Apotheke, Graz). Wegen Versorgungsengpässen wurde bei den nächsten 5 Probanden die Elektrolytpaste der Firma Medizin-Technik Berger (Am Knick 6 e, 23843 Bad Oldesloe) verwendet. Diese wurde freundlicherweise bereitgestellt vom Institut für Neuroendokrinologie in Absprache mit Prof. Dr. rer. medic. Lisa Marshall. So waren in Bezug auf das verwendete Elektrolytgel zwei Untergruppen etwa gleicher Größe entstanden.

2.2.6 Verarbeitung der EEG-Daten

Die Verarbeitung der EEG-Daten erfolgte in großen Teilen analog zu Experiment 1.

Ausgehend von der Fingerbewegung (Mausklick) bei $t = 0$ ms wurden die EEG-Daten diesmal nur auf eine Art in Epochen untergliedert. Die Epochen begannen bei -5 s vor dem Mausclick und endeten 1 s nach diesem. Als Bezugslinie wurden die gemittelten Amplitudenwerte der ersten 100 ms der Epoche (also im Zeitraum -5 s bis -4,9 s vor der Bewegung) definiert.

Die Epochen wurden analog zum Vorgehen in Experiment 1 auf Artefakte untersucht. Die mittlere Anzahl eingeschlossener Epochen über alle Bedingungen betrug 51 mit einer Minimumanzahl von 14 bei maximal 63 möglichen auswertbaren Durchgängen (Mittelwerte und SD für reguläres, irreguläres und fehlendes Uhricken für den Mindestzeitabstand von 4 s betragen 49 ± 11 , 53 ± 6 , 53 ± 9 , die minimale Anzahl belief sich jeweils auf 23, 40 und 32 Segmente, für den Mindestzeitabstand von 2 s: 50 ± 14 , 48 ± 14 , 54 ± 11 , Minima 14, 18 und 25 Segmente). Eine Minimumanzahl von 14 Segmenten pro Versuchsbedingung, welche bei einem Versuchsteilnehmer vorlag, wurde akzeptiert. Eine Versuchsperson wurde wegen Unterschreiten der erforderlichen Mindestanzahl, bedingt durch eine hohe Artefaktlast, ausgeschlossen.

Erneut wurden die ersten und letzten 100 ms einer Epoche miteinander verglichen und auf eine lineare Abweichung hin untersucht. Wie in Experiment 1 wurde eine Funktion, die das Verhältnis dieser Abweichung zum EEG-Signal beschrieb, von den EEG-Daten eines jeden Segmentes abgezogen.

Zur besseren Darstellung wurden die Gesamtmittelwerte außerdem mit einem Tiefpassfilter bei 5 Hz mit einer Absenkung von 48 dB/Oktave bearbeitet.

2.2.7 Analyse des Verhaltens

Diese erfolgte wie in Experiment 1. Hinzu kam die errechnete prozentuale Fehlerrate (= zu früh gedrückt) und als Erweiterung die Anzahl von Durchgängen, in denen mehr als 5 Sekunden (bei der 2 s-Bedingung) bzw. mehr als 10 Sekunden (bei der 4 s-Bedingung) zwischen zwei Bewegungen gewartet wurde.

Alles Verhalten innerhalb von 2 Standardabweichungen war Voraussetzung für die weitere Analyse der EEG-Daten. Deutliche Abweichungen zu den anderen Probanden zeigten sich bei einer Versuchsteilnehmerin (wie oben bereits erwähnt). Insbesondere ihr erster Block (kein Uhricken, 4 s Mindestzeitabstand) machte sich durch Ausreißer bemerkbar.

Die Standardabweichungen dienten in der weiteren Auswertung von Experiment 2 der Bildung zweier Untergruppen. Da mit den drei Uhrbedingungen drei Szenarien, in denen innere Zeitschätzung mehr oder weniger notwendig wird, geschaffen werden sollten, war erwartet worden, dass sich dieses im Verhalten der Versuchspersonen niederschlägt. So sollte etwa beim Einblenden unregelmäßigen Uhrtickens die Standardabweichung als Maß der Streuung im Vergleich zur Bedingung ohne jegliches Uhricken zunehmen. Noch weiter sollte die Standardabweichung bei regelmäßigem Uhricken abnehmen, als Parameter dafür, dass an die innere Zeitschätzung wenig Ansprüche gestellt werden. Die Aufspaltung des Datensatzes in zwei Gruppen erfolgte also danach, ob die Standardabweichungen gemäß regelmäßiges Uhricken < kein Uhricken < irreguläres Uhricken ausfielen oder aber (in mindestens einer Bedingung) nicht. Es entstanden zwei Untergruppen gleicher Größe (je $n = 6$).

2.2.8 Analyse der EEG-Daten

Bei der Analyse der EEG-Daten wurde ähnlich verfahren wie in Experiment 1. Es ging hier jedoch vornehmlich um potentielle durch die variierenden Uhr-Bedingungen verursachte Effekte auf die BP-Amplitude. Diese wurde am BP-Maximum (-300 bis -100 ms vor der Bewegung) und bei Amplitudenwerten in der Zeitspanne -1500 bis -1000 ms vor dem Mausklick ausgewertet, da hier bei Betrachtung der Daten in den Gesamtmittelwerten (*siehe Abbildungen 30 und 34 im Abschnitt Ergebnisse*) am ehesten Unterschiede vermutet wurden. Als Grundlinie (engl. baseline) dienten die gemittelten Messwerte der ersten 100 ms der Epoche (also der Zeitraum 5,0 s – 4,9 s vor dem Mausklick). Dies entspricht der konventionellen Definition einer Grundlinie, ist jedoch eine andere Definition als diejenige in Experiment 1.

2.2.9 Statistische Analyse

Wie in Experiment 1 wurde mit der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics (Version 22) eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit wiederholten Messungen durchgeführt. Faktoren der ANOVA waren: Mindestzeitabstand (2 s oder 4 s), Uhrbedingung (keine Uhr, Uhr, irreguläre Uhr) und Elektrode (FCz, Cz, CPz und Pz). Die Sphärizität der Daten wurde mit dem Mauchly-Test überprüft. Da nur die Faktoren Uhrbedingung und Elektrode mehr als zwei Stufen aufwiesen, war nur hier eine Verletzung der Sphärizität möglich (d. h. die Varianzen der Differenzen zwischen beliebigen zwei Faktorstufen könnten nicht homogen sein). Für eine Greenhouse-Geisser-Korrektur der Freiheitsgrade dieser Faktoren wurde der ϵ -Wert mit angegeben, in den tabellarischen Darstellungen im Anhang auch der korrigierte p-Wert.

Für die Analyse der Untergruppen wurde eine Varianzanalyse mit dem Gruppenfaktor Untergruppe und den Messwiederholungsfaktoren Mindestzeitabstand (2 s und 4 s), Uhrbedingung (Uhr, keine Uhr, irreguläre Uhr) und Elektrode (FCz, Cz, CPz und Pz) gerechnet.

Für einzelne Fragestellungen wurden Mittelwerte mittels des t-Tests für abhängige Stichproben verglichen.

Für die Auswertung kategorialer Daten im Fragebogen wurde der Chi-Quadrat-Test durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Experiment 1

Nachfolgend werden die Ergebnisse des ersten Experiments inklusive signifikanter Effekte beschrieben. Eine tabellarische Darstellung sämtlicher Effekte und ihrer Signifikanzen befindet sich im Anhang.

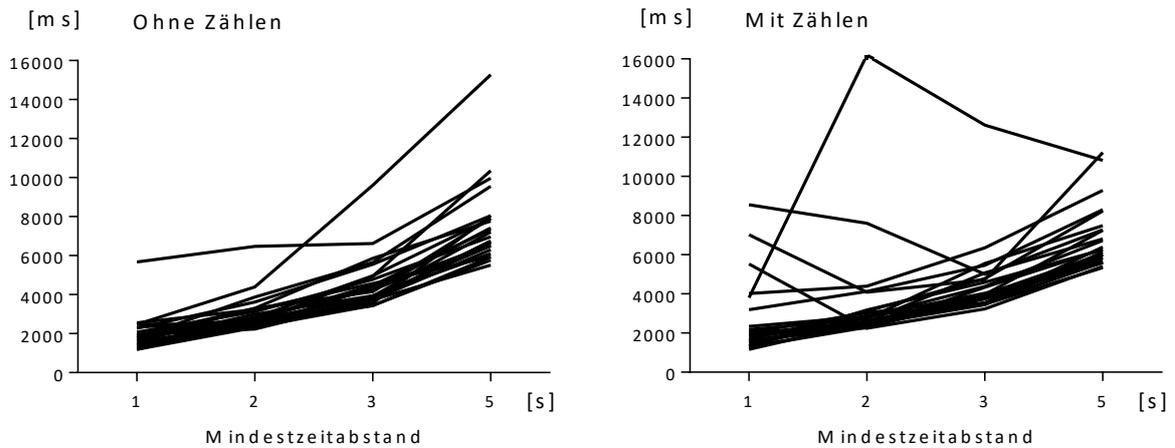
3.1.1 Verhalten

Es wurden die Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen (engl. standard deviation, SD) der tatsächlichen Zeitabstände zwischen je zwei Bewegungen für jeden Versuchsteilnehmer ermittelt. Um den Ausschluss einiger Versuchsteilnehmer aufgrund ihres Verhaltens exemplarisch für Experiment 1 zu veranschaulichen, sind in Grafik 3 und 4 zunächst die Mittelwerte aller Versuchspersonen dargestellt und in Grafik 7 und 8 die Standardabweichungen aller Versuchsteilnehmer. Die Mittelwerte der für die Analyse verbleibenden Versuchspersonen sind dagegen in Grafik 5 und 6 dargestellt, die Standardabweichungen in Grafik 9 und 10. Auf die Darstellung der Mediane wurde verzichtet, da sie sich nur geringfügig von den Mittelwerten unterschieden.

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen die über alle Versuchspersonen gebildeten mittleren Zeitabstände und Standardabweichungen und stellen die beiden Zählbedingungen in je einem Graphen gegenüber. Die Mittelwerte des Klickverhaltens betragen in der Bedingung ohne gedankliches Mitzählen der verstrichenen Sekunden (linke Grafik) 1,7, 2,8, 4,3 und 7,0 s (für die Mindestzeitabstände von 1, 2, 3 und 5 s) und in der Bedingung mit gedanklichem Mitzählen der Sekunden 1,9, 2,9, 4,3 und 6,6 s. Wie erwünscht wurden die Zeitabstände zwischen den Mausklicks umso größer, je größer die geforderten Mindestzeitabstände waren ($F_{(3,45)} = 476,7$, $\epsilon = 0,68$, $p < 0,001$). Es gab keinen signifikanten Effekt durch die verschiedenen Zählbedingungen ($F \leq 2,3$, $p \geq 0,13$ für den Haupteffekt und die Interaktion).

Die gemittelten Standardabweichungen (SD) betragen in der Bedingung ohne Zählen der Sekunden 0,3, 0,4, 0,7 und 1,2 s (für die geforderten Mindestzeitabstände von 1, 2, 3 und 5 s) und in der Bedingung mit Zählen der Sekunden 0,3, 0,4, 0,5 und 0,7 s. Die SD nahmen mit den größer werdenden Mindestzeitabständen ($F_{(3,45)} = 32,5$, $\epsilon = 0,55$, $p < 0,001$) zu, allerdings weniger ausgeprägt wenn die Sekunden mitgezählt werden mussten (Zählen \times Mindestzeitabstand $F_{(3,45)} = 5,9$, $p = 0,02$), sodass die Standardabweichungen für die 3 s- und 5 s-Mindestzeitabstände bei der Zählbedingung kleiner ausfielen als bei der Nicht-Zählbedingung (Zählen $F_{(1,15)} = 11,4$, $p = 0,004$; sowie bei ausschließlicher Betrachtung der Bedingungen mit 3 s Mindestzeitabstand $p = 0,02$, und für die Bedingungen mit 5 s Mindestzeitabstand $p = 0,002$).

Mittelwerte der Zeitabstände vor Ausschluss einiger Versuchspersonen



Abbildungen 3 und 4: Die Linien wurden hier geschwärzt, um zu verdeutlichen, dass es sich hierbei nicht um die für die Auswertung verwendeten Versuchspersonen handelt. Vier Versuchspersonen wurden aufgrund auffälligen Verhaltens von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Mittelwerte der Zeitabstände der eingeschlossenen Versuchspersonen

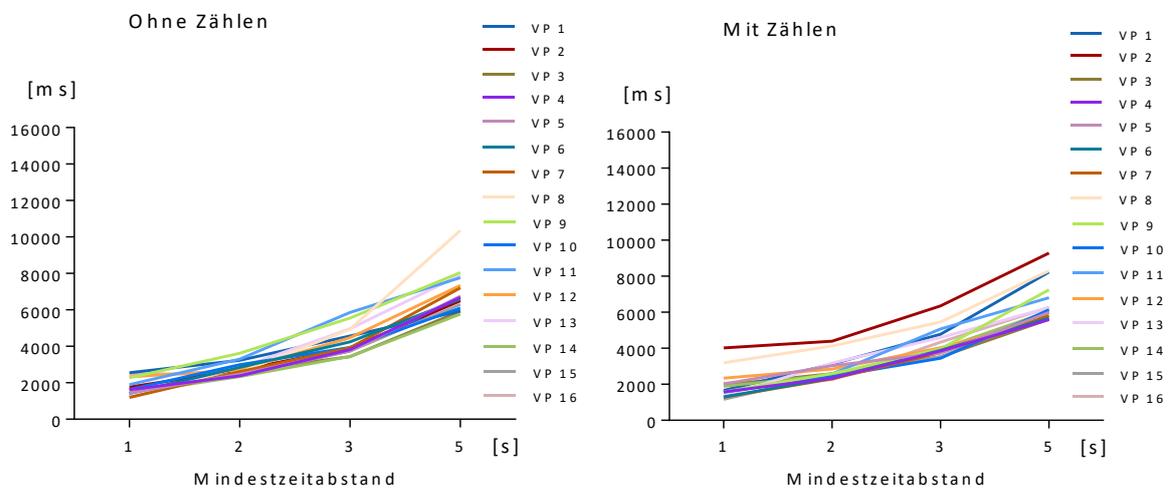
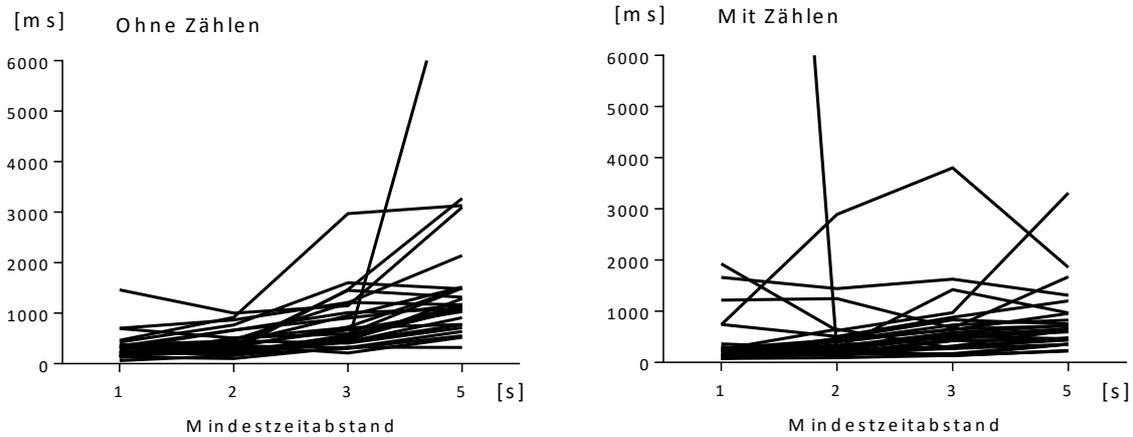


Abbildung 5 und 6: Mittelwerte zeitlicher Abstände der für die Analyse beibehaltenen Versuchsteilnehmer ($n = 16$) für die Bedingung ohne Zählen (links) und mit Zählen der Sekunden (rechts) in Millisekunden. Die x-Achse gibt die Versuchsanweisung mit dem jeweils geforderten Mindestzeitabstand an (1, 2, 3 oder 5 s). Es zeigt sich, dass mit größeren geforderten Mindestzeitabständen die Mittelwerte der tatsächlichen Abstände adäquat anstiegen. Versuchspersonen, die sich in dem Sinne nicht an die Versuchsanweisung hielten, dass sie etwa bei einem kürzeren geforderten Mindestzeitabstand im Schnitt länger warteten als bei einem längeren geforderten Mindestzeitabstand, waren von der weiteren Analyse ausgeschlossen worden.

Standardabweichungen vor Ausschluss einiger Versuchspersonen



Abbildungen 7 und 8: Vier Versuchspersonen wurden aufgrund auffälligen Verhaltens von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Standardabweichungen der eingeschlossenen Versuchspersonen

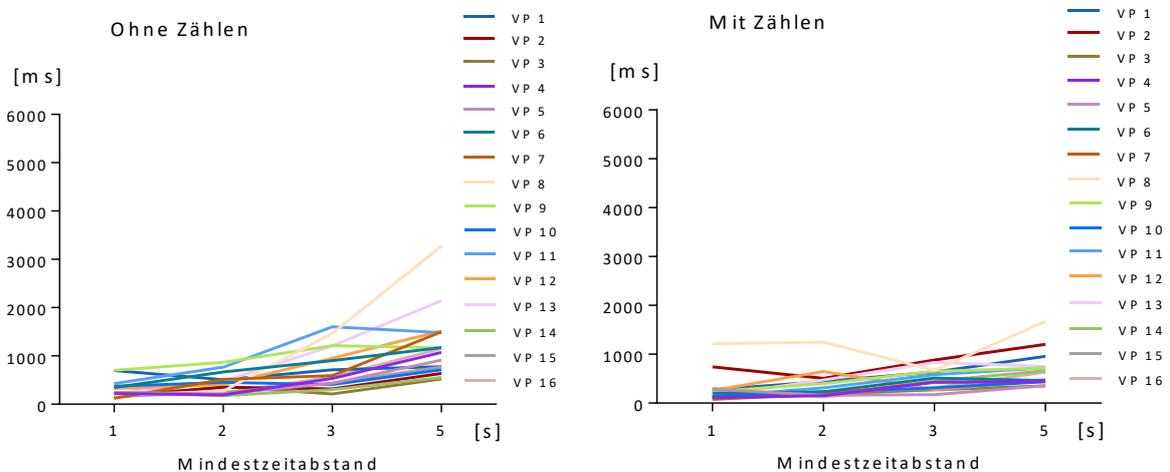


Abbildung 9 und 10: In diesen beiden Grafiken sind die Standardabweichungen der tatsächlichen Zeitabstände je vorgegebenem Mindestzeitabstand abgebildet. Herangezogen wurden die Verhaltensdaten der für die Analyse beibehaltenen 16 Versuchspersonen. In der linken Grafik, die sich auf die Hälfte der Versuchsdurchgänge bezieht, in der die Sekunden in Gedanken nicht mitgezählt werden sollten, zeigt sich eine etwas breitere interindividuelle Streuung als in der rechten Grafik, in der die verstrichenen Sekunden mitgezählt werden sollten. Wie erwartet nimmt mit größeren geforderten Mindestzeitabständen über alle Versuchspersonen gesehen auch die Standardabweichung zu.

Beide Zählbedingungen im direkten Vergleich

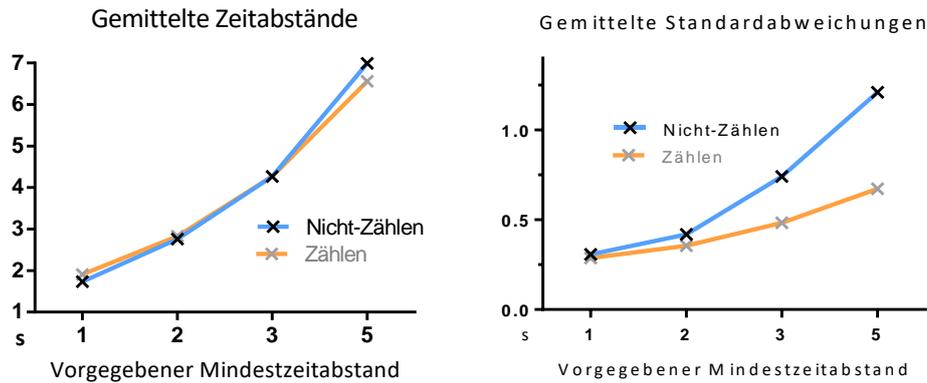


Abbildung 11 und 12: Die über alle Versuchspersonen gemittelten tatsächlichen Zeitabstände zwischen Mausclicks (links) und die gemittelten Standardabweichungen (rechts) der Bedingungen mit und ohne Zählen im direkten Vergleich. Wie in den Grafiken ersichtlich wird, gab es bei den gemittelten Zeitabständen keine großen Unterschiede zwischen der Bedingung, in der das Mitzählen ausdrücklich unterlassen werden sollte, und der, in der es erwünscht war. In der rechten Grafik nimmt die gemittelte SD ohne Mitzählen der Sekunden mit den größer werdenden geforderten Mindestzeitabständen weniger ausgeprägt zu als mit Mitzählen der Sekunden.

In der Abbildung 13 sind die absoluten Fehlerzahlen, d. h. die Anzahl an Durchgängen pro Versuchsbedingung, bei der zu früh gedrückt und so der geforderte Mindestzeitabstand unterschritten wurde, dargestellt. Wie zu vermuten war, treten in der Bedingung, in der ausdrücklich die Sekunden in Gedanken mitgezählt werden sollten, weniger fehlerhafte Durchgänge auf ($F_{(1,15)} = 12,9$, $p = 0,003$). Außerdem verschätzten sich die Versuchspersonen häufiger bei längeren geforderten Mindestzeitabständen und drückten zu früh ($F_{(3,45)} = 17,4$, $\epsilon = 0,68$, $p < 0,001$).

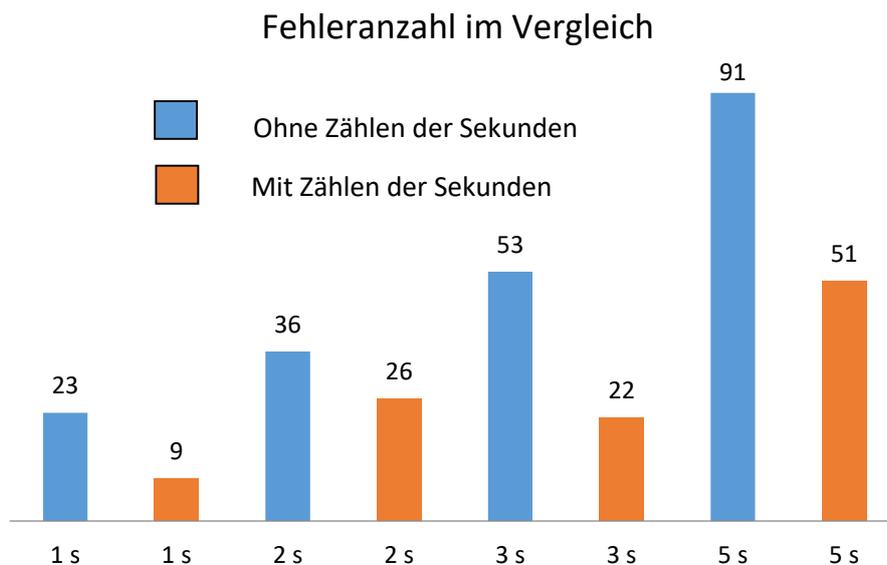


Abbildung 13: Absolute Fehlerzahlen pro geforderten Mindestzeitabstand für die Bedingung ohne Zählen der Sekunden (blau) und mit Zählen der Sekunden (orange) im Vergleich.

3.1.2 Fragebogen

Alle Versuchsteilnehmer kamen mittel gut bis sehr gut mit der Aufgabenstellung zurecht. Von den 16 Versuchsteilnehmern beurteilten 13 (81 %) die Bedingung, in der das Mitzählen der Sekunden untersagt worden war, als in der Umsetzung anspruchsvoller, zwei Teilnehmer (12,5 %) gaben hier die Zähl-Bedingung an ($\bar{x}^2 = 8,1$, $p = 0,005$), und ein Teilnehmer empfand die beiden Bedingungen als gleichwertig. Alle gaben an, sich an die jeweilige Vorgabe (die Sekunden in Gedanken mitzuzählen oder dies zu unterlassen) gehalten zu haben. Neun der 16 Versuchspersonen erhielten einen überarbeiteten Fragebogen, bei dem die Frage, ob sie sich an die jeweilige Zählbedingung gehalten hatten, um eine Bitte um Angabe in Prozent ergänzt worden war. Hier wurde angegeben, dass es ihnen in der Bedingung mit gefordertem gedanklichem Mitzählen der Sekunden im Mittel zu 95,8 % gelang, dies auch umzusetzen. In der Bedingung ohne Zählen gelang es ihnen zu 90,1 %, das Mitzählen zu unterlassen. Um das Mitzählen der Sekunden, wenn für die Umsetzung des Experiments gefordert, zu vermeiden, gaben sieben (44 %) der Versuchsteilnehmer im Freitext an, sich zeitlich an ihrem Atemrhythmus orientiert zu haben, vier Teilnehmer (25 %) gaben an, anhand einer Melodie zeitliche Orientierung gefunden zu haben, drei (19 %) an einer Art Rhythmus, zwei an Liedtexten oder im stummen Vorsagen von Sätzen, fünf (31 %) gaben an, sich mit Gedanken an „Anderes“ abgelenkt zu haben und zwei (12,5 %), dass sie an „nichts“ gedacht hätten. Mehrfachantworten waren möglich. Die Antworten im vollen Wortlaut finden sich im Anhang (s. Kapitel 7.6). Für einen Überblick wurden die Mengen in Kreisdiagrammen veranschaulicht und sind in Abbildung 14 und 15 zu sehen.

Einschätzung der Schwierigkeit der Versuchsbedingung im Vergleich



Abbildung 14: Anzahl der Versuchsteilnehmer, die im Fragebogen zu Experiment 1 eine Aussage hinsichtlich der Schwere der Aufgabenstellung tätigten.

Strategienennungen zur Vermeidung des Mitzählens der Sekunden

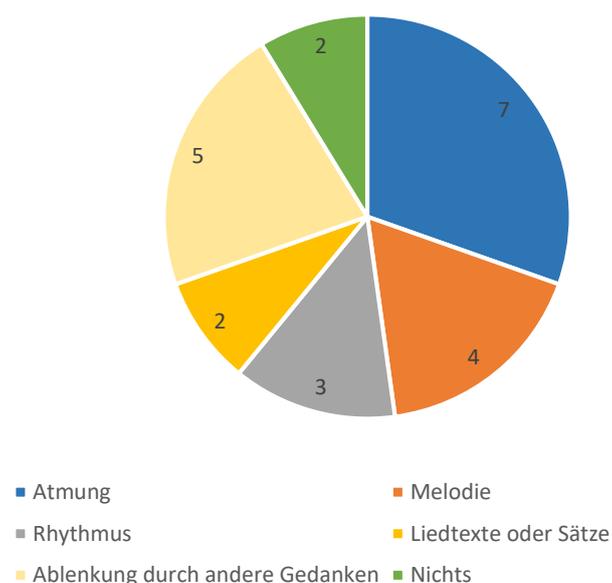


Abbildung 15: Anzahl der Freitextnennungen einer Strategie zur Vermeidung des gedanklichen Mitzählens der Sekunden.

3.1.3 Bereitschaftspotential

Im Folgenden werden signifikante Ergebnisse erläutert und die Kurvenverläufe der BPs als Graphen dargestellt. Die Daten dieser Graphen wurden wie im Methodenteil beschrieben von systematisch störenden EEG-Signalen und Artefakten befreit (*siehe Kapitel 2.1.8*). Auf die grafische Darstellung der unbearbeiteten Kurvenverläufe wurde hier aus Platzgründen verzichtet.

Analysiert wurde das mit einer Willkürbewegung korrelierende Bereitschaftspotential, einmal in den Epochen vor der Bewegung, einmal in den Epochen nach der Bewegung (dann zugehörig zu der nachfolgenden Bewegung). Beschrieben wurde es durch das BP-Maximum und -Minimum, die BP-Gesamtamplitude und den BP-Beginn – definiert als erster Punkt, von der Bewegung an rückwärtsblickend, der die Zwanzigprozentmarke der Gesamtamplitude unterschritt.

3.1.3.1 Effekte durch Variation des Mindestzeitabstands

Auf die Amplitude vor der Bewegung:

Die Kurvenverläufe der Gesamtmittelwerte in den 5 bzw. 7 Sekunden vor der Bewegung sind in Abbildung 16 zu sehen. Da keine signifikanten Unterschiede zwischen der Zähl- und der Nichtzähl-Bedingung festgestellt werden konnten (s. nachfolgender Abschnitt, S. 47) und die Analyse der Auswirkungen der verschiedenen Mindestzeitabstände von höherem Stellenwert war, wurden die Daten der beiden Zählbedingungen hier zusammengefasst. Die BPs wurden an den Elektroden der Mittellinie FCz, Cz, CPz, Pz untersucht; hier zeigten sie den größten Ausschlag, wie auch in den topografischen Karten in Abbildung 17 zu sehen ist. Unter den genannten Elektroden der Mittellinie waren die BPs über FCz am kleinsten, $F_{(3,45)} = 3,0$, nach Greenhouse-Geisser-Korrektur: $p = 0,06$. Die Amplituden zeigten sich an allen Elektroden gleichermaßen abhängig von den geforderten Mindestzeitabständen, $F_{(3,45)} = 26,2$, $\epsilon = 0,74$, $p < 0,001$, Interaktion $F_{(9,135)} = 0,3$, n. s., und zeigten dabei eine lineare Abhängigkeit zu den geforderten Mindestzeitabständen, was sich auch am linearen Kontrast $F_{(1,15)} = 50,7$, $p < 0,001$ zeigte.

Gesamtmittelwerte über Cz vor der Bewegung

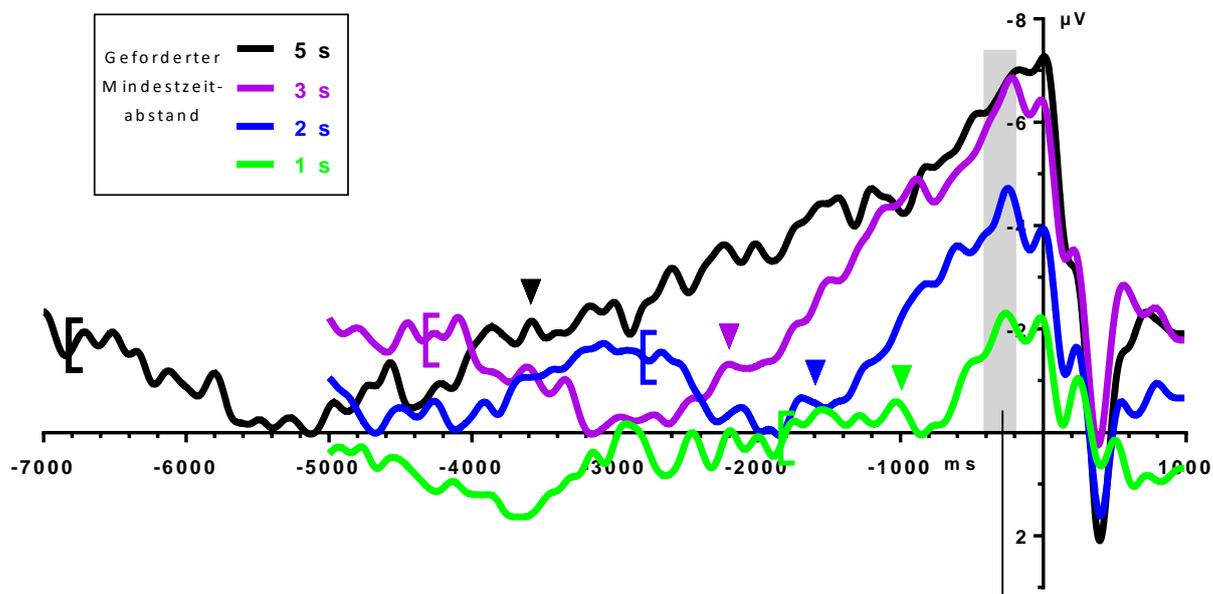


Abbildung 16: Effekte der Variation geforderter Mindestzeitabstände auf die Bereitschaftspotentiale vor der Bewegung. Dargestellt sind die Gesamtmittelwerte von $n = 16$ Versuchspersonen, exemplarisch an der Elektrode Cz. Der Zeitpunkt des Mausclicks als Indikator der Bewegung liegt bei $t = 0$ ms. Die EEG-Daten beider Zählbedingungen wurden hier zusammengefasst. Der hellgraue Balken stellt das Analysefenster für das BP-Maximum dar. Die eckigen Klammern markieren den mittleren Zeitabstand zur vorigen Bewegung für den jeweils geforderten Mindestzeitabstand und dienen als linke Begrenzung für das Suchfenster zur Findung des BP-Minimums (positivster Wert des BP-Kurvenverlaufs), welches für die Bestimmung der bedingungsspezifischen Grundlinie herangezogen wurde. Die Pfeilspitzen markieren den mittleren BP-Beginn einer jeden Bedingung, definiert als Unterschreiten der Zwanzigprozentmarke der Gesamtamplitude.

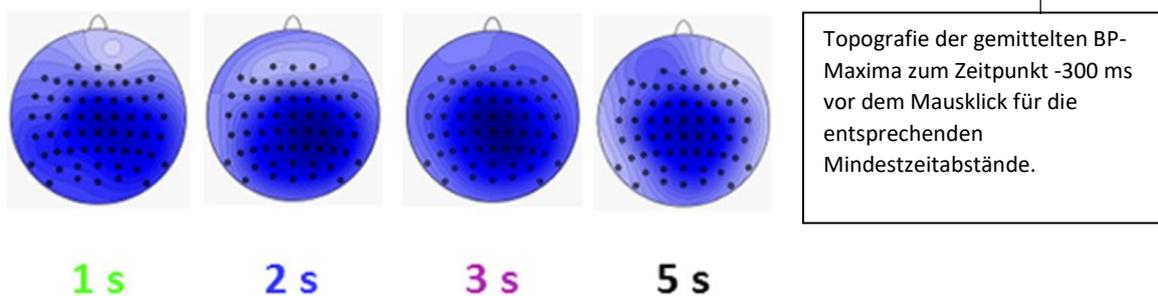


Abbildung 17: Topografische Verteilung der Spannung über den einzelnen Elektroden (für die genaue Anordnung und Bezeichnung der Elektroden s. Kapitel 2.1.6) der BP-Maxima für die vorgegebenen Mindestzeitabstände. Kopfansicht von oben, mit Cz im Zentrum, Nase nach oben zeigend. Die Farbkodierung zeigt die Intensität und Polarität der Spannung an (blau = negative Werte, weiß = null, rot = positive Werte, die zum Messzeitpunkt -300 ms nicht vorlagen).

Auf den BP-Beginn vor der Bewegung:

Bei einem Versuchsteilnehmer war in der Bedingung mit 1 s Mindestzeitabstand der BP-Ausschlag weniger negativ als die Grundlinie, trat also nicht über das Niveau letzterer hinaus. Daher wurde die Analyse des BP-Beginns mit einem Probanden weniger ($n = 15$) durchgeführt. Die individuellen BP-Startpunkte sind in Abbildung 18 zu sehen. Die mittleren Startpunkte über Cz (siehe Pfeilspitzen in Abbildung 11) lagen bei $-1,0$ s, $-1,6$ s, $-2,2$ s und $-3,6$ s für die Mindestzeitabstände 1 s, 2 s, 3 s und 5 s, $F_{(3,42)} = 19,5$, $\epsilon = 0,49$, $p < 0,001$, mit einem linearen Kontrast $F_{(1,14)} = 28,1$, $p < 0,001$. Es traten die BP-Startpunkte zuverlässig früher in der Bedingung mit 5 s Mindestzeitabstand auf und zuverlässig später in der Bedingung mit dem 1 s Mindestzeitabstand, wenn man diese mit den beiden verbliebenen Bedingungen (Mindestzeitabstände von 2 oder 3 s) verglich ($t \geq 3,4$, $p \leq 0,005$ in paarweisem Vergleich). Die BPs begannen in der Bedingung mit 2 s Mindestzeitabstand tendenziell später ihren Anstieg als in der Bedingung mit 3 s Mindestzeitabstand ($t = 2,0$, $p = 0,06$).

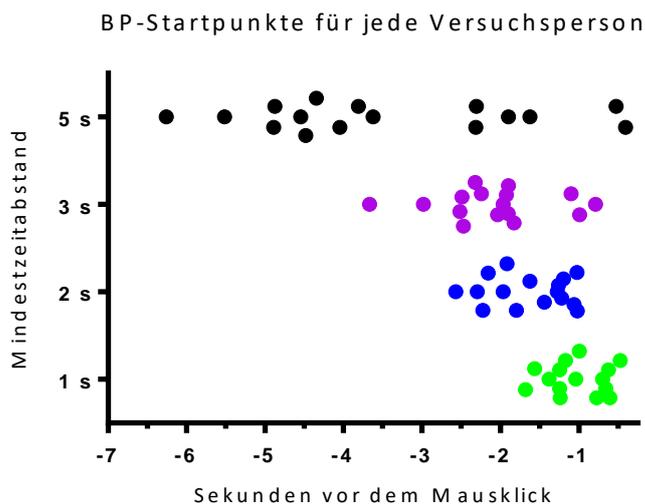


Abbildung 18: Individuelle, über alle Durchgänge einer Bedingung gemittelte BP-Startpunkte von allen Versuchspersonen (ausgenommen eines Versuchsteilnehmers in der Bedingung mit 1 s Mindestzeitabstand, bei dem der BP-Ausschlag nie die Grundlinie überschritt und so kein BP-Startpunkt erfasst werden konnte). Zum Zeitpunkt eines jeden dargestellten Punktes wurde die Zwanzigprozentmarke der Gesamtamplitude von der Bewegung an rückwärts blickend das erste Mal unterschritten.

Auf die Amplitude nach der Bewegung:

Die nach der Bewegung bei $t = 0$ ms neu ansteigenden BPs sind in Abbildung 19 dargestellt. Die BP-Amplitude nach den Bewegungen bei $t = 0$ ms wurde in einem Zeitfenster von 200 ms um die Zeitpunkte 1,4 s und 2,4 s nach dem Mausklick gemessen und mit einer ANOVA für die Faktoren Epoche, Mindestzeitabstand, Zählbedingung und Aufzeichnungsort (Elektrode) verrechnet. Die BPs zeigten an den posterioren Elektroden größere Ausschläge als an den anterioren (CPz > FCz), wie auch anhand der topografischen Karte in Abbildung 20 zu sehen ist (Elektrode: $F_{(3,45)} = 5,0$, $\epsilon = 0,75$, $p = 0,01$). Interessanterweise verhielten sich die neu ansteigenden BPs bezogen auf die variierenden Mindestzeitabstände bei 1,4 s noch nahezu identisch, bei 2,4 s zeigten sich jedoch Abweichungen, was als zeitgleiches Neueinsetzen der BPs mit später divergierendem Verlauf je nach Zeitabstand gewertet werden kann. Dies spiegelte sich auch in dem Ergebnis der Interaktion Zeitfenster x Mindestzeitabstand wider, $F_{(3,45)} = 6,8$, $\epsilon = 0,87$, $p = 0,001$, woraus sich eine separate Analyse der Mindestzeitabstände bei 1,4 s ($F_{(3,45)} = 0,3$, n. s.) und bei 2,4 s ($F_{(3,45)} = 4,8$, $\epsilon = 0,63$, $p = 0,02$) ergab. Die Zählbedingung (Zählen versus Nicht-Zählen) hatte hierbei keinen signifikanten Effekt auf die dem Mausklick nachfolgenden Potentiale, alle Effekte dieses Faktors lagen bei $F \leq 1,4$, $p \geq 0,25$.

Gesamtmittelwerte an Cz nach der Bewegung

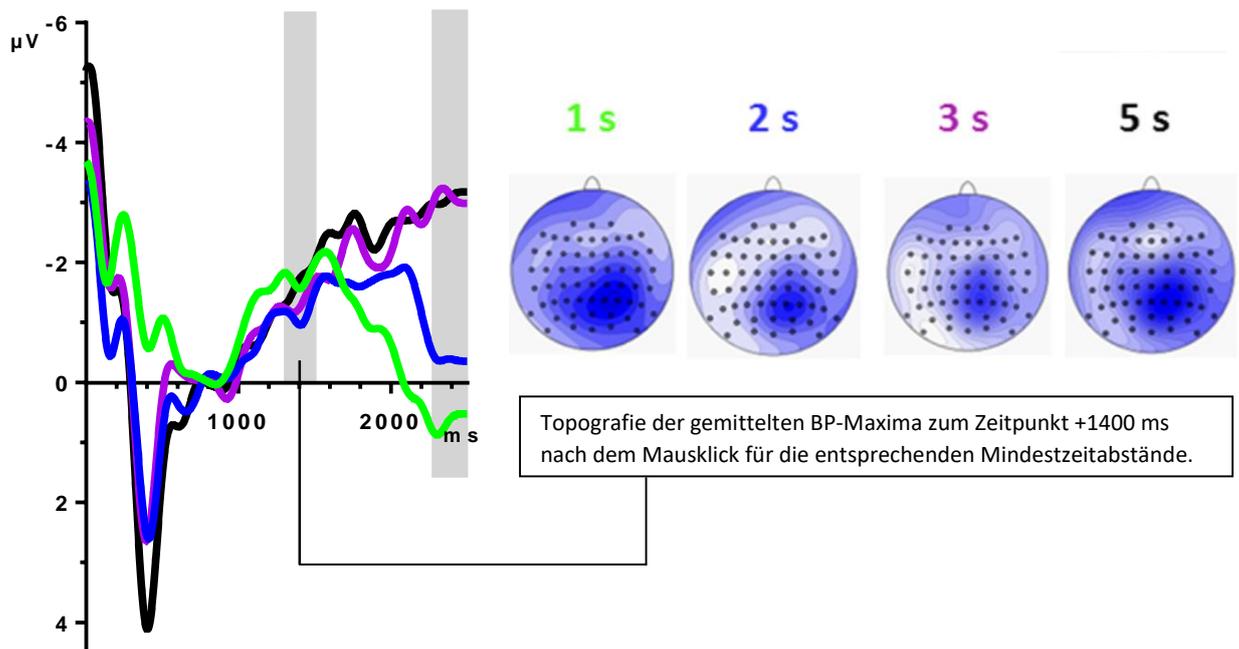


Abbildung 19: Effekte der Variation geforderter Mindestzeitabstände auf die BPs in dem Zeitraum von 2,5 s nach der Bewegung. Zu sehen sind die Gesamtmittelwerte über der Elektrode Cz für $n = 16$ Versuchspersonen. Die EEG-Daten beider Zählbedingungen wurden zusammengefasst. Die hellgrauen Balken stellen die Analysefenster für die BP-Amplitude dar. Als bedingungsspezifische Grundlinie dienen die gemittelten Werte des Zeitfensters +700 bis +900 nach dem Mausklick bei $t = 0$ ms.

Abbildung 20: Topografische Verteilung der Spannung über den einzelnen Elektroden bei +1400 ms nach der Bewegung.

3.1.3.2 Effekte durch variierende Zählbedingungen

Die Gesamtmittelwerte der den Mausklicks vorgelagerten Bereitschaftspotentiale ($n = 14$) sind in Abbildung 21 zu sehen. Gezeigt sind die Zählbedingung (die Instruktion, die verstrichenen Sekunden in Gedanken mitzuzählen) und die Nichtzählbedingung (das Mitzählen zu unterlassen) in separaten Graphen. Wie aus der Abbildung ersichtlich, hatten die verschieden lautenden Versuchsanweisungen bezüglich des Mitzählens der Sekunden keinen signifikanten Effekt, beeinflussten also weder die BP-Amplitude (in allen Fällen war $F \leq 1,6$, $p \geq 0,22$) noch die BP-Startpunkte (in jedem Fall war $F \leq 2,1$, $p \geq 0,16$) oder BP-Latenzen (in jedem Fall war $F \leq 0,8$, $p \geq 0,42$). Die Zählbedingung hatte ebenfalls keinen signifikanten Effekt auf die dem Mausklick nachfolgenden Bereitschaftspotentiale. Hier lagen alle Effekte bei $F \leq 1,6$, $p \geq 0,22$.

Gesamtmittelwerte der Zählbedingungen im direkten Vergleich

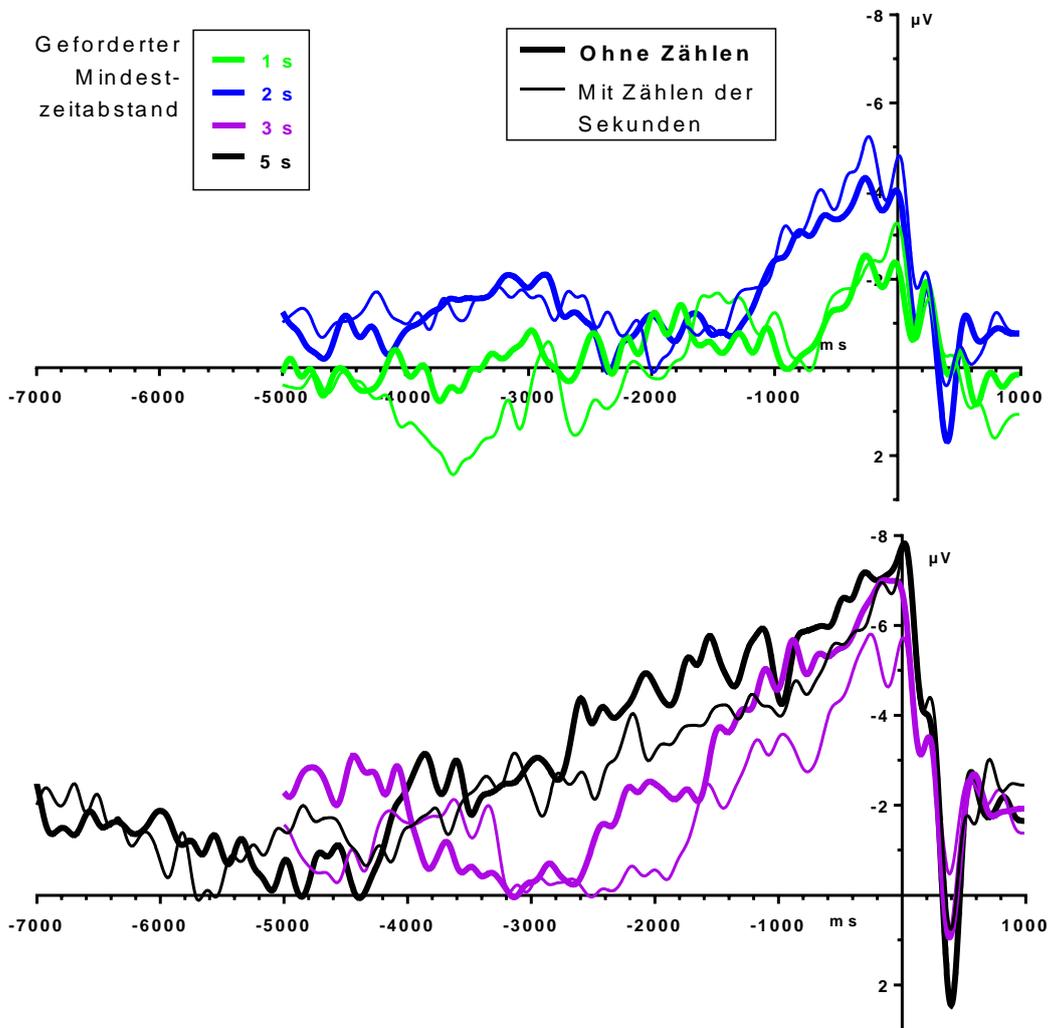


Abbildung 21: Effekte der beiden Zählbedingungen: Zu sehen sind die über alle Probanden und alle Epochen gebildeten Gesamtmittelwerte von $n = 14$ Versuchspersonen, exemplarisch gemessen an Cz. Bei $t = 0$ ms liegt der Mausklick, resultierend aus der freiwilligen Bewegung. Für die bessere Darstellbarkeit wurden die kürzeren Mindestzeitabstände (1 s und 2 s) und längeren Mindestzeitabstände (3 s und 5 s) separat abgebildet, erstere oben, letztere unten. Die kräftigeren Linien stehen für die Bedingung, in der das gedankliche Mitzählen der Sekunden ausdrücklich unterlassen werden sollte, die feineren Linien für die Bedingung, in der mitgezählt werden sollte.

3.2 Experiment 2

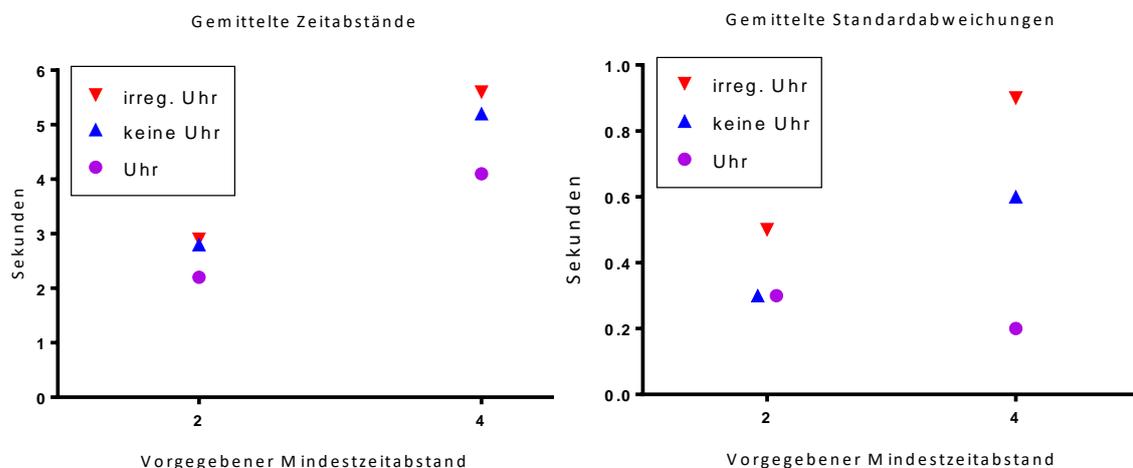
3.2.1 Verhalten

Auch für Experiment 2 wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der tatsächlichen Zeitabstände zwischen den Mausklicks für jeden der 12 Versuchsteilnehmer ermittelt.

Die Abbildungen 22 und 23 zeigen die über alle Versuchspersonen gebildeten mittleren Zeitabstände und Standardabweichungen und stellen die drei Uhrbedingungen, welche ein unterschiedliches Maß an innerer Zeitschätzung hervorrufen sollten, sowie die beiden verschiedenen Mindestzeitabstände gegenüber. Die Mittelwerte des Klickverhaltens betrugen in der Bedingung mit 2 s Mindestzeitabstand (linke Grafik) 2,2, 2,8, und 2,9 s (für die Bedingungen mit Uhr ticken, ohne Uhr ticken und mit irregulärem Uhr ticken) und in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand (rechte Grafik) 4,1, 5,2 und 5,6 s. Wie erwartet wurden die Zeitabstände zwischen den Mausklicks erneut umso größer, je größer die geforderten Mindestzeitabstände waren, $F_{(1,11)} = 1297,0$, $p < 0,001$. Auch die Variation der Uhrbedingungen wies einen signifikanten Effekt auf die gemittelten Zeitabstände auf, $F_{(2,22)} = 28,0$, $\epsilon = 0,78$, $p < 0,001$ für den Haupteffekt; $F_{(2,22)} = 23,2$, $\epsilon = 0,83$, $p < 0,001$ für die Interaktion. Die Auswirkungen zeigten sich ausgeprägter in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand ($F = 38,1$, $p < 0,001$) als in der Bedingung mit 2 s Mindestzeitabstand ($F = 13$, $p = 0,001$). Zwischen der Bedingung, in der kein Uhr ticken zu hören war, und derjenigen mit irregulärem Uhr ticken gab es keinen signifikanten Unterschied (in keinem Fall war $F > 3,6$ und $p < 0,085$).

Die gemittelten Standardabweichungen betrugen in der Bedingung mit 2 s gefordertem Mindestzeitabstand 0,3, 0,3 und 0,5 s (für die Bedingungen mit Uhr ticken, ohne Uhr ticken und mit irregulärem Uhr ticken) und in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand 0,2, 0,6 und 0,9 s. Der Faktor Uhrbedingung zeigte einen signifi-

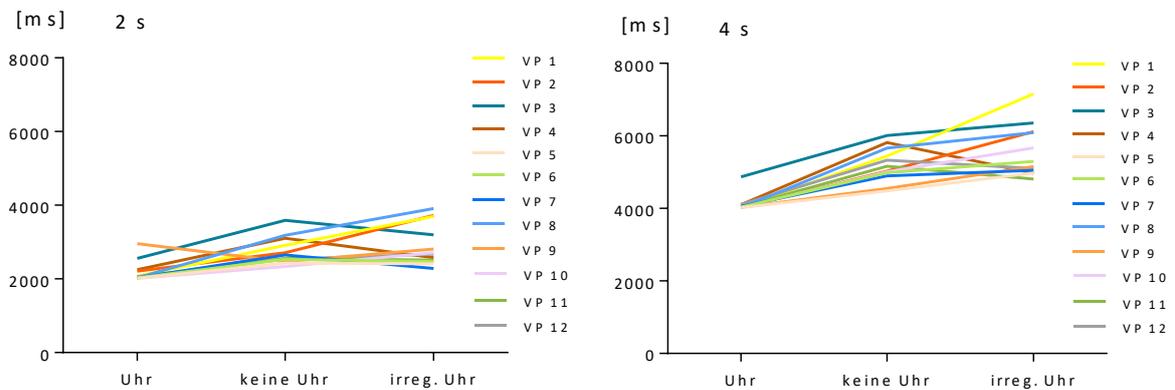
Die Uhrbedingungen im direkten Vergleich



Abbildungen 22 und 23: Über alle Versuchspersonen gebildete mittlere Zeitabstände und Standardabweichungen. Die mittleren Zeitabstände nahmen mit größerem geforderten Mindestzeitabstand sowie bei größerer Notwendigkeit innerer Zeitschätzung (die sich aus den variierenden Uhrbedingungen ergab) zu. Gleiches galt im Mittel für die SD.

kanten Effekt, $F = 44,7$, $\epsilon = 0,79$, $p < 0,001$. Dieser Effekt wurde mit größer werdendem Mindestzeitabstand ausgeprägter (Uhrbedingung x Mindestzeitabstand $F_{(2,22)} = 23,0$, $\epsilon = 1,0$, $p < 0,001$), sodass die Uhrbedingung bei zweisekündigem Mindestzeitabstand $F = 11,3$, $p = 0,001$, bei viersekündigem Mindestzeitabstand jedoch $F = 54,4$, $p < 0,001$ war. Ob in der zweisekündigen Bedingung die Uhr tickte oder nicht, machte keinen Unterschied ($p = 0,963$). Die SD nahmen mit den größer werdenden Mindestzeitabständen ($F_{(1,11)} = 45,3$, $p < 0,001$) zu, allerdings weniger ausgeprägt bei eingespieltem zuverlässigem Uhricken ($F_{(1,11)} = 1,9$, $p = 0,192$). Hier ist in Grafik 23 und 26 sogar eine Abnahme der SD bei 4 s Mindestzeitabstand im Vergleich zu 2 s Mindestzeitabstand erkennbar. In den Abbildungen 24 und 25 sind die mittleren Zeitabstände eines jeden Versuchsteilnehmers pro Uhrbedingung abgebildet. Abbildung 24 zeigt die SD der Zeitabstände für die verschiedenen Versuchsbedingungen im direkten Vergleich. Wie ersichtlich gab es keine Versuchspersonen mit grob abweichenden Werten.

Mittelwerte der Zeitabstände pro Uhrbedingung



Abbildungen 24 und 25: Mittelwerte zeitlicher Abstände eines jeden in der Analyse eingeschlossenen Versuchsteilnehmers ($n = 12$) für die verschiedenen Uhrbedingungen (x-Achse). Bedingung mit 2 s (links) und 4 s (rechts) gefordertem Mindestzeitabstand.

Standardabweichungen der Zeitabstände

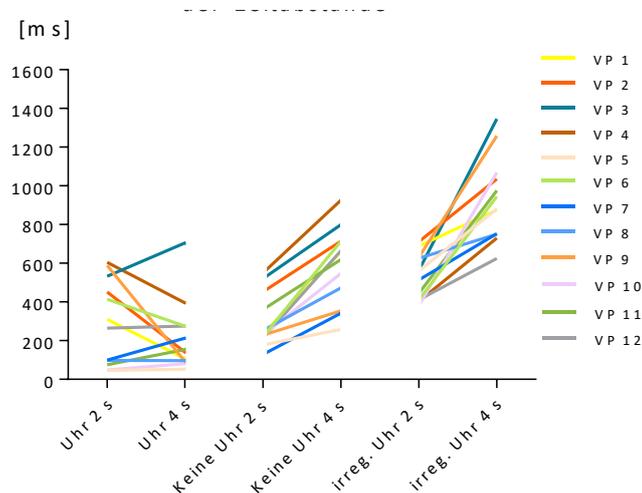


Abbildung 26: Standardabweichungen der tatsächlichen Zeitabstände je Versuchsbedingung.

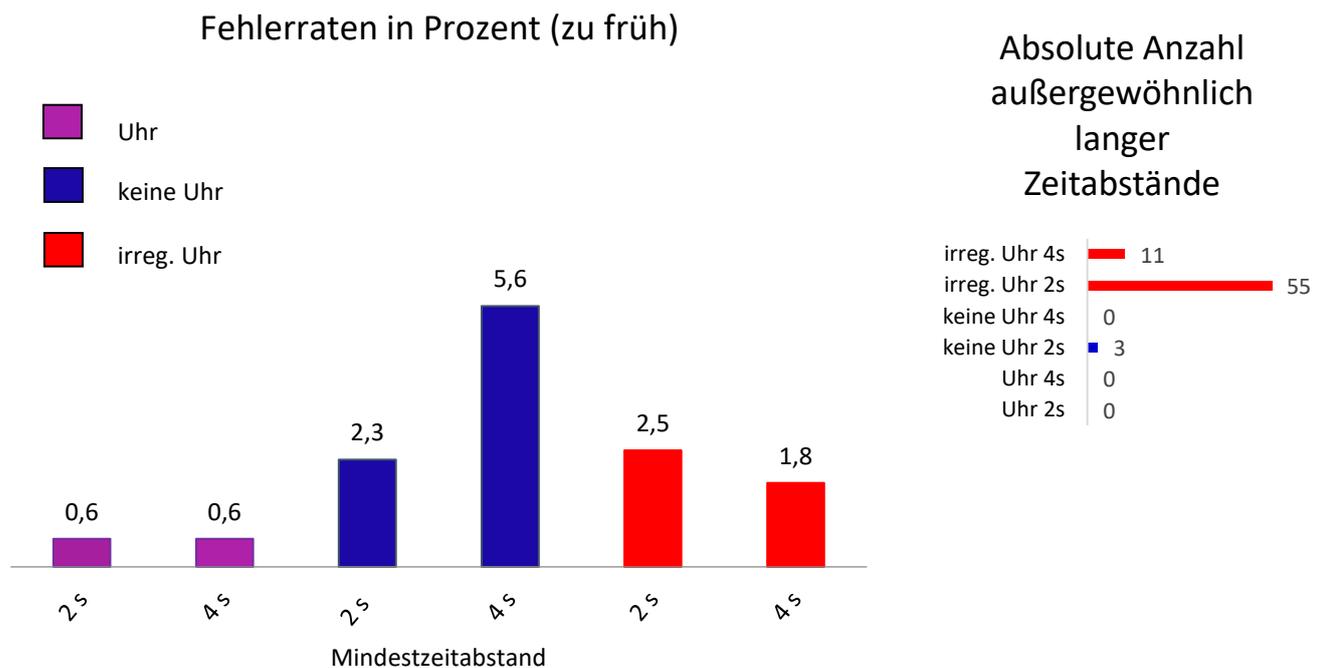


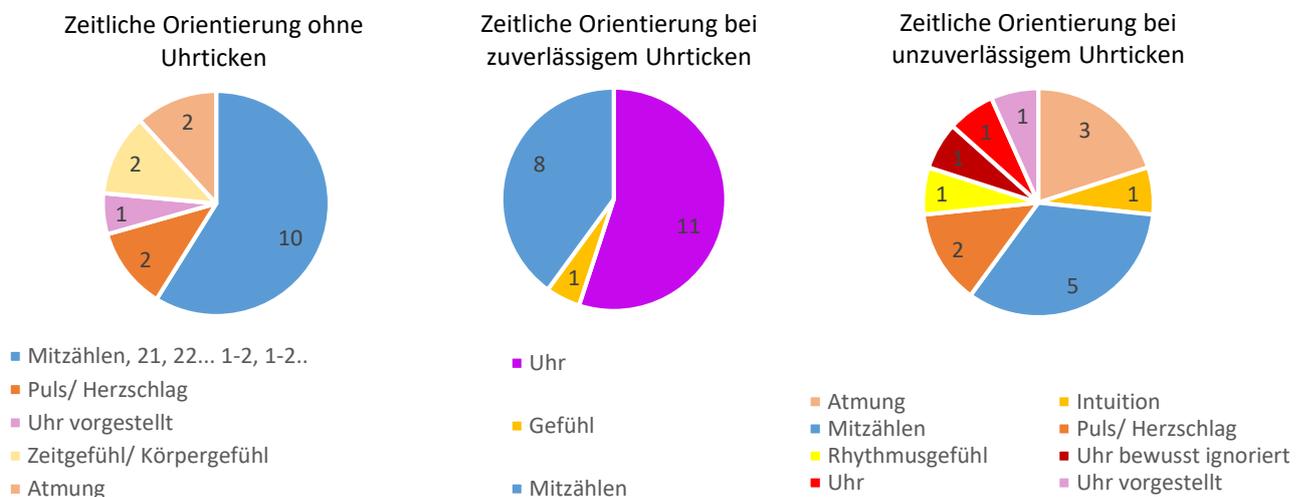
Abbildung 27: Fehlerraten in Prozent pro Uhrbedingung und pro geforderten Mindestzeitabstand im Vergleich. Rechts eingeblendet sind außerdem die erfassten Durchgänge, in denen Versuchspersonen länger als 5 s (in der Bedingung mit 2 s Mindestzeitabstand) und länger als 10 s (in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand) abwarteten.

In Abbildung 27 ist die Rate der Durchgänge, in denen zu früh gedrückt und somit der geforderte Mindestzeitabstand unterschritten wurde, in Prozent visualisiert. In der Bedingung, in der die Versuchspersonen kein Uhr-ticken zur Orientierung vorgespielt bekamen und mindestens 4 s zwischen Bewegungen verstreichen lassen sollten, wurde mit 5,6 % die größte Fehlerrate erreicht. Wie anzunehmen war, traten in den Szenarien mit zuverlässig tickender Uhr – unabhängig von dem vorgegebenen Mindestzeitabstand – weniger fehlerhafte Durchgänge auf (im paarweisen Vergleich mit der Bedingung ohne Uhr-ticken war $t \leq -2,5$, $p \leq 0,03$ bei 2 s und 4 s Mindestzeitabstand und mit der Bedingung mit irregulärem Uhr-ticken $t = -2,5$, $p = 0,03$ bei 2 s Mindestzeitabstand und $t = -2,1$, $p = 0,06$ bei 4 s Mindestzeitabstand). Dies spiegelte sich auch in den Ergebnissen der ANOVA mit Messwiederholung wider, in der der Faktor Uhrbedingung signifikante Auswirkungen auf die Fehlerrate hatte ($F_{(2,22)} = 7,4$, $\epsilon = 0,60$, $p = 0,01$), der Faktor Mindestzeitabstand jedoch nur in Abhängigkeit von der Uhrbedingung einer Rolle spielte (Haupteffekt: $F = 2,4$, $p = 1,53$, Interaktion mit der Uhrbedingung: $F = 8,7$, $p = 0,004$): Zwischen der Bedingung ohne Uhr-ticken und mit irregulärem Uhr-ticken ließ sich nur bei dem längeren Mindestzeitabstand von 4 s ein signifikanter Unterschied feststellen ($t = 2,7$, $p = 0,02$). Oben rechts in Abbildung 27 ist für jede Versuchsbedingung die Anzahl an Durchgängen, bei denen außergewöhnlich viel Zeit zwischen zwei Bewegungen abgewartet worden war, erfasst. Bei vorgegebenem Mindestzeitabstand von 2 s wurde die Grenze bei 5 s festgesetzt, bei 4 s Mindestzeitabstand galten mehr als 10 s Zeitabstand als erfassenswert. Interessanterweise waren vor allem bei der Uhrbedingung mit irregulärem Uhr-ticken die Zeitabstände besonders lang.

3.2.2. Fragebogen

Von den 12 Versuchsteilnehmern fiel 10 Probanden (83,3 %) die Umsetzung der Aufgabenstellung am schwersten, während das irreguläre Urticken über Lautsprecher eingespielt wurde ($\bar{x}^2 = 5,3$, $p = 0,021$). Je eine Versuchsperson (je 8,3 %) nannte hingegen die Bedingung ohne Urticken bzw. mit regulärem Urticken als schwierigste Bedingung (jeweils $\bar{x}^2 = 8,3$, $p = 0,004$). Bei regulärem Urticken orientierten sich die Versuchspersonen im Mittel zu 84,6 % am Ticken der Uhr, bei irregulärem Urticken zu 15,4 %. Das Ignorieren der Uhr gelang den meisten also nicht vollständig.

Für die nachfolgende Frage bezüglich Strategienennungen konnte mehr als eine Antwort im Freitext gegeben werden. Die Ergebnisse für die drei Uhrbedingungen sind in den Kreisdiagrammen aus den Abbildungen 27, 28 und 29 visualisiert. Wenn kein Urticken zu hören war, also keinerlei externe Hilfestellung zur zeitlichen Orientierung gegeben wurde, gaben 10 (83,3 %) der Versuchsteilnehmer an, in Gedanken mitgezählt zu haben (z. B. in dem sie sich innerlich „21, 22, 23...“ oder „1-2, 1-2, 1-2...“ vorsagten) und darin innere zeitliche Orientierung gefunden zu haben, jeweils zwei Teilnehmer (je 16,7 %) gaben an, sich an ihrer Atmung, ihrem Puls oder Herzschlag oder einem inneren „Zeitgefühl“ oder „Körpergefühl“ orientiert zu haben, eine Versuchsperson (8,3 %) gab an, sich eine Uhr vorgestellt zu haben. War das reguläre Ticken der Uhr zu hören (als zuverlässige externe Hilfestellung zur zeitlichen Orientierung), gaben 11 der 12 Versuchsteilnehmer (92 %) an, sich vor allem an dem Urticken orientiert zu haben, acht (66,6 %) erwähnten zusätzliches inneres Mitzählen, welches sich häufig auf das hörbare Ticken bezog, und eine Versuchsperson (8,3 %) handelte auch nach Gefühl. War das irreguläre Urticken (Störfaktor, der vermehrt innere Zeitschätzung notwendig machen sollte) zu hören, nannten fünf Versuchsteilnehmer (41,7 %) inneres Mitzählen als Strategie, drei (25 %) orientierten sich an ihrer Atmung, zwei (16,7 %) an ihrem Puls oder Herzschlag und je eine Versuchsperson (8,3 %) gab an, sich auf ihr Rhythmusgefühl oder ihre Intuition zu verlassen, sich irgendwie doch an dem Urticken zu orientieren, sich Urticken vorzustellen oder aber die irregulär tickende Uhr bewusst zu ignorieren.



Abbildungen 27, 28 und 29: Absolute Anzahl der Nennungen einer Strategie zur zeitl. Orientierung pro Uhrbedingung.

3.2.3 Bereitschaftspotential

Die Gesamtmittelwerte für die BPs aus Experiment 2 sind in Abbildung 30 gezeigt. Die BPs wurden erneut über den Mittellinienelektroden FCz, Cz, CPz und Pz gemessen (siehe topografische Karten der Abbildung 31). Beim BP-Maximum, gemessen in einem Zeitfenster von 200 ms um den Zeitpunkt -200 ms vor dem Mausklick, erreichte das BP über Pz die kleinsten Amplitudenwerte ($F_{(3,33)} = 4,8$, $\epsilon = 0,86$, $p = 0,01$). Wie die Abbildung mit den Gesamtmittelwerten zeigt, ähneln sich die Kurvenverläufe der BPs, die unter Variation der Uhrbedingung gemessen wurden, stark (beim BP-Maximum war der Effekt der Uhrbedingung: $F_{(2,22)} = 0,61$, $\epsilon = 0,94$, $p = 0,55$). Insbesondere erscheint weder das BP bei regulärem Urticken kleiner als das BP, welches ohne Urticken gemessen wurde, noch erscheint das BP bei irregulärem, irritierendem Urticken größer als die BPs der beiden anderen Bedingungen. Auch der Faktor Mindestzeitabstand hatte hier keinen Effekt auf die Höhe des BP-Maximums ($F_{(1,11)} = 0,002$, $p = 0,97$). Hier sind die Auswirkungen der Wahl der Bezugslinie wieder mitzubedenken, die hier als mittlere Amplitude der ersten 100 ms der Epoche definiert wurde. Sogar bei Untersuchung der Amplitudenwerte des Abschnitts -1500 bis -1000 ms vor der Bewegung,

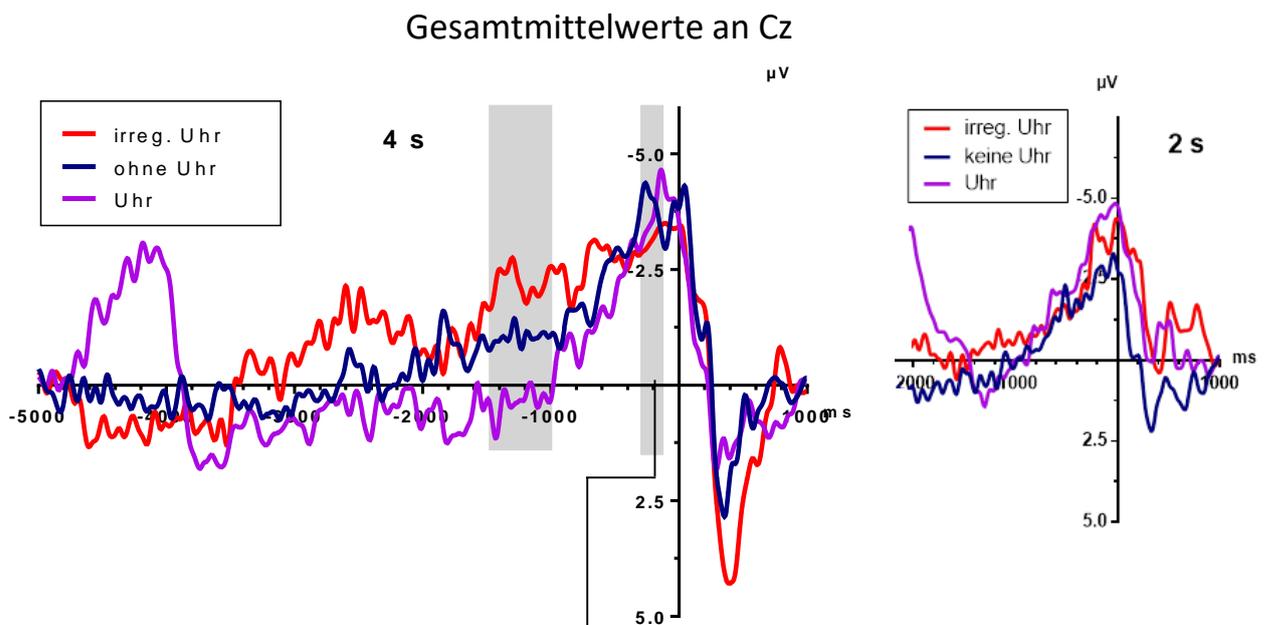


Abbildung 30: Effekte der Variation eingespielten Urtickens auf die BPs vor der Bewegung exemplarisch an Cz ($n = 12$). Als Grundlinie dienen die Messwerte der ersten 100 ms der Epoche. Zum Zeitpunkt 0 fand der Mausklick statt. Die hellgrauen Balken markieren die Analysefenster für die Amplitude am BP-Gipfel und im Zeitraum -1500 bis -1000 ms vor der Bewegung. Links sind die Gesamtmittelwerte bei 4 s Mindestzeitabstand, rechts bei 2 s Mindestzeitabstand gezeigt.

Topografie der BP-Maxima im Zeitraum -300 bis -100 ms vor dem Mausklick.

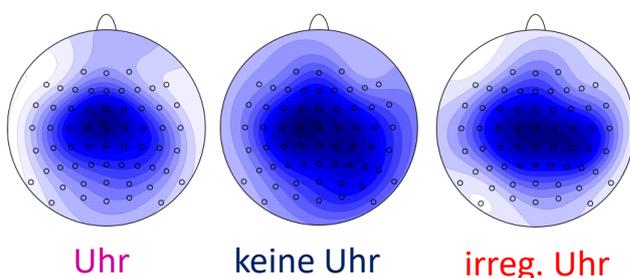


Abbildung 31: Topografische Verteilung der Spannung an den gemittelten BP-Maxima für die drei Uhrbedingungen, gemessen gegen die Grundlinie. Bedingung mit 4 s Mindestzeit-abstand (für Topografie bei 2 s siehe Anhang). Ansicht von oben, im Zentrum befindet sich die Elektrode Cz.

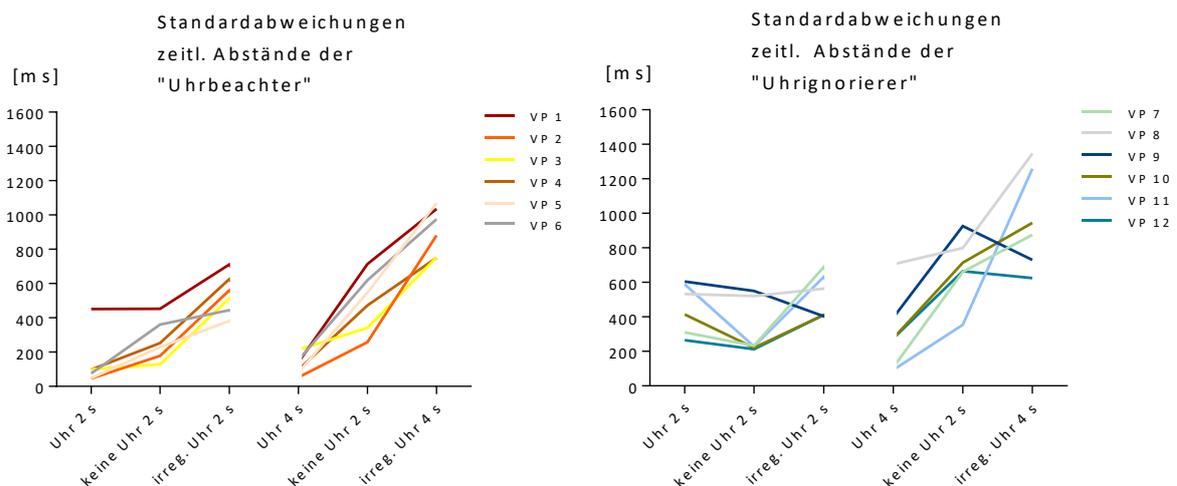
der vor allem in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand am ehesten Unterschiede zu enthalten schien, konnte kein signifikanter Effekt des Faktors Uhrbedingung gefunden werden ($F_{(2,22)} = 1,85$, $\epsilon = 0,61$, $p = 0,2$). Da es keine signifikanten Effekte einer Interaktion zwischen den Faktoren Mindestzeitabstand und Uhrbedingung gab ($F = 0,99$, $p = 0,36$), wurde die 4 s-Bedingung nicht separat auf Unterschiede bei -1500 bis -1000 ms vor der Bewegung untersucht.

3.2.3.1 Analyse von Untergruppen

Bei Betrachtung des Verhaltens der 12 Versuchspersonen fiel auf, dass sich einige Versuchsteilnehmer nicht wie erwartet nach der Uhr richteten. Diese Erwartung beinhaltete, dass bei hörbarem zuverlässigem Uhrtickern im Vergleich zum fehlenden Uhrtickern die Standardabweichung abnehmen sollte sowie bei Einspielen eines Störfaktors die Standardabweichung im Vergleich zum fehlenden Uhrtickern zunehmen sollte. Bei der nachträglichen Suche nach weiteren Effekten auf das BP wurde der Datensatz so geteilt, dass eine Untergruppe entstand, die sich bei beiden Zeitvorgaben (2 s und 4 s Mindestzeit) „nach der Uhr richtete“, d. h. deren Standardabweichung bei zuverlässiger externer zeitlicher Orientierungshilfe abnahm (= Differenz < 0, unabhängig vom Mindestzeitabstand), und eine, die diese Hilfestellung bei mindestens einer der beiden Zeitvorgaben ignorierte (Differenz > 0). Die Standardabweichungen, auf deren Grundlage die Bildung der zwei Gruppen begründet waren, sind in den Abbildungen 32 und 33 gezeigt. Es ergab sich, dass die beiden Untergruppen gleich groß waren (jeweils $n = 6$).

In der ANOVA der gemittelten SDs der Zeitabstände zwischen Mausclicks waren der Effekt der Uhrbedingung

Bildung zweier Untergruppen:

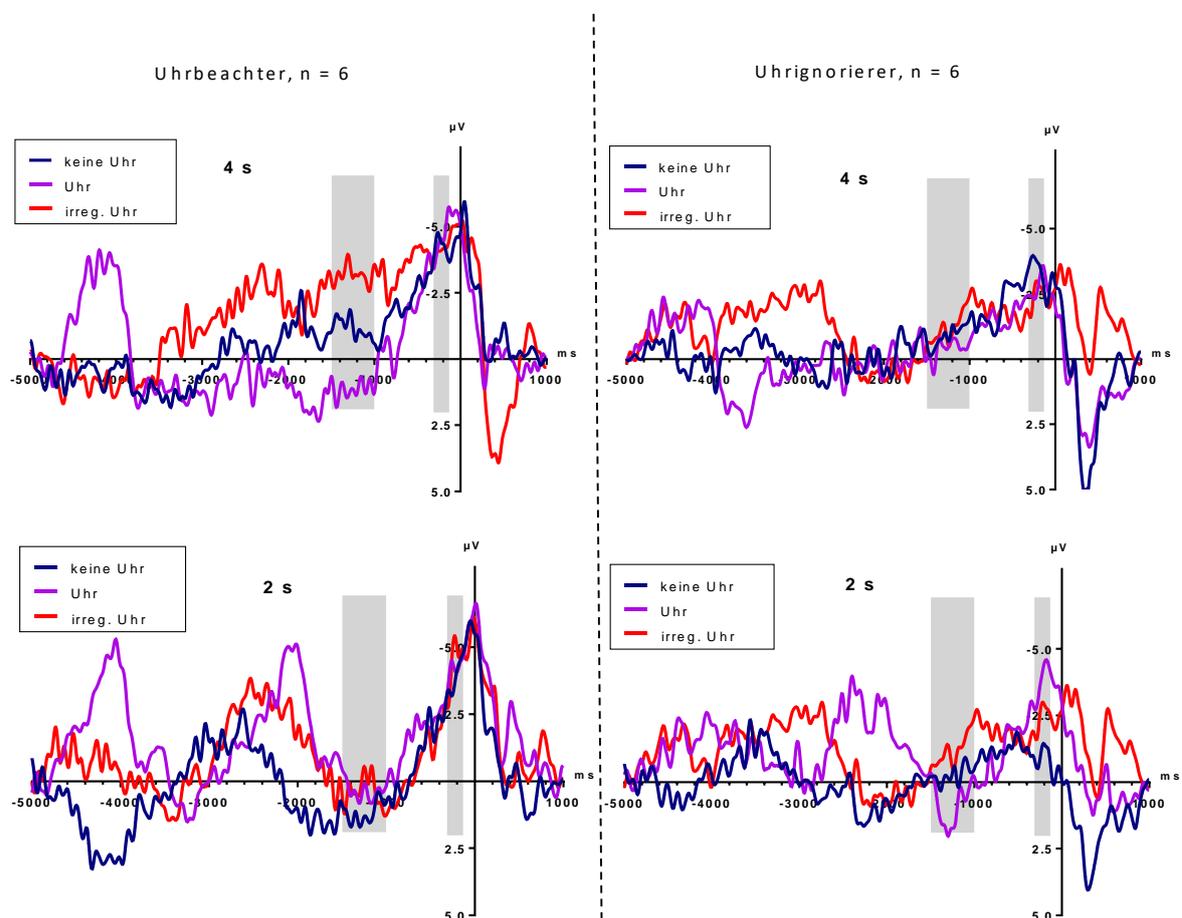


Abbildungen 32 und 33: Standardabweichungen der Zeitabstände für die Untergruppe, die sich immer nach der Uhr richtete (linke Grafik) und die Untergruppe, die es in zumindest in einer Bedingung nicht tat (rechte Grafik). Innerhalb einer jeden Abbildung sind links die verschiedenen Uhrbedingungen bei 2 s Mindestzeitabstand und rechts die Uhrbedingungen bei 4 s Mindestzeitabstand gezeigt.

($F_{(2,22)} = 53,6$, $\epsilon = 0,68$, $p < 0,001$) und der Untergruppe signifikant ($F_{(1,11)} = 243,9$, $p < 0,001$). Eine Interaktion dieser beiden Faktoren, die die von uns gewählte Aufspaltung in der zwei Gruppen widerspiegeln würde, fand sich jedoch nicht (Uhr-Bedingung x Untergruppe: $F_{(2,28)} = 3,2$, nach Greenhouse-Geisserkorrektur $p = 0,09$).

Bei Betrachtung der Gesamtmittelwerte dieser Untergruppen, zu sehen in Abbildung 34, fallen folgende mögliche Unterschiede auf: Insgesamt scheinen die BP-Gipfel bei der uhrbeachtenden Gruppe höhere Amplitudenwerte zu erreichen als die Gruppe, die die Uhr ignoriert, unabhängig vom vorgegebenen Mindestzeitabstand. Nach der Bewegung scheint die dann ausgelöste Positivierung bei der uhrbeachtenden Untergruppe kleiner (mit Ausnahme der Bedingung mit irregulär tickender Uhr in der 4 s Bedingung) als bei der uhrignorierenden (bei etwa +400 ms). Die BP-Gipfel erscheinen jedoch innerhalb einer jeden Untergruppe recht unbeeinflusst durch die verschiedenen Uhrbedingungen.

Gesamtmittelwerte der gebildeten Untergruppen je Mindestzeitabstand



Abbildungen 34: Gesamtmittelwerte der beiden Untergruppen aus Experiment 2 an Cz. Die Aufteilung des Gesamtdatensatzes in zwei Untergruppen (je $n = 6$) erfolgte je nachdem, ob die Standardabweichung der Zeitabstände mit Schwierigkeit der Zeitschätzung (Uhr < keine Uhr < irreguläre Uhr) zunahm oder nicht. Links kommt die Untergruppe zur Darstellung, die sich „nach der Uhr richtete“, also durchgehend größere Standardabweichungen mit schwierigeren Begleitumständen für die Zeitschätzung aufwies. Rechts ist die Untergruppe, die „die Uhr ignorierte“ dargestellt. Oben sind jeweils die Datensätze bei 4 s, unten bei 2 s Mindestzeitabstand abgebildet. Die hellgrauen Balken markieren die analysierten Zeitabschnitte.

Unterschiede mögen allenfalls in der uhrignorierenden Gruppe bei 2 s Mindestzeitabstand zu sehen sein. In der uhrignorierenden Gruppe sind augenscheinlich sonst keine weiteren Abweichungen in den BPs der drei Uhrbedingungen auszumachen.

In der uhrachtenden Untergruppe sieht es so aus, als würden die BPs bei irregulärem Urticken früher ansteigen (bei etwa -3000 ms). Die BPs, die ohne jegliches Einspielen von Urticken aufgenommen wurden, beginnen etwas später, noch später wiederum, bei etwa -1000 ms, die BPs mit regulär tickender Uhr. Am ehesten lassen sich Effekte durch den Faktor Uhrbedingung auf die Amplitude im Bereich -1500 bis -1000 ms in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand vermuten. Diese nachträglichen Beobachtungen wurden einer statistischen Analyse zugeführt. Da der Fokus auf Auswirkungen auf die BP-Amplitude lag, wurde die BP-Positivierung nach der Bewegung nicht weiter untersucht.

Was den BP-Gipfel anbelangte, bestätigte sich der Eindruck, dass die uhrignorierende Gruppe niedrigere Werte erreichte (der Effekt des Faktors Untergruppe betrug $F_{(1,11)} = 11,4$, $p = 0,007$). Signifikante Interaktionen mit dem Parameter Uhrbedingung ließen sich jedoch nicht finden (Uhrbedingung x Untergruppe $F = 0,13$, $p = 0,86$). Der Faktor Elektrode war signifikant $F_{(3,33)} = 4,8$, $\epsilon = 0,9$, $p = 0,01$. Bezüglich des Effekts auf die gemittelte Amplitude im Zeitraum -1500 ms bis -1000 ms lag, nachdem eine Interaktion von Mindestzeitabstand x Uhr x Untergruppe knapp das Signifikanzniveau verfehlte ($F_{(2,22)} = 4,2$, Greenhouse-Geisser korrigierter p-Wert: 0,52), in der Bedingung mit 4 s Mindestzeitabstand keine Signifikanz für die Interaktion Uhrbedingung x Untergruppe vor, $F_{(1,11)} = 1,1$, $p = 0,33$.

4 Diskussion

Bislang war das Bereitschaftspotential (BP) vor allem mit Bewegungsvorbereitung in Verbindung gebracht worden. Die Experimente dieser Arbeit basierten hingegen auf einer anderen Idee, die auf der Beobachtung beruhte, dass in bisherigen Arbeiten über das BP die Versuchspersonen ihre freiwilligen Bewegungen paradoxerweise innerhalb eines doch explizit oder implizit vorgegebenen zeitlichen Rahmens ablaufen lassen sollten. Die Hypothese lautete daher, dass das BP einen durch die Versuchspersonen initiierten neuronalen Prozess widerspiegeln könnte, der der Durchführung der willentlich herbeigeführten Bewegung innerhalb der zeitlichen Einschränkungen dient. Im Detail könnte die Umsetzung der Aufgabenstellung dann so aussehen, dass die Probanden als Antwort auf die zeitlichen Einschränkungen eine langsame, fluktuierende, rhythmische Aktivität generieren, welche als das BP sichtbar wird, und als innere zeitliche Orientierung, wann der Zeitpunkt für die nächste Bewegung gekommen ist, dienen könnte. Der physiologische Prozess hinter dem BP entspräche dann einer inneren Uhr.

Zwei sich daraus ableitende Vorhersagen für die Validierung der Hypothese wurden aufgestellt:

(1) Das BP zeigt eine Abhängigkeit zu den zeitlichen Vorgaben; (2) Das BP verhält sich gemäß Notwendigkeit innerer Zeitschätzung.

Sie wurden in drei konkrete Erwartungen übersetzt, deren Überprüfung Gegenstand zweier Experimente waren, die unter kontinuierlichem Mitschreiben eines Elektroenzephalogramms (EEGs) durchgeführt wurden:

In dem ersten Experiment wurden die zeitlichen Rahmenbedingungen variiert und auf damit einhergehende systematische Veränderungen des BP-Kurvenverlaufs geachtet.

Erwartung I war, dass das BP mit größeren vorgegebenen Mindestzeitabständen – den Zeitabstand zwischen je zwei Bewegungen betreffend – frühzeitiger vor der Bewegung einsetzen, d. h. länger andauern bzw. an Weite zunehmen würde. Darüber hinaus wurde in Experiment 1 die in bisherigen BP-Experimenten anscheinend übliche Versuchsanweisung, das gedankliche Mitzählen der Sekunden während des Experiments zu unterlassen, mit der Anweisung, genau dieses zu tun, verglichen. Die hierhinter stehende Erwartung II entsprach der Annahme, dass bewusstes gedankliches Mitzählen womöglich andere Prozesse innerer Zeitschätzung aktivieren würde und dadurch das BP an Amplitude abnähme.

Ob das Bereitstellen einer Alternative zu innerer Zeitschätzung, sprich externe Hilfestellung zur zeitlichen Orientierung, zu einer Verringerung der BP-Amplitude führen würde, wurde in Experiment 2 untersucht und entsprach der Erwartung III. Es wurden drei Versuchsbedingungen gegenübergestellt, die in verschieden starkem Ausmaß innere Zeitschätzung erfordern sollten. So gab es eine Versuchsbedingung mit über Lautsprecher eingespieltem regulärem Urticken (wenig innere Zeitschätzung erforderlich aufgrund der Hilfestellung zur zeitlichen Orientierung von außen), eine normative Versuchsbedingung ohne jegliches Urticken und eine Versuchsbedingung mit irregulär tickender Uhr (was aufgrund des äußeren Störfaktors mehr innere Zeitschätzung erfordern sollte).

Das entscheidende Ergebnis des Experiments 1 war, dass das BP in seiner Form abhängig von zeitlichen Versuchsvorgaben war und bei längeren geforderten Mindestzeitabständen früher begann, insgesamt an Weite zunahm und höhere Amplitudenwerte erreichte. Erwartung I wurde also erfüllt. Ob die Versuchspersonen während des Experiments die Sekunden mitzählten oder nicht, ergab keinen signifikanten Unterschied, sodass Erwartung II sich nicht bestätigte.

Das Hauptergebnis des Experiments 2 war, dass von außen bereitgestellte Hilfestellung bzw. Störung der zeitlichen Orientierung die Amplitude des BP nicht signifikant beeinflusste, Erwartung III also unerfüllt blieb.

Es lässt sich sagen, dass sich mit der Bestätigung von Erwartung I die Vorhersage (1) für die Validierung der Hypothese, dass das BP einen inneren Taktgeber widerspiegeln, als zutreffend erwiesen hat. Die Daten aus Experiment 1 wurden auf zwei verschiedene Art und Weisen ausgewertet, und beide führten zu in dieselbe Richtung weisenden Ergebnissen. In der herkömmlichen Auswertung, eingeführt durch Kornhuber und Deecke in ihrer ersten Veröffentlichung über das BP aus dem Jahre 1965, bei der die kontinuierlich aufgezeichneten EEG-Daten in den Epochen vor der Bewegung betrachtet werden, begannen die BPs früher, je größer der geforderte Mindestzeitabstand war. Falls das BP, wie gemeinhin angenommen, einen Mechanismus darstellte, der ausschließlich etwas mit Bewegung zu tun hat und nicht mit Zeitschätzung, dann hätten die BPs zuverlässig im gleichen Abstand vor der Bewegung starten müssen.

In der neuen Methode der Auswertung, bei der die BPs im Zeitfenster nach der Bewegung analysiert wurden, begannen die BPs in allen Mindestzeitbedingungen zum selben Zeitpunkt mit ihrem Anstieg und erreichten innerhalb 1,4 s eine gleichhohe Amplitude. Diese Amplitudenhöhe stellte für die Bedingung mit 1 s Mindestzeitabstand das Amplitudenmaximum dar, blieb bei 2 s Mindestzeitabstand über einige Zeit konstant, bildete also ein Plateau, und stieg in den Bedingungen mit 3 s und 5 s Mindestzeitabstand nach den 1,4 s weiter an. Spiegelt das BP lediglich einen Hirnprozess wider, der ausschließlich der Bewegung/Bewegungsvorbereitung dient und keine *Timing*-Funktion innehat, hätte es unabhängig von den geforderten Mindestzeitabständen in gleichbleibender Distanz vor der zugehörigen Bewegung (also der sich dem BP anschließenden Bewegung) beginnen müssen. Oder aus einer anderen Perspektive betrachtet, hätte es, abhängig von den größeren vorgegebenen Mindestzeitabständen, in gestaffelt größer werdenden Abständen nach der vorangehenden Bewegung bei $t = 0$ ms stehen müssen. Warum sollte schließlich für Bewegungsvorbereitung ein stärkerer zeitlicher Zusammenhang zwischen dem BP-Beginn und der vorangegangenen Bewegung als zwischen dem BP-Beginn und der als nächstes folgenden Bewegung vorhanden sein?

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die BP-Amplituden mit größer vorgegebenen Mindestzeitabständen zunahm, was die Erwartung I ergänzte und für die Bestätigung der Vorhersage (1) zuträglich war. Die Amplituden wiesen hier eine starke lineare Abhängigkeit bzw. einen signifikanten linearen Kontrast auf.

Diese Erkenntnisse aus Experiment 1 müssen frühere Vorstellungen über die Funktion des BP nicht zwangsläufig entwerfen. Als Ergänzung der klassischen Annahme, dass das BP "Bewegungsvorbereitung"

darstellt, kann aber zumindest vorgeschlagen werden, dass der „Drang, sich zu bewegen“ (Libet, 1985) mit der Zeit immer stärker wird. Dies scheint aber fast noch zu kurz gegriffen, wenn man einerseits bedenkt, dass auch der „Drang, sich zu bewegen“, selbst wenn er mit der Zeit zunähme, nicht abhängig von zeitlichen Versuchsvorgaben sein sollte und er andererseits bedingungslos in einem festen zeitlichen Zusammenhang mit der Bewegung stehen sollte. Diese Interpretation kann die deutlichen Effekte variierender Mindestzeitabstände auf die BP-Latenz oder die früher einsetzenden BP-Startpunkte also nicht hinlänglich erklären.

Die berichteten Ergebnisse mögen so als Grundlage dafür dienen, die Funktionszuschreibungen des BP weiter zu fassen und eine neue Konnotation des BP-Begriffs in Erwägung zu ziehen. Hier darf wohl erneut eine Verbindung zu Beobachtungen bezüglich der SMA (supplementär motorischen Areal, engl. supplementary motor area) und ihrer Rolle bei der Zeitschätzung hergestellt werden (Schubotz et al., 2000; Coull et al., 2004, 2015; Merchant et al., 2011, 2015). Insbesondere erscheint hier die Theorie, dass die SMA eine Art Zeit-Hochzahl-Funktion (engl. time accumulator) aufweist (Merchant et al., 2011), passend. Auch dürfen die Ergebnisse dahingehend gedeutet werden, dass sie die weitreichende Interpretation, dass BP könne als Argument gegen die Existenz von Willensfreiheit gelten, nicht stützen. Einerseits können sie Hinweis dafür sein, dass Funktionszuschreibungen des BP über den Bereich Bewegungsvorbereitung hinausgehen und somit das Fundament, auf dem der hypothetische Überbau steht, ein Stück weit verändern. Andererseits können die eingangs geschilderten Beobachtungen, dass es in BP-Versuchen der Vergangenheit durchaus zeitliche Rahmenbedingungen gab, der klassischen Versuchsbedingung bis zu einem gewissen Grad ihre Freiheit absprechen. Sicher sind weitere Folgeexperimente in diese Richtung sinnvoll, um Überlegungen dieser Art zu bestärken.

Im Rahmen der Publikation eines Artikels mit den Daten aus Experiment 1 wurde diskutiert, ob die Mindestzeitabstände zwischen den Bewegungen möglicherweise zu kurz vorgegeben waren, und erst mit den Abständen von 15 s und mehr – wie in der Originalarbeit von Kornhuber und Deecke (1965) gefordert – das wahre BP gemessen werden könne (Verleger et al. 2016). Diese deutlich längere Zeitspanne könnte mit technischen Grenzen der Darstellbarkeit zusammenhängen oder aber für die volle Ausbildung des BP notwendig sein. Somit wäre auch denkbar, dass erst dieses „wahre BP“ konstant zum gleichen Zeitpunkt vor der Bewegung einsetzt, und die bei uns gemessenen negativen Potentiale nur BP-ähnliche Phänomene waren. Die Entwicklung eines „wahren BP“ könnte auch schon bei kürzeren Mindestzeitabständen vorliegen, müsste auf Grundlage unserer Daten dann aber zumindest 5 s betragen. Auch individuell verschiedene oder durch Einflüsse veränderbare Zeitspannen bis zur Ausprägung eines „wahren BPs“ wären denkbar, was klinische Relevanz haben könnte. Für weitere Überlegungen in diese Richtung müsste aber zunächst grundsätzlich überprüft werden, ob ab irgendeinem vorgegebenen Mindestzeitabstand das BP keine Abhängigkeit zu zeitlichen Vorgaben mehr aufweist. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen bislang nicht darauf schließen. So würden wir annehmen, dass sich sowohl in der Mindestzeitbedingung von 5 s (mit einem tatsächlichen Zeitabstand von durchschnittlich 7 s), als auch in der Bedingung mit Mindestzeitabständen von 15 s (Kornhuber und Deecke, 1965) ein BP ausbilden kann. Weiterhin würden wir für ein Experiment, welches

diese beiden Bedingungen miteinander vergliche, ein signifikant früher einsetzendes BP in letzterer Bedingung erwarten. Ob sich die BPs bei gestaffelten Mindestzeitabständen, die 15 s oder länger andauern, anders verhielten, müssten dann ebenso überprüft werden. Freilich würde eine Kritik, dass die in dieser Dissertation gemessenen Potentiale aufgrund der kurzen Abstände zwischen Bewegungen nur BP-ähnliche Phänomene seien, auch auf zahlreiche weitere BP-Literatur zutreffen, wenn man etwa den Übersichtsartikel von Shibasaki und Hallett (2006) bedenkt, in welchem von BP-Experimenten gesprochen wird, in denen die Bewegungen "once every 5 s or longer" durchgeführt werden sollten (S. 2342). Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch, dass Versuchsanweisungen betreffs zeitlicher Einschränkungen in der Literatur aufgeführt sein müssten.

Wenn man eine Grundsatzkritik an den Bereitschaftspotentialen dieser Arbeit weiterverfolgen möchte, so darf nicht unerwähnt bleiben, dass die Art und Weise, wie Bereitschaftspotentiale gemessen werden, generell störanfällig für systematische Fehler ist. Dies liegt darin begründet, dass das BP erst als gemittelt Potential durch Übereinanderlegen zahlreicher unter gleichen Bedingungen aufgenommener EEG-Epochen sichtbar wird. Mit dieser Methode lässt sich zwar das zufällig bedingte Rauschen herausrechnen. Träten jedoch in festem zeitlichen Zusammenhang mit der Bewegung Ereignisse auf, würden deren Effekte eben dieselbe Verstärkung erfahren, die man sich bei der Erfassung der BPs zu Nutze macht. Wenn man sich also ein Szenario vorstellt, in dem eine Versuchsperson zeitlich gekoppelt mit der Bewegung blinzelte, würden Effekte des Blinzelns substantiell vergrößert werden. Den Gedanken weiterverfolgend könnte man annehmen, dass den Negativierungen, die wir für BPs halten, lediglich Augenbewegungen zugrunde liegen und keine Fingerbewegungen. Eine Quellenlokalisierung nahe den Augen erscheint aber unwahrscheinlich, da die augennahen Elektroden deutlich schwächere BP-Ausschläge erfasst hatten (*siehe hierzu auch die verschiedenen topographischen Karten dieser Arbeit*). Dass der Fokus bei der weiteren statistischen Auswertung auf den Elektroden FCz bis Pz lag, war damit begründet, dass über diesen Elektroden die BP-Ausschläge am größten waren, hier also am ehesten die Quellenlokalisierung vermutet werden konnte. Außerdem hatten sich im Rahmen der Auswertung signifikante Ergebnisse teilweise nur aus Unterschieden an AFz ergeben. Dies lässt sich nicht sinnvoll mit dem BP in Verbindung bringen und legt daher den Verdacht auf artifizielle Ursachen nahe, sodass hier eine Eingrenzung der zu untersuchenden Topographie sinnvoll erschien.

Erwartung II bestätigte sich nicht. Es konnten keine Auswirkungen auf das BP durch die Instruktion, die Sekunden in Gedanken mitzuzählen oder dieses zu unterlassen, gefunden werden. Ein Grund hierfür mögen die zahlreichen, von den Versuchsteilnehmern genannten Strategien, die das Nichtmitzählen erleichtern sollten, gewesen sein. Die Orientierung etwa am Atemzyklus, an Melodien und Rhythmen könnte ähnliche Qualitäten wie das mentale Sekundenzählen haben und den Probanden ermöglichen, ein Gefühl für die Zeit zu haben. Außerdem ist zu bedenken, dass das BP, falls ihm eine gewisse zeitliche Orientierungsfunktion zugeschrieben werden kann, gleichermaßen Grundvoraussetzung für die Durchführung einer Bewegung in der Zeit, das Mitzählen von Sekunden, dem Etablieren eines Rhythmus oder einer melodischen Abfolge sein

müsste. Sie alle sind ohne Zeitgefühl nicht denkbar. Dass sich Erwartung II nicht erfüllte, muss also nicht zwangsläufig bedeuten, dass Vorhersage (2) nicht zutreffend ist. Sowohl bewusst mental zu zählen als auch innere Ersatzstrategien für zeitliche Orientierung zu etablieren, könnte den Prozess innerer Zeitschätzung, wie wir ihn teils hinter dem BP vermuten, benötigen. Denkbar ist natürlich, dass sich Unterschiede der beiden Versuchsanweisungen erst mit längeren Mindestzeitabständen ergeben hätten, sodass eine Überprüfung dahingehend Gegenstand eines Folgeexperiments sein könnte.

Aufgrund der Verhaltensdaten und des Fragebogens kann in Betracht gezogen werden, dass das Mitzählen der Sekunden es den Versuchspersonen erleichterte, sich instruktionsgemäß zu verhalten. Es kann bei vorgegebenem Mitzählen der Sekunden außerdem von zuverlässigerer innerer Beschäftigung ausgegangen werden, wenn man die Alternativen bedenkt, die sich hinter den vielen Ersatzstrategien verbergen. Unter der Annahme, dass das Mitzählen der Sekunden, wie den Ergebnissen aus Experiment 1 zu entnehmen, keine Effekte auf den Verlauf des BP hat, wären BP-Versuche, die das Mitzählen der Sekunden ausdrücklich erlauben, bezüglich der „inneren Beschäftigung“ der Versuchspersonen besser planbar und vergleichbar.

Die Daten aus Experiment 2 ergaben primär keinen Hinweis dafür, dass es einen Unterschied machte, ob das Uhr-Ticken zu hören war oder nicht. Erwartung III erfüllte sich also nicht. Die sich aus der Verhaltensanalyse ergebenden Fehlerraten und die Ergebnisse des Fragebogens können allenfalls Grund für die Annahme sein, dass das Ticken half, den geforderten Mindestzeitabstand von ungefähr 4 s zwischen den Bewegungen einzuhalten. Auch bei der nachträglichen Differenzierung in die zwei Untergruppen und der Auswertung des BP-Verhaltens separat für diese, fanden sich keine Ergebnisse, die die Erwartung III bestätigt hätten und somit Anlass geben konnten, Vorhersage (2) als zutreffend zu bewerten. Es kann argumentiert werden, dass die Aufspaltung in diese zwei Untergruppen „artifizieller“ Natur war, denn zwischen Notwendigkeit innerer Zeitschätzung und der Standardabweichung muss nicht zwangsläufig ein Zusammenhang liegen. Dass insbesondere bei längerem Mindestzeitabstand von 4 s die Standardabweichungen der überwiegenden Zahl der Versuchspersonen (10 von 12) gemäß größerer Notwendigkeit innerer Zeitschätzung zunahm, lässt diese Vermutung jedoch schlüssig erscheinen. Freilich waren die Gruppengrößen mit $n = 6$ Versuchspersonen sehr klein. Ergebnisse durch Bildung der beiden Untergruppen hätten aber richtungsweisend für Folgeexperimente sein können, daher wurde sie vollzogen und ausgewertet.

Als Randbemerkung kann erwähnt werden (s. die Kurvenverläufe bei +400 ms in Abb. 34), dass als möglicher Unterschied zwischen den beiden Untergruppen in der uhrbeachtenden Untergruppe, die mit leichteren Rahmenbedingungen für die Zeitschätzung eine geringere Standardabweichung aufwies, die Positivierung nach der Bewegung generell kleiner ausfiel als in der uhrignorierenden Untergruppe (mit Ausnahme der Uhrbedingung mit irregulärem Uhrticken). Dies lässt den Gedanken aufkommen, dass Versuchsteilnehmer ersterer Gruppe weniger auf etwas reagierten, was im Kontext des Tastendrückens bzw. der Bewegung wahrnehmbar war – möglicherweise das somatosensorische Feedback auf den erhöhten Druck beim Mausclick und/ oder der kurze Farbwechsel des schwarzen Fixationskreuz auf dem Computerbildschirm, der als Feedback implementiert worden war, und/ oder das Klickgeräusch der Computermaus. Die Positivierung

könnte also in der uhrignorierenden Untergruppe als Ereigniskorreliertes Potential (engl. event-related potential, ERP) angesehen werden. Und dass die uhrbeachtende Untergruppe (in zwei der drei Uhrbedingungen) eine deutlich weniger ausgeprägte Positivierung ausbildete, könnte mit dem Verhalten der besagten Gruppe in Verbindung stehen: nämlich stärker auf das Uhrlicken zu achten, welches keinerlei Bezug zum Mausklick bei $t = 0$ ms hatte und somit kein distinktes EEG-Potential hervorrufen konnte. Hierfür müsste die Amplitude zum Zeitpunkt der Positivierung (+400 ms) allerdings noch einmal genauer untersucht werden.

Die Ergebnisse aus Experiment 2 lassen sich nicht in Einklang mit der dieser Arbeit zugrundeliegenden Hypothese bringen, dass das BP einen Prozess widerspiegelt, der etwas mit Zeitschätzung zu tun hat. Also ist die vorläufige Schlussfolgerung aus den beiden beschriebenen Experimenten, dass das BP zwar einerseits einen variierenden Verlauf in Abhängigkeit von den zeitlichen Vorgaben für einen Mindestzeitabstand zwischen den Bewegungen zeigt, dass jedoch der Prozess, der durch das BP sichtbar gemacht wird, keine Zeitschätzung an und für sich ist.

Eine Reihe an methodischen Aspekten bedürfen einer Diskussion, im positiven wie im negativen Sinne. Zu nennen sind zum einen die Themen Datenqualität, die Bestimmung der Grundlinie (engl. baseline) und die in dieser Arbeit gewählte Definition des BP-Beginns inklusive Analyserichtung, zum anderen die hier neu etablierte Methode, das BP nicht nur vor der Bewegung, sondern auch nach der Bewegung darzustellen und zu untersuchen, die Verwendung von Fragebögen und die bei diesen Experimenten immer mit angegebene Analyse der Verhaltensparameter.

Das Erlangen einer guten Datenqualität stellte sich als größere Hürde heraus als erwartet. Natürlich muss berücksichtigt werden, dass die Methodik der Elektroenzephalographie zunächst erlernt werden musste. Bei der Durchführung der Versuche fielen jedoch keine besonderen Vorkommnisse oder Störungen auf. Es erscheint jedoch im Bereich des Möglichen, dass die in Experiment 1 verwendeten Ringelektroden aus Ag/AgCl bzw. deren Kabel Verschleißspuren aufwiesen. Zwischen Experiment 1 und 2 wurden die Elektroden vollständig ausgetauscht, und der Anteil an Versuchspersonen, die in Experiment 2 aufgrund hoher Artefaktlast ausgeschlossen werden mussten, fiel in der Folge deutlich kleiner aus (1 von 14 im Vergleich zu 5 von 25 Versuchspersonen). Als weitere Artefaktursachen, die bei der Rekrutierung der Versuchsteilnehmer und Vorbereitung der Versuche nicht weiter berücksichtigt worden waren, könnten Zahnprothesen (bei den überwiegend jungen Versuchsteilnehmern jedoch eher auszuschließen) und elektrostatische oder elektromagnetische Induktion durch Kunstfaserbekleidung eine Rolle gespielt haben. Sicherlich wäre es der Datenqualität zuträglich gewesen, wenn von Beginn an in Experiment 1 eine Wartezeit von 10 min zum Setzenlassen der Elektroden eingehalten worden wäre – eine Maßnahme, die erst zur Verbesserung der Datenqualität im Verlauf des Experiments getroffen wurde. Bezüglich der zwei verschiedenen verwendeten Elektrolytpasten in Experiment 2 kann gesagt werden, dass die eine Versuchsperson, die aufgrund der

Artefaktlast ausgeschlossen werden musste, in der Untergruppe mit der herkömmlichen und nicht mit der geliehenen Elektrolytpaste war.

Maßgeblich scheinen aber die spezifischen mit den Experimenten dieser Arbeit zusammenhängenden Versuchsbedingungen, und hier insbesondere die Länge der zu analysierenden Zeitfenster, die Beschaffenheit der Daten mitbeeinflusst zu haben. Parallel zu den BP-Experimenten dieser Arbeit liefen in denselben Räumlichkeiten Versuche zur P300-Komponente, in denen ereigniskorrelierte Potentiale in kürzeren Epochen von 1,5 s Länge untersucht wurden. Sie wiesen generell eine gute Datenqualität auf (z. B. Verleger et al., 2015; Verleger und Smigasiewicz, 2016). Bei den in dieser Dissertation vorgestellten BP-Experimenten, in denen teilweise Epochen von insgesamt 6 s Länge oder mehr untersucht wurden, kamen vermutlich die immer präsenten Gleichstrom-Drifte mehr zum Tragen. Die Entscheidung zugunsten längerer Epochen war jedoch damit begründet, dass in früherer BP-Literatur (Libet et al., 1982, 1983; Haggard und Eimer, 1999; Jo et al., 2014; Kornhuber und Deecke, 1965) der BP-Beginn oft gleich zu Anfang der Epochen zu liegen kam und so der Eindruck entstand, dass möglicherweise nicht der gesamte Verlauf der BP-Kurve miterfasst wurde. Für einen methodischen Vergleich wurden, wie in dieser Arbeit nicht weiter berichtet, auch Epochen von insgesamt 3 s Länge gebildet. Es fiel auf, dass vor allem die längeren Epochen von höherer Artefaktlast betroffen waren. Effekte, den BP-Beginn betreffend, konnten – wie basierend auf bisheriger BP-Literatur bereits vermutet – hier aber nicht festgestellt werden. Die Artefaktlast in den ausreichend langen Zeitfenstern führte zu kritischen Entscheidungen, die nicht folgenlos für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse blieben und hier genannt werden sollen: Nach Anwendung der üblichen Kriterien zur Artefaktauslese (und, wie nicht im Methodenteil berichtet, nach erfolglosen Versuchen, die Drifte mithilfe der im Programm BrainVision Analyzer verfügbaren „*Independent Component Analysis*“ als Komponente zu isolieren und zu eliminieren) erschien es unvermeidbar, bei unseren gemittelten, vor der Bewegung gemessenen EEG-Daten die im BrainVision Analyzer eingebaute Anwendung zur Linearen Trendbereinigung von Gleichstrom-Driften (engl. „Linear DC Detrending“) durchzuführen (wie im Abschnitt Material und Methoden weiter erläutert). Dies führte dazu, dass sich die Amplitudendifferenz zwischen den ersten (5 s oder 7 s vor dem Mausklick gelegenen) und letzten 100 ms (1 s nach dem Mausklick gelegenen) der Epoche verkleinerte. Da wir die Negativierung vor der Bewegung, die wir als BP ansehen, im Wesentlichen als unabhängig von linearen Trends verstehen, dürften zwar die Amplitudenwerte im Mittel näher an die Grundlinie gerückt worden sein, die Entwicklung der Amplitude aber an sich unbeeinflusst und nach der Trendbereinigung besser interpretierbar geworden sein. Verbliebene niederfrequente Entwicklungen sind also nach Bereinigung niederfrequenten Rauschens zuverlässiger dem BP zuzuordnen.

Das Problem des Rauschens mag sich durch unsere Festlegung, in Experiment 1 nur 50 Durchgänge je Versuchsbedingung durchzuführen, vergrößert haben. Die Anzahl könnte zu niedrig angesetzt worden sein. In der Folge mussten 5 der ursprünglich 25 Versuchsteilnehmer von der Studie ausgeschlossen werden, da die Qualität der Daten nicht ausreichend war. Außerdem mussten wegen der vielen Durchgänge, die als Artefakte verworfen wurden, die EEG-Daten der „Zählbedingung“ und „Nichtzählbedingung“ gemeinsam ausgewertet werden, damit die zentrale Frage nach einer Auswirkung durch variierende Mindestzeitabstände überhaupt

untersucht werden konnte. Vor dem Hintergrund dieser Erfahrungswerte wurde die Anzahl der Durchgänge je Versuchsbedingung in Experiment 2 auf 60, in sich dieser Dissertation anschließenden, hier nicht weiter aufgeführten Experimenten dann weiter auf 100 (Verleger et al., 2016) erhöht. Bemerkenswert und gleichermaßen tröstlich ist hierbei, dass signifikante Unterschiede in BP-Beginn und -Amplitude trotz schlechterem Verhältnis von Signal zu Rauschen in Experiment 1 gefunden werden konnten, nicht jedoch in Experiment 2. Außerdem erwecken die Gesamtmittelwerte der Zähl- und Nichtzählbedingung (siehe *Abbildung 21*) nicht den Anschein, dass das Fehlen erkenn- oder messbarer Unterschiede der BP-Form an schlechter Datenqualität oder Rauschen liegen könnte. Nicht einmal eine Spur Unterschied zwischen der Zähl- und Nichtzähl-Instruktion ist in den verhältnismäßig glatt verlaufenden BP-Kurven mit 1 s und 2 s Mindestzeitabstand zu sehen. In den verrauschteren EEG-Kurven der 5 s- und besonders der 3 s-Bedingung (*untere Graphen in Abbildung 21*) mag der Anschein erweckt werden, die Nichtzählbedingung verursache eine Zunahme der Amplitudenhöhe des BPs. Dies scheint aufgrund der Datenqualität jedoch nicht verlässlich. Man kann jedoch möglicherweise trotzdem anmerken, dass hier das letzte Wort noch nicht gesprochen ist, da größere Unterschiede sich gegebenenfalls erst mit größeren Mindestzeitabständen als die hier untersuchten Mindestzeitabstände von 3 s und 5 s ausbilden könnten. Daher erscheint es sinnvoll, dieses Experiment und die Untersuchung dieser Versuchsanweisungen zu wiederholen, für die Mittelung der Daten jedoch deutlich mehr als die hier veranschlagten 50 Versuchsdurchgänge festzulegen.

Ein weiteres großes Problem in Experiment 1 stellte die Definition einer Grundlinie dar, die als Bezugspunkt für den Vergleich der BP-Kurven in den verschiedenen Versuchsbedingungen dienen musste.

In *Abbildung 16* wird deutlich, dass sich lange vor dem aktuell vor der Bewegung ausbildenden BP systematische Fluktuationen befinden (dies betrifft vor allem die BPs bei kürzerem vorgegebenen Mindestzeitabstand). Insbesondere um dem ermittelten Zeitpunkt des vorherigen Mausklicks herum (je Versuchsbedingung dargestellt mit einem Pfeil) ist phasisch verlaufend eine langsame Negativierung gefolgt von einer Positivierung zu erkennen. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit das mitdargestellte vorherige BP, mit seinem Gipfel und der auf die Bewegung folgenden Positivierung, welche sich mit der Zeit und den immer wiederkehrenden Bewegungen abwechseln und sich zwischen aktueller und vorhergehender Bewegung wie eine flimmernde, andauernde Aktivität darstellen. Vor dem Hintergrund dieser wellenförmigen, wiederkehrenden Schwankungen der Potentialdifferenz sind auch die Schwierigkeiten bei der Bestimmung einer Grundlinie zu sehen. Erschwerend kommt hinzu, dass die BP-Kurven über jeder Elektrode einen anderen Verlauf zeigen, sodass die Amplitudenhöhe des BP, gemessen gegen die Bezugslinie, natürlich von der Wahl derselben abhängt und Änderungen in der Topographie der größten BP-Ausschläge verursacht werden (Urbach und Kutas, 2006). Dies mag der Grund dafür sein, dass die BP-Kurvenverläufe dieser Arbeit ihre größten Ausschläge topographisch weiter posterior als gewöhnlich aufwiesen (verglichen etwa mit den Kurvenverläufen bei Cui et al., 1999; Schultze-Kraft et al., 2016). Es könnte aber auch vermutet werden, dass dies mit der Wahl der Referenzelektrode an der Nase anstelle der häufig gewählten Lokalisation am Mastoid zusammenhängen könnte. Mit dem größeren Abstand zwischen Referenz- und posterior gelegenen Kopfhautelektroden könnte die Potentialdifferenz größer werden. Man könnte annehmen, dass dies eine

Verschiebung der ausgeprägtesten BP-Gipfel nach posterior, wie sie in gewissem Ausmaß in dieser Arbeit vorlag, verursachte. Allerdings veränderte sich die Topographie auch nach Umstellung auf TP7 und TP8 als Referenzelektroden nicht auf nennenswerte Art und Weise (hier nicht ausdrücklich berichtet), in Übereinstimmung mit der Gesetzmäßigkeit, dass sich durch Änderung der Referenz zwar die absoluten Spannungswerte ändern, nicht aber die relativen Maxima der topografischen Verteilung (s. z. B. Joyce & Rossion, 2005). Jedoch könnte die Erwartung der Farbänderung des Fixationskreuzes einen posterior gelegenen Anteil am BP erzeugen und die Verlagerung nach weiter posterior bedingen, ein Grund, die Farbänderung des Fixationskreuzes in zukünftigen Experimenten zu hinterfragen. Gleichermäßen kann natürlich eine Augenbewegung die Lokalisation von Potentialdifferenzen in Richtung frontal verlagern (in Auswertungen mit AFz, welche den Augenelektroden am nächsten liegt, waren hier jedoch keine größeren Ausschläge sichtbar). Bezüglich der Genauigkeit der Topographie und besserer Quellenlokalisierung hätte auch eine größere Anzahl Elektroden verwendet werden können; aber natürlich ändert das nichts an dem Befund eines leicht nach posterior abweichenden topografischen Schwerpunkts.

Dass die BP-Gipfel in Experiment 1 in einem Zeitraum -400 bis -200 ms vor der Bewegung ihren Gipfel erreichten und daher dort gemessen und ausgewertet wurden (wie es nach Betrachtung der Gesamtmittelwerte als ratsam erschien), und nicht in dem sonst häufig berichteten Zeitraum -300 bis -100 ms vor der Bewegung, hängt vermutlich mit der Tatsache zusammen, dass in dieser Arbeit am Nullpunkt der x-Achse der Mausclick (als Resultat der Bewegung) und nicht die erste EMG-Aktivität (die ersten motorischen Anzeichen der Bewegung erfassend) zu liegen kam.

Die Definition der Grundlinie bei Betrachtung der Potentiale nach dem Mausclick stellte ein ähnlich großes Problem dar. Die Entscheidung fiel auf einen Referenzzeitraum 0,7 bis 0,9 ms nach dem Mausclick, in dem in den gemittelten Kurvenverläufen das Ende der Positivierung in den Anfang des neuen BPs umschlug. Dies erschien sinnvoll, da hier die BP-Kurven in allen Bedingungen einen ähnlichen Verlauf aufwiesen, man also auch inhaltlich ähnliche, dem Kurvenverlauf zugrundeliegende Hirnprozesse an diesem Zeitpunkt vermuten konnte. Trotzdem darf dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Entscheidung für diesen Referenzzeitraum erneut kritisch und naturgemäß mit Folgen für die weitere Analyse und die Ergebnisse verbunden war. Generell muss auch erwogen werden, in wieweit die Positivierungen nach der Bewegung Auswirkungen auf die anschließenden BPs hatten. Es erscheint naheliegend, dass es sich bei der Positivierung, die regelmäßig nach einem zum Zeitpunkt $t = 0$ ms präsentierten Ereignis auftritt, um ein VEP, AEP (akustisch evoziertes Potential) oder SEP (somatosensorisch evoziertes Potential) handelt. Um die Positivierung zu verkleinern und die Auswirkungen auf die BPs zu verringern, könnte für Folgeexperimente in Erwägung gezogen werden, wie bereits vorgeschlagen, den Farbwechsel des Fixationskreuzes von schwarz nach blau wegzulassen sowie eine Computermaus zu verwenden, die ein leiseres Klickgeräusch oder generell weniger haptisches Feedback verursacht.

Es konnten keine vergleichbaren Studien gefunden werden, in der die BP-Startpunkte in zeitlichem Bezug zur vorhergehenden Bewegung (hier dem Mausklick) dargestellt und untersucht wurden (dieses Vorgehen fand in dieser Arbeit Anwendung in Experiment 1, siehe Abbildung 19). Diese neue Art der Auswertungsmethode ermöglicht unserer Meinung nach einen Perspektivwechsel auf den BP-Kurvenverlauf und verdeutlichte speziell in diesem Experiment auch theoretische Überlegungen bezüglich des BP-Beginns. Darüber hinaus mag dieses Vorgehen für zukünftige Studien neue Ansätze bieten, insbesondere auch für Studien an Patienten (wie etwa Barrett et al., 1986; Dick et al., 1989; Verleger, 2004; Mota et al., 2017). Hier könnte beispielsweise eine interessante Fragestellung lauten, ob Patienten mit Morbus Parkinson ähnlich glatt verlaufende Übergänge zwischen der Ausführung der einen Bewegung und Vorbereitung der nächsten Bewegung im Vergleich mit gesunden Versuchsteilnehmern haben. Dieselbe Fragestellung ließe sich natürlich auch auf andere Bewegungsstörungen und neurologische Erkrankungen, etwa Dystonien, (Hemi-)Paresen und Kleinhirnläsionen, übertragen.

Wie bereits erwähnt verdient die Methodik zur Bestimmung des BP-Beginns eine genaue Betrachtung und Diskussion. Hier existieren bereits einige gut durchdachte Studien mit Fokus auf bewegungskorrelierte Potentiale und insbesondere lateralisierte Bereitschaftspotentiale (engl. lateralized readiness potentials, LRPs). In ihnen werden verschiedene Methoden zur Bestimmung des Zeitpunktes, an dem die Potentiale ihren Anfang nehmen, vorgestellt. So schlugen etwa Schwarzenau et al. (1998) vor, eine Gerade an die Grundlinie anzupassen und eine weitere Gerade an die Steigung des Potentials zu seinem Gipfel anzulegen und den Schnittpunkt beider Geraden als LRP-Beginn zu definieren. Dieses Verfahren wurde von Mordkoff und Gianaros (2000) zitiert und evaluiert. Weiterhin wählten etwa Miller et al. (1998) einen Schwellenwert, der einem bestimmten Prozentsatz des Amplitudenmaximums entsprach, als Anhaltspunkt für den LRP-Beginn. Die von ihnen vorgeschlagenen Schwellenwerte hatten sie anhand simulierter Datensätze erhoben. Schwellenwerte bei 50 % des Amplitudengipfels (also einem recht hohen Prozentsatz) wurden empfohlen, wenn das LRP reaktionsgebunden gemittelt war, um eine recht niedrige Störanfälligkeit gegenüber dem zufälligen Rauschen zu erreichen. Dieses Verfahren wurde jedoch vorwärtsbetrachtend angewandt, es kennzeichnete also die erste Überschreitung des Schwellenwertes – mit dem Risiko, dass hiernach das Potential fluktuieren und den Schwellenwert erneut unterschreiten könnte. Hierin kann auch die Notwendigkeit zur Bestimmung eines recht hohen Wertes von 50 % begründet liegen. In dem in dieser Dissertation verwendeten Verfahren wurde nach dem zeitlich zuletzt vorliegenden Überschreiten des Schwellenwertes vor dem Maximum gesucht oder, mit anderen Worten, vom Gipfel aus gesehen unter rückwärtsgerichteter Betrachtung der Messpunkte nach dem ersten Unterschreiten des Schwellenwertes. So konnte ein deutlich niedrigerer Grenzwert von 20 % genutzt werden. Eine Überprüfung dieser Methode erscheint lohnenswert, ist sie doch intuitiv verständlich und plausibel. Schließlich kommt der Zwanzigprozentwert einer Gesamtamplitude dem Beginn eines Potentials deutlich näher als der Fünfzigprozentwert. Er darf aber trotzdem, insbesondere was die Untersuchung der Effekte durch variierende Mindestzeitabstände betrifft, als konservativ angesehen werden, wenn man die Möglichkeit in Betracht zieht, den BP-Beginn als Kurvenminimum zu definieren oder ihn nicht mit einem Algorithmus, sondern visuell anhand der

Gesamtmittelwerte, festzulegen. Am sinnvollsten erscheint auch hier die Evaluation anhand simulierter Datensätze wie durch Miller et al. (1998) und Mordkoff und Gianaros (2000) berichtet.

Abschließend kann dafür plädiert werden, in zukünftigen BP-Studien Verhaltensparameter routinemäßig anzugeben, so etwa die Angabe von Mittelwerten und Standardabweichungen faktisch eingehaltener Intervalle zwischen Bewegungen. Dies erscheint uns insbesondere bei Studien, welche bewegungseingeschränkte Patienten mit gesunden Probanden vergleichen, als wichtig und sinnvoll, denn Veränderungen der BP-Kurvenverläufe mögen hier eher eine normale Konsequenz des von den gesunden Probanden abweichenden Verhaltens sein als neurophysiologische Abweichungen bei scheinbar normalem Verhalten.

Auch das Verwenden von ergänzenden Fragebögen kann in bestimmten Fällen als sinnvoll erachtet werden. Insbesondere bei der Suche nach Auswirkungen der Instruktion Zählen versus Nichtzählen ergaben die Strategienennungen wertvolle Hinweise für die Interpretation. Das Erstellen guter Fragebögen ist jedoch mitnichten eine einfache Aufgabe, was auch im Austausch mit den Versuchsteilnehmern während dieser Experimente festgestellt wurde. Bei einer Fragestellung wurden nachträgliche Ergänzungen vorgenommen.

Zusammenfassend an dieser Stelle: es lohnt sich, lange geltende Deutungen zu hinterfragen und auch das Phänomen des Bereitschaftspotentials vor dem Hintergrund einer neuen Idee noch einmal genau zu besehen. Die BPs zeigten variierende Kurvenverläufe in Abhängigkeit von den gegebenen Mindestzeitabständen zwischen den Bewegungen. Dabei konnte in dieser Dissertation kein Beweis erbracht werden, dass der Prozess, der sich hinter dem BP verbirgt, ein Zeitschätzungsmechanismus oder gar eine innere Uhr ist. Die erhobenen Daten ergaben jedoch sehr wohl ein weiteres Stück Hinweis, dass sich das BP einfachen Interpretationen entzieht und keinen automatisch zu einer Bewegung führenden Trigger darstellt (wie es auch bei z. B. Deecke and Soekadar, 2016, und Schultze-Kraft et al., 2016, verneint wird). Falls es einen solchen Trigger darstellte, der notwendig für die Bewegung ist und neben der Bewegungsvorbereitung keine andere Funktion erfüllt, müsste es in festem zeitlichen Zusammenhang zu seinem getriggerten Ereignis stehen, in gestaffelt zunehmenden Abständen nach der vorangegangenen Bewegung erneut beginnen und unabhängig von zeitlichen Rahmenbedingungen eine konstante Amplitudenhöhe vor der Bewegung erreichen.

5 Zusammenfassung

Kaum eine andere EEG-Komponente ist so ideologisch überfrachtet worden wie das Bereitschaftspotential (BP). Bereits die Erstbeschreiber Kornhuber und Deecke (1965) sahen im BP die physiologische Grundlage für „Bereitschaft zum Handeln“, angestoßen durch eine Willensentscheidung der Versuchspersonen, eine Bewegung auszuführen. Libet et al. (1985) erregten große Aufmerksamkeit damit, dass ihre Versuchspersonen den bewussten Willen oder „Drang, sich zu bewegen“ mittels Introspektion so datierten, dass er, wenn überhaupt, nach Auftreten des BP zu liegen kam. Dies wurde vielfach so aufgefasst, dass neurophysiologische Prozesse eine Handlung determinierten, und uns Menschen erst nachträglich ein Wille suggeriert werde, gleich einer Illusion, wir hätten die Kontrolle über uns selbst. Fortan hing dem BP an, so etwas wie ein Beweis für die Nicht-Existenz des freien Willens zu sein.

Wenn das Bereitschaftspotential (BP) gemessen werden soll, müssen Probanden eine vom Versuchsleiter vorgegebene Anzahl von identisch ablaufenden, freiwillig und spontan initiierten Bewegungen durchführen, beispielsweise die Bewegung eines Fingers. Bei genauem Hinsehen kommt es je nach Experiment paradoxerweise zu zeitlichen Einschränkungen für die Bewegungsdurchführung: explizit werden Versuchsanweisungen gegeben, zwischen zwei Bewegungen einen Mindestzeitabstand einzuhalten, damit die EEG-Daten frei von vorheriger Aktivierung sind; implizit existieren Erwartungshaltungen, das Experiment müsse innerhalb eines bestimmten Zeitraums abgeschlossen sein. Um so den Anforderungen an die Wahl des richtigen Zeitrahmens für die Bewegung während eines BP-Experiments gerecht zu werden, ist denkbar, dass die Versuchsteilnehmer auf neuronaler Ebene eine langsame, rhythmische Aktivierung aufbauen, die als interner, grob definierender Taktgeber oder Auslöseimpuls dient. Das BP stellt hierbei möglicherweise die aufsteigende Phase dieser sich kurz vor der Bewegung kumulierenden Aktivierung dar. Könnte nachgewiesen werden, dass das BP mehr mit Zeitschätzung als mit Bewegungsvorbereitung in Zusammenhang stünde, würde eine wichtige Voraussetzung für die Deutung, die neurophysiologischen Prozesse hinter dem BP determinierten unsere Handlung, zweifelhafter erscheinen. These 1: Falls dem so sei, sollte mit länger werdenden Mindestzeitabständen zwischen zwei Bewegungen nicht nur die Amplitude des BP ansteigen, sondern auch das BP frühzeitiger vor der Bewegung beginnen. Dies wurde in Experiment 1 überprüft, indem die Versuchspersonen zwar freiwillig ihre Bewegung des Zeigefingers durchführen sollten, dabei aber einen variierenden Mindestzeitabstand zwischen je zwei dieser Bewegungen von 1 s, 2 s, 3 s oder 5 s einhalten sollten. These 2: Weiterhin sollte sich die BP-Amplitude entsprechend der Notwendigkeit innerer Zeitschätzung vergrößern oder verkleinern. Die Notwendigkeit, innerlich die Zeit zu schätzen, sollte einerseits in Experiment 1 durch die Anweisung, in Gedanken die verstrichenen Sekunden mitzuzählen und für die andere Versuchshälfte dieses zu unterlassen, moduliert werden, andererseits in Experiment 2 durch das Bereitstellen eines externen Taktgebers in Form einer regulär tickenden Uhr, eines externen Störfaktors mittels einer irregulär tickenden Uhr und in einem Drittel der Versuche ohne Uhr. Die These 1 konnte bestätigt werden. Der BP-Beginn variierte je nach Anweisung bezüglich des zeitlichen Ablaufs der Bewegungen, was eine gewisse Beziehung zwischen Zeitschätzungsmechanismen und dem BP wahrscheinlich erscheinen

lässt. Die These 2 bewahrheitete sich nicht. Weder das Zählen oder Nichtzählen der Sekunden schlug sich in den Kurvenverläufen der BPs nieder, noch verringerten oder vergrößerten sich die BP-Amplituden gemäß Notwendigkeit innerer Zeitschätzung. Einen Beweis, dass es sich bei der Aktivierung, die durch das BP wiedergegeben wird, um Zeitschätzung handelt, konnte in dieser Arbeit nicht erbracht werden.

6 Literaturverzeichnis

- Aurel, M. Des Kaisers Marcus Aurelius Antonius Selbstbetrachtungen. Übers. von Wittstock, A. (1949). Verlag Philipp Reclam junior, Kapitel VII, 31 und 57. Siehe auch: <http://gutenberg.spiegel.de/buch/des-kaisers-marcus-aurelius-antonius-selbstbetrachtungen-1479/7> (Abrufdatum: 08.01.2018).
- Baker, K. S., Piriyaaporn, T., Cunningham, 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., 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.
- Barrett, G., Shibasaki, H., Neshige, R. (1986). Cortical potential shifts preceding voluntary movement are normal in Parkinsonism. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 63:340-348.
- Baschera, M. (2003). Was heisst: etwas ist gegeben? Die Philosophie Jean-Luc Marions. In: Schweizer Monatshefte: Zeitschrift für Politik, Wirtschaft, Kultur, 11:51-53. Siehe auch: <http://doi.org/10.5169/seals-166966> (Abrufdatum: 08.12.2017).
- Belsham, W. (1789). *Essays: Philosophical, Historical, and Literary*, Band 1. C. Dilly, London, S. 12.
- Brunia, C. H. M., van Boxtel, G. J. M., Böcker, K. B. E. (2012). Negative Slow Waves as Indices of Anticipation: The Bereitschaftspotential, the Contingent Negative Variation, and the Stimulus-Preceding Negativity. In: Kappenman, E. S., Luck, S. J. (Hg.): *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford University Press, Oxford, 189-207.
- Capelle, W. (1935). *Die Vorsokratiker*. Alfred Kröner Verlag, Leipzig, S. 399.
- Capelle, W., Rapp, C. (2008). *Die Vorsokratiker: Fragmente und Quellenberichte*. Alfred Kröner Verlag, Stuttgart, 9. Aufl., Kapitel 9 und 12.
- Casini, L., Vidal, F. (2011). The SMAs: neural substrate of the temporal accumulator? *Frontiers in Integrative Neuroscience* 5:35.
- Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., Vidal, F. (2015). SMA selectively codes the active accumulation of temporal, not spatial magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience* 27:2281-2298.
- Coull, J. T., Vidal, F., Nazarian, B., and Macar, F. (2004). Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science* 303:1506-1508.

- Cui, R. Q., Egkher, A., Huter, D., Lang, W., Lindinger, G., Deecke, L. (2000a). High resolution spatio temporal analysis of the contingent negative variation in simple or complex motor tasks and a non-motor task. *Clinical Neurophysiology* 111: 1847-1859.
- Cui, R. Q., Huter, D., Egkher, A., Lang, W., Lindinger, G., Deecke, L. (2000b). High resolution DC-EEG mapping of the Bereitschaftspotential preceding simple or complex bimanual sequential finger movement. *Experimental Brain Research* 134:49-57.
- 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.
- Cumming, G., Finch, S. (2005). Inference by eye: confidence intervals and how to read pictures of data. *American Psychologist* 60:170-180.
- Cunnington, R., Iansek, R., Bradshaw, J. L., Phillips, J. G. (1996). Movement-related potentials associated with movement preparation and motor imagery. *Experimental Brain Research*; 111:429-36.
- Cunnington, R., Windischberger, C., Deecke, L., Moser, E. (2002). The preparation and execution of self-initiated and externally-triggered movement: a study of event-related fMRI. *Neuroimage* 15:373-385.
- Cunnington, R., Windischberger, C., Deecke, L., Moser, E. (2003). The preparation and readiness for voluntary movement: a high-field event-related fMRI study of the Bereitschafts-BOLD response. *Neuroimage* 20:404-412.
- Deecke, L. (2014). Experiments into readiness for action: 50th Anniversary of the Bereitschaftspotential. *World Neurology* 29:6-11.
- Deecke, L. (2005). Experimente zum Thema Handlungsbereitschaft – 50 Jahre Bereitschaftspotential, *Klinische Neurophysiologie*, 46:19-25.
- Deecke, L., Grözing, B., Kornhuber, H. H. (1976). Voluntary finger movement in man: cerebral potentials and theory. *Biological Cybernetics* 23:99-119.
- Deecke, L., Kornhuber, H. H. (1978). An electrical sign of participation of the mesial 'supplementary' motor cortex in human voluntary finger movements. *Brain Research* 159:473-476.
- Deecke, L., Kornhuber, H. H., Lang, W., Lang, M., Schreiber, H. (1985). Timing function of the frontal cortex in sequential motor and learning tasks. *Human Neurobiology* 4:143-154.

- Deecke, L., Kornhuber, H. H. (2003). Human freedom, reasoned will and the brain: the Bereitschaftspotential story. In: Jahanshahi, M., Hallett, M. (Hg.): *The Bereitschaftspotential, Movement-related Cortical Potentials*. Springer Science+Business Media, New York, 283-320.
- Deecke, L., Lang, W., Heller, H. J., Hufnagl, M., Kornhuber, H. H. (1987). Bereitschaftspotential in patients with unilateral lesions of the supplementary motorarea. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 50:1430-1434.
- Deecke, L., Soekadar, S. R. (2016). Beyond the point of no return: last-minute changes in human motor performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113:E2876.
- Dennett, D. C. (2003). *Freedom evolves*. Penguin Verlag, New York. Hier zitiert nach Roth, G., (2006). *Das Gehirn und seine Freiheit – Beiträge zur neurowissenschaftlichen Grundlegung der Philosophie*. Hrsg. von Grün, K. - J., Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, S. 127.
- Dick, J. P. R., Rothwell, J. C., Day, B. L., Cantello, R., Buruma, O., Gioux, M., Benecke, R., Berardelli, A., Thompson, P. D., Marsden, C. D. (1989) The Bereitschaftspotential is abnormal in Parkinson's disease. *Brain* 112:233–244.
- Eimer, M. (1998). The lateralized readiness potential as an on-line measure of central response activation processes. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers* 30:146-156.
- Elger, C. E., Friederici, A. D., Koch, C., Luhmann, H., Malsburg, C. von der, Menzel, R., Monyer, H., Rösler, F., Roth, G., Scheich, H., Singer, W. (2004). *Das Manifest – Elf führende Neurowissenschaftler über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung*, *Gehirn & Geist* 6:30-37.
- Faugeras, F., Naccache, L. (2016). Dissociating temporal attention from spatial attention and motor response preparation: a high-density EEG study. *Neuroimage* 124:947-957.
- Ferber, R. (2003). *Philosophische Grundbegriffe* 2, C. H. Beck, München, IV:156-196. Hier zitiert nach Kläden, T. (2010). *Der freie Wille – nur ein frommer Wunsch? Begriffliche und empirische Überlegungen zur Diskussion um die Willensfreiheit*. In: Spieß, C. (Hg.), *Freiheit - Natur - Religion. Studien zur Sozialethik*. Schöningh, Paderborn, S. 31.
- Fodor, J. A. (1987). *Psychosemantics: The Problem of Meaning in the Philosophy of Mind*, The MIT Press, Cambridge, MA. S. 151, vergl. auch Fodor, J. A. (1975): S. 1-27. Hier zitiert nach Roth, G., (2006). *Das Gehirn und seine Freiheit – Beiträge zur neurowissenschaftlichen Grundlegung der Philosophie*. Hrsg. von Grün, K. - J., Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, S. 127.

- Freud, S. (1917) Eine Schwierigkeit der Psychoanalyse. *Imago. Zeitschrift für Anwendung der Psychoanalyse auf die Geisteswissenschaften*, Band V, S. 1-7.
- Goschke, T. (2003). Voluntary action and cognitive control from a cognitive neuroscience perspective. In: Maasen, S. Prinz, W., Roth, G. (Hg.): *Voluntary action: Brains, Minds, and Sociality*. Oxford University Press, Oxford, 49-85.
- Goschke, T. (2013). Volition in action: Intentions, control dilemmas and the dynamic regulation of cognitive intentional control. In: Prinz, W., Beisert, A. und Herwig, A. (Hg.): *Action science: Foundations of an emerging discipline*. The MIT Press, Cambridge, MA, 409-434.
- Haggard, P., Eimer, M. (1999). On the relation between brain potentials and the awareness of voluntary movements. *Experimental Brain Research* 126:128-133.
- Hobbes, T. (1651) *Leviathan* (Philosophische Bibliothek). Hrsg. von Klenner, H., übers. von Schlösser, J. (1996). Felix Meiner Verlag, Hamburg.
- Ikeda, A., Shibasaki, H., Kaji, R., Terada, K., Nagamine, T., Honda, M., et al. (1997). Dissociation between contingent negative variation (CNV) and Bereitschaftspotential (BP) in patients with parkinsonism. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 102:142-151.
- Ikeda, A., Shibasaki, H., Nagamine, T., Terada, K., Kaji, R., Fukuyama, H., et al. (1994). Dissociation between contingent negative variation and Bereitschaftspotential in a patient with cerebellar efferent lesion. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 90:359-364.
- Jahanshahi, M., Hallett, M. (2003). *The Bereitschaftspotential – Movement-Related Cortical Potentials*. Springer Science+Business Media, New York, siehe Buchtitel.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 10:371–375.
- Jo, H.-G., Hinterberger, T., Wittmann, M., Borghardt, T. L., and 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., Borghardt, T. L., Hinterberger, T., Schmidt, S. (2014). First-person approaches in neuroscience of consciousness: brain dynamics correlate with the intention to act. *Consciousness and Cognition* 26:105-116.

- Kahneman, D. (2011). *Schnelles Denken, langsames Denken*. Penguin Verlag, München, 100-103.
- Keller, I., Heckhausen, H. (1990). Readiness potentials preceding spontaneous motor acts: voluntary vs. involuntary control. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 76:351-61.
- Kiesel, A., Miller, J., Jolicœur, P., Brisson, B. (2008). Measurement of ERP latency differences: a comparison of single-participant and jackknife-based scoring methods. *Psychophysiology* 45:250-274.
- Kläden, T. (2010). Der freie Wille – nur ein frommer Wunsch? Begriffliche und empirische Überlegungen zur Diskussion um die Willensfreiheit. In: Spieß, C. (Hg.). *Freiheit - Natur - Religion. Studien zur Sozialethik*. Schöningh, Paderborn, S. 31f. Siehe auch:
http://www.kamp-erfurt.de/level9/cms/download_user/Gesellschaft/Der%20freie%20Wille%20-%20nur%20ein%20frommer%20Wunsch%3F.pdf (Abrufdatum: 08.01.2017).
- 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.
- Kornhuber, H. H., Deecke, L. (2016). Brain potential changes in voluntary and passive movements in humans: readiness potential and reafferent potentials. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 468:1115-1124.
- Kutas, M., Donchin, E. (1980). Preparation to respond as manifested by movement-related potentials. *Brain Research* 202:95-115.
- La Mettrie, J. O. (1747) *L'Homme Machine [Der Mensch eine Maschine]*, Hofenbergs Sonderausgabe. Hrsg. von Guth, K.-M., übers. von Ritter, A. (2016). *Contumax*, Berlin.
- Lang, W. (2003). Surface recordings of the Bereitschaftspotential in normals. In: Jahanshahi, M., Hallett, M. (Hg.). *The Bereitschaftspotential – Movement-Related Cortical Potentials*. Springer Science+Business Media, New York, 19-34.
- Lebedev, M. A., O'Doherty, J. E., Nicolelis, M. A. L. (2008). Decoding of temporal intervals from cortical ensemble activity. *Journal of Neurophysiology* 99:166-186.
- Leslie, M., Keeble, S. (1987). Do Six-Month-Old Infants Perceive Causality? *Cognition*; 25:265-288.
- Libet, B. (1985). Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behavioral and Brain Sciences* 8:529–566.

- Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain* 106:623-642.
- 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.
- Luther, M. (1525). *De servo arbitrio* [Über den geknechteten Willen].
- Luther, M. (1524). *De servo arbitrio* [Vom unfreien Willen]. In: Schäfer, J. (Hg.) (2003). *Ökumenisches Heiligenlexikon: Leben und Wirken von mehr als 3000 Personen der Kirchengeschichte: der katholischen Kirche, der orthodoxen Kirchen, aus den protestantischen und anglikanischen Kirchen*. Stuttgart. Siehe auch: https://www.heiligenlexikon.de/Literatur/Martin_Luther_unfreier_Willen.htm (zuletzt aktualisiert am 10.09.2016, Abrufdatum 15.01.2018).
- Macar, F., Vidal, F., Casini, L. (1999). The supplementary motor area in motor and sensory timing: evidence from slow brain potential changes. *Experimental Brain Research* 125:271-280.
- Matsushashi, M., Hallett, M. (2008). The timing of the conscious intention to move. *European Journal of Neuroscience* 28:2344-2351.
- Mento, G., Tarantino, V., Vallesi, A., and Bisiacchi, P. S. (2015). Spatiotemporal neurodynamics underlying internally and externally driven temporal prediction: a high spatial resolution ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience* 27:425-439.
- Merchant, H., Pérez, O., Bartolo, R., Méndez, J. C., Mendoza, G., Gámez, J., et al. (2015). Sensori motor neural dynamics during isochronous tapping in the medial premotor cortex of the macaque. *European Journal of Neuroscience* 41:586-602.
- Merchant, H., Zarco, W., Pérez, O., Prado, L., Bartolo, R. (2011). Measuring time with different neural chronometers during a synchronization continuation task. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108:19784-19789.
- Meyers Enzyklopädisches Lexikon in 25 Bänden (1972), Bibliographisches Institut, Mannheim/ Wien/ Zürich, 9. Aufl., Band 6, S. 483f.
- Miller, J., Patterson, T., Ulrich, R. (1998). Jackknife-based method for measuring LRP onset latency differences. *Psychophysiology* 35:99-115.

- Miller, J., Shepherdson, P., Trevena, J. (2011). Effects of Clock Monitoring on Electroencephalographic Activity: Is Unconscious Movement Initiation an Artifact of the Clock? *Psychological Science* 22:103-109.
- Miller, J., Trevena, J. (2002). Cortical Movement Preparation and Conscious Decisions: Averaging Artifacts and Timing Biases. *Consciousness and Cognition*. 11:308-313.
- Misirlişoy, E., Haggard, P. (2014). Veto and vacillation: a neural precursor of the decision to withhold action. *Journal of Cognitive Neuroscience* 26:296-304.
- Mordkoff, J. T., Gianaros, P. J. (2000). Detecting the onset of the lateralized readiness potential: a comparison of available methods and procedures. *Psychophysiology* 37:347-360.
- Mota, I. A., das Gracas Coriolano, M., Gomes, O. (2017). Bereitschaftspotential preceding eyelid blinks in Parkinson's disease. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria* 75:539-545.
- Müller-Jung, J. (2016). Ist das Gehirn fremdgesteuert? Endlich befreit! *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, siehe auch: <http://www.faz.net/aktuell/wissen/ist-das-gehirn-fremdgesteuert-endlich-befreit-14034210.html>, S. 1 (zuletzt aktualisiert 30.01.2016; Abrufdatum 23.11.2017).
- Navon, D. (2014). How plausible is it that conscious control is illusory? *The American Journal of Psychology* 127:147-155.
- Nguyen, V. T., Breakspear, M., Cunnington, R. (2014). Reciprocal interactions of the SMA and cingulate cortex sustain premovement activity for voluntary actions. *Journal of Neuroscience* 34:16397-16407.
- Penfield, W. (1958). Some mechanisms of consciousness discovered during electrical stimulation of the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 44:51-66.
- Platon, *Politeia* [Der Staat] (ca. 420-407 v. Chr.). Buch X, 617d/e. Übersetzung der Didot-Edition (1852) in überarbeiteter Form nach Teuffel, W. S. (Bücher I-V) und Wiegand, W. (Bücher VI-X) (1855/56). In: *Platon's Werke. Zehn Bücher vom Staate*. Stuttgart: <http://www.opera-platonis.de/Politeia10.pdf> (Abrufdatum 6.12.2017).
- Podiumsdiskussion vom 26.11.2013 mit Professor Dr. John-Dylan Haynes, Professor Dr. Reinhard Merkel, Professor Dr. Reinhard Werth und Dr. Richard Wetzell, unter Moderation von Martina Kothe, NDR: <https://www.youtube.com/watch?v=XKJrHFRE1IE>, ab Minute 41:23 (Abrufdatum 08.01.2017).
- Popper, K. R., Eccles, J. C., John, C. (1977). *The Self and Its Brain: An Argument for Interactionism*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

- Popper, K. R., Eccles, J. C. (1989). Das Ich und sein Gehirn: Von den Verfassern durchgesehene Übersetzung aus dem Englischen von Hartung, A. und Hochkeppel, W. Piper, München.
- Rockstroh B, Elbert T, Canavan A, Lutzenberger W, Birbaumer N (1989a). Event-related exposure to external currents. In: Slow cortical potentials and behaviour. Urban & Schwarzenberg, München, 2. Auflage.
- Rockstroh, B., Elbert, T., Canavan, A., Lutzenberger, W., Birbaumer, N. (1989b). Slow cortical potentials and behaviour. Urban & Schwarzenberg, München, 2. Auflage.
- Rohrbaugh, J. W., Syndulko, K., Lindsley, D. B. (1976). Brain wave components of the contingent negative variation in humans. Science 191:1055-1057.
- Roth, G., Grün, K. - J. (2006). Das Gehirn und seine Freiheit – Beiträge zur neurowissenschaftlichen Grundlegung der Philosophie. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, S. 127, 147.
- Rotterdam, E. von (1524). De libero arbitrio [Über den freien Willen]. J. Froben, Basel.
- Rotterdam, E. von (1524). De libero arbitrio [Über den freien Willen]. In: Welzig, W. (Hg.) (1969): Erasmus von Rotterdam, Ausgewählte Schriften, Band 4. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S. 37.
- Schmidt, S., Jo, H.-G., Wittmann, M., Hinterberger, T. (2016). "Catching the waves" – slow cortical potentials as moderator of voluntary movement. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 68:639-650.
- Schmidt, R. F., Lang, F., Heckmann, M. (2011). Physiologie des Menschen. Springer, Berlin, 31. Auflage, 7:152.
- Schmidt, R. F., Thews, G., Lang, F. (2000). Physiologie des Menschen. Springer, Berlin, 28. Auflage, 6:128, 7:141.
- Schmundt, H. (2016). Der freie Un-Wille. Seit Langem gilt der freie Wille vielen Gelehrten nur noch als Illusion. Nun aber zeigen Experimente Berliner Neurowissenschaftler: Das Bewusstsein ist imstande, unbewusst eingeleitete Handlungen zu stoppen. DER SPIEGEL Nr. 15, siehe auch: <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-144021694.html> (Abrufdatum 23.11.2017).
- Schmundt, H. (2016). Keinen Kobold im Kopf. Mit seinen historischen Experimenten schaffte der Neurologe Lüder Deecke scheinbar den freien Willen ab. Er selbst hält dies für ein zynisches Missverständnis. DER SPIEGEL Nr. 34, S. 104, siehe auch: <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-146389769.html> (Abrufdatum 23.11.2017).

- Schnabel, U. (2008). Der unbewusste Wille. Deutsche Hirnforscher geben der Debatte um den freien Willen neue Nahrung. Schon zehn Sekunden vor einer bewussten Entscheidung wird das Gehirn aktiv. Was folgt daraus? DIE ZEIT Nr.17, auch auf <http://www.zeit.de/2008/17/Freier-Wille>, S. 1-3 (Abrufdatum 23.11.2017).
- Schnabel, U., Assheuer, T. (2009). Der Mensch bleibt sich ein Rätsel. Ein Gespräch mit dem Tübinger Philosophen Manfred Frank über die Illusionen der Hirnforschung und ihre zweifelhaften politischen Folgen. DIE ZEIT Nr. 36, siehe auch: <http://www.zeit.de/2009/36/Hirnforschung>, S. 1-5 (Abrufdatum 23.11.2017).
- Schopenhauer, A. (1836). Ueber den Willen in der Natur. Verlag von Sigmund Schmerber, Frankfurt a. M., S. 2f.
- Schopenhauer, A. (1804-1818). Frühe Manuskripte – Der Handschriftliche Nachlass, Band I. Hrsg. von Hübscher, A. (1985). Deutscher Taschenbuch Verlag, München, S. 353. Quelle hier zitiert aus: Schrader, W., Goedert, G., Scherbel, M. (2005). Perspektiven der Philosophie: Neues Jahrbuch, Band 31. Koninklijke Brill NV, Leiden, S. 128.
- Schrom, M. (2017). Wer ist Herr im Hirn? Der Streit um den freien Willen. Publik-Forum Sonderdruck zu Heft Nr. 21. S. 1-4.
- 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., Görgen, K., Dähne, S., et al. (2016). The point of no return in vetoing self-initiated movements. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 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 Sciences of the United States of America* 109:E2904-E2913.
- Schwarzenau, P., Falkenstein, M., Hoormann, J., Hohnsbein, J. (1998). A new method for the estimation of the onset of the lateralized readiness potential (LRP). *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 30:110-117
- Seifert, J. (2003). Psychophysiologische Methodik des Fachbereich I der Universität Trier: Ereigniskorrelierte Potentiale – Eine kurze Einführung. S. 13. Siehe auch: <http://www.neurolabor.de/ereigniskorreliert.pdf>. (Abrufdatum 23.11.2017).

- Shibasaki, H., Barrett, G., Halliday, E., Halliday, A. M. (1980). Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 49:213-226.
- Shibasaki, H., Hallett, M. (2006). What is the Bereitschaftspotential? *Clinical Neurophysiology* 117:2341-2356.
- Soon C., Brass, M., Heinze, H.-J., Haynes J.-D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature Neuroscience* 11:543-545.
- Tucker, D. M. (1993). Spatial sampling of head electric fields: The geodesic sensor net. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 79: 413-419.
- Trillenber, P., Verleger, R., Wascher, E., Wauschkuhn, B., Wessel, K. (2000). CNV and temporal uncertainty with 'ageing' and 'non-ageing' S1 – S2 intervals. *Clinical Neurophysiology* 111:1216-1226.
- Trevena, J., Miller, J. (2010). Brain preparation before a voluntary action: evidence against unconscious movement initiation. *Consciousness and Cognition* 19:447-56.
- Urbach, T. P., Kutas, M. (2006). Interpreting event-related brain potential (ERP) distributions: implications of baseline potentials and variability with application to amplitude normalization by vector scaling. *Biological Psychology* 72:333-343.
- van Boxtel, G. J. M., Brunia, C. H. M. (1994). Motor and non-motor aspects of slow brain potentials. *Biological Psychology* 38:37-51.
- van Rijn, H., Kononowicz, T. W., Meck, W. H., Ng, K. K., Penney, T. B. (2011). Contingent negative variation and its relation to time estimation: a theoretical evaluation. *Frontiers in Integrative Neuroscience* 5:91.
- Verleger, R. (2004). Malfunctions of cortical control of movement studied with slow brain potentials in neurological patients. *Journal of Psychophysiology* 18:105-120.
- Verleger, R., Asanowicz, D., Werner, L., Smigasiewicz, K. (2015). Biased odds for head or tail: outcome-evoked P3 depends on frequencies of guesses. *Psychophysiology* 52:1048-1058.
- Verleger, R., Smigasiewicz, K. (2016). Do rare stimuli evoke large P3s by being unexpected? A comparison of the oddball effects between standard-oddball and prediction-oddball tasks. *Advances in Cognitive Psychology* 12:88-104.

- Verleger, R., Haake, M., Baur, A., Smiegasiewicz, K. (2016). Time to Move Again: Does the Bereitschaftspotential Covary with Demands on Internal Timing? *Frontiers in Human Neuroscience* 10:642.
- Verleger, R., Wauschkuhn, B., van der Lubbe, R., Jaskowski, P., Trillenber, P. (2000). Posterior and anterior contributions of hand-movement preparation to Late CNV. *J. Psychophysiology* 14:69-86.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: an electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature* 203:380-384.
- Weerts, T. C.; Lang, P. J. (1973). The effects of eye fixation and stimulus and response location on the contingent negative variation (CNV). *Biological Psychology*. 1:1–19.
- Wessel, K., Verleger, R., Nazareus, D., Vieregge, P., Kömpf, D. (1994). Movement-related cortical potentials preceding sequential and goal-directed finger and arm movements in patients with cerebellar atrophy. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 92:331-341.
- Zeh, J. (2010). Der Ursprung der Freiheit. *SZ-Magazin der Süddeutschen Zeitung* vom 08.09.2006, S. 54.
 Siehe auch: <http://www.sueddeutsche.de/kultur/begriffe-der-saison-der-ursprung-der-freiheit-1.881813> (zuletzt aktualisiert am 19.05.2010, Abrufdatum: 17.12.2017).
- Zippelius, R. (2011). *Rechtsphilosophie – Ein Studienbuch*. 6. Aufl., C. H. Beck, München, § 25 III.

7 Anhang

7.1 Tabellarische Darstellung der F- und p-Werte

7.1.1 Experiment 1

In den folgenden Tabellen sind die F- und p-Werte der statistischen Berechnung mittels ANOVA durch das Programm SPSS dargestellt. So wurden das Verhalten der Versuchspersonen sowie die BP-Parameter analysiert (insbesondere die BP-Maxima, die BP-Startpunkte und Amplitudenwerte bestimmter Zeitabschnitte). Signifikante Effekte sind fett gedruckt. Für die Greenhouse-Geisser-Korrektur sind die ϵ -Werte sowie die korrigierten p-Werte angegeben.

Mittelwerte

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 0,066	F = 476,682	F = 2,326
	p = 0,801	p = 0,000	p = 0,087
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 1,000$	$\epsilon = 0,679$	$\epsilon = 0,757$
	p = 0,801	p = 0,000	p = 0,139

Standardabweichungen

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 11,403	F = 32,5	F = 5,747
	p = 0,004	p = 0,000	p = 0,002
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 1,000$	$\epsilon = 0,545$	$\epsilon = 0,429$
	p = 0,004	p = 0,000	p = 0,020

Absolute Anzahl zu früh gedrückter Durchgänge

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 12,924	F = 17,365	F = 3,746
	p = 0,003	p = 0,000	p = 0,017
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 1,000$	$\epsilon = 0,679$	$\epsilon = 0,757$
	p = 0,003	p = 0,000	p = 0,029

BP-Maximum (-400 bis -200 ms vor der Bewegung) unter Zusammenlegung der Daten aus beiden Zählbedingungen

Faktor	Elektrode	Mindestzeitabstand	Elektrode x Mindestzeitabstand	Linearer Kontrast Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 3,024 p = 0,039	F = 26,233 p = 0,000	F = 0,277 p = 0,980	F = 50,747 p = 0,000
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,664$ p = 0,064	$\epsilon = 0,741$ p = 0,000	$\epsilon = 0,303$ p = 0,823	

BP-Startpunkte unter Zusammenlegung der Daten aus beiden Zählbedingungen

Faktor	Mindestzeitabstand	Linearer Kontrast Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 19,457 p = 0,000	F = 28,102 p = 0,000
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,490$ p = 0,000	

Paarweiser Vergleich der Bedingungen mit kürzerem (1 und 2 s) und längerem (3 und 5 s) gefordertem Mindestzeitabstand

Faktor	Paar 1 (1 s und 2 s)	Paar 2 (3 s und 5 s)
Signifikanz	t = 3,352 p = 0,005	t = 3,583 p = 0,003

t-Test der Bedingungen mit 2 s und 3 s gefordertem Mindestzeitabstand

Faktor	2 s vs. 3 s
Signifikanz	t = 1,998 p = 0,064

BP-Amplitude nach der Bewegung

Faktor	Zeitfenster	Zählen	Mindestzeitabst.	Elektrode	Zeitfenster x Zählen
Signifikanz	F = 0,635 p = 0,438	F = 0,234 p = 0,636	F = 1,220 p = 0,314	F = 5,034 p = 0,004	F = 1,575 p = 0,229
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 1,000$ p = 0,438	$\epsilon = 1,000$ p = 0,636	$\epsilon = 0,615$ p = 0,308	$\epsilon = 0,750$ p = 0,010	$\epsilon = 1,000$ p = 0,229
Faktor	Zeitfenster x Mindestzeitabst.	Zeitfenster x Elektrode	Zählen x Mindestzeitabst.	Zählen x Elektrode	Mindestzeitabst. x Elektrode
Signifikanz	F = 6,843 p = 0,001	F = 1,425 p = 0,248	F = 1,348 p = 0,271	F = 1,028 p = 0,389	F = 1,350 p = 0,217
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,870$ p = 0,001	$\epsilon = 0,736$ p = 0,255	$\epsilon = 0,966$ p = 0,271	$\epsilon = 0,752$ p = 0,376	$\epsilon = 0,424$ p = 0,264
Faktor	Zeitfenster x Zählen x Mindestzeitabst.	Zeitfenster x Zählen x Elektrode	Zeitfenster x Mindestzeitabst. x Elektrode	Zählen x Mindestzeitabst. x Elektrode	Zeitfenster x Zählen x Mindestzeitabst. x Elektrode
Signifikanz	F = 0,328 p = 0,805	F = 0,668 p = 0,576	F = 2,328 p = 0,018	F = 0,783 p = 0,632	F = 0,527 p = 0,853
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,809$ p = 0,763	$\epsilon = 0,713$ p = 0,529	$\epsilon = 0,522$ p = 0,055	$\epsilon = 0,374$ p = 0,522	$\epsilon = 0,502$ p = 0,738

Separate Analyse für das Zeitfenster 1,4 s nach der Bewegung

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 1,461 p = 0,245	F = 0,270 p = 0,847	F = 1,709 p = 0,179
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 1,000$ p = 0,245	$\epsilon = 0,598$ p = 0,742	$\epsilon = 0,749$ p = 0,193

Separate Analyse für das Zeitfenster 2,4 s nach der Bewegung

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 0,582 p = 0,457	F = 4,805 p = 0,005	F = 1,418 p = 0,250
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 1,000$ p = 0,457	$\epsilon = 0,627$ p = 0,018	$\epsilon = 0,903$ p = 0,253

BP-Gipfel vor der Bewegung ohne Zusammenlegen der Daten beider Zählbedingungen

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Elektrode	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 0,858 p = 0,371	F = 1,771 p = 0,169	F = 0,756 p = 0,526	F = 0,484 p = 0,695
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\varepsilon = 1,000$ p = 0,371	$\varepsilon = 0,768$ p = 0,172	$\varepsilon = 0,793$ p = 0,499	$\varepsilon = 0,799$ p = 0,654
Faktor	Zählen x Elektrode	Mindestzeitabst. x Elektrode	Zählen x Mindestzeitabst. x Elektrode	
Signifikanz	F = 1,599 p = 0,205	F = 0,949 p = 0,486	F = 0,719 p = 0,691	
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\varepsilon = 0,777$ p = 0,216	$\varepsilon = 0,380$ p = 0,434	$\varepsilon = 0,318$ p = 0,541	

BP-Startpunkte vor der Bewegung ohne Zusammenlegen der Daten beider Zählbedingungen

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Elektrode	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 0,702 p = 0,417	F = 39,566 p = 0,000	F = 0,818 p = 0,492	F = 0,502 p = 0,683
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\varepsilon = 1,000$ p = 0,417	$\varepsilon = 0,4389$ p = 0,000	$\varepsilon = 0,706$ p = 0,458	$\varepsilon = 0,489$ p = 0,557
Faktor	Zählen x Elektrode	Mindestzeitabst. x Elektrode	Zählen x Mindestzeitabst. x Elektrode	
Signifikanz	F = 0,336 p = 0,800	F = 1,361 p = 0,214	F = 0,771 p = 0,643	
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\varepsilon = 0,806$ p = 0,757	$\varepsilon = 0,346$ p = 0,268	$\varepsilon = 0,338$ p = 0,518	

BP-Latenz ohne Zusammenlegen der Daten beider Zählbedingungen

Faktor	Zählen	Mindestzeitabstand	Elektrode	Zählen x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 0,702 p = 0,417	F = 39,566 p = 0,000	F = 0,818 p = 0,492	F = 0,502 p = 0,683
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 1,000$ p = 0,417	$\epsilon = 0,439$ p = 0,000	$\epsilon = 0,706$ p = 0,458	$\epsilon = 0,489$ p = 0,557
Faktor	Zählen x Elektrode	Mindestzeitabst. x Elektrode	Zählen x Mindestzeitabst. x Elektrode	
Signifikanz	F = 0,336 p = 0,800	F = 1,351 p = 0,214	F = 0,771 p = 0,643	
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,806$ p = 0,757	$\epsilon = 0,346$ p = 0,268	$\epsilon = 0,338$ p = 0,518	

7.7.2 Experiment 2

Mittelwerte

Faktor	Uhr	Mindestzeitabstand	Uhr x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 27,965	F = 1297,020	F = 23,157
	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,087
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,783$	$\epsilon = 1,000$	$\epsilon = 0,000$
	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,000

Separate Analyse bei 2 s Mindestzeitabstand

Faktor	Uhr
Signifikanz	F = 13,034
	p = 0,000
Greenhouse-Geisser-Korrektur	p = 0,001

Separate Analyse bei 4 s Mindestzeitabstand

Faktor	Uhr
Signifikanz	F = 38,080
	p = 0,000
Greenhouse-Geisser-Korrektur	p = 0,000

Standardabweichungen

Faktor	Uhr	Mindestzeitabstand	Uhr x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 44,669	F = 45,316	F = 23,019
	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,000
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,787$	$\epsilon = 0,545$	$\epsilon = 0,948$
	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,000

Rate zu früh gedrückter Durchgänge

Faktor	Uhr	Mindestzeitabstand	Uhr x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 7,387 p = 0,004	F = 2,357 p = 0,153	F = 8,679 p = 0,002
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\epsilon = 0,596$ p = 0,014	$\epsilon = 1,000$ p = 0,153	$\epsilon = 0,760$ p = 0,004

Paarweiser Vergleich der Uhrbedingungen mit (regelmäßigem) Uhrlicken und ohne Uhrlicken für 2 s und 4 s Mindestzeitabstand

Faktor	Paar 1 (Uhr 2 s, keine Uhr 2 s)	Paar 2 (Uhr 4 s, keine Uhr 4 s)
Signifikanz	t = -2,522 p = 0,028	t = -4,104 p = 0,002

Paarweiser Vergleich der Uhrbedingungen mit (regelmäßigem) Uhrlicken und ohne Uhrlicken für 2 s und 4 s Mindestzeitabstand

Faktor	Paar 1 (Uhr 2 s, irreg. Uhr 2 s)	Paar 2 (Uhr 4 s, irreg. Uhr 4 s)
Signifikanz	t = -2,512 p = 0,029	t = -2,090 p = 0,061

Paarweiser Vergleich der Uhrbedingungen mit (regelmäßigem) Uhrlicken und ohne Uhrlicken für 2 s und 4 s Mindestzeitabstand

Faktor	Paar 1 (keine Uhr 2 s, irreg. Uhr 2 s)	Paar 2 (keine Uhr 4 s, irreg. Uhr 4 s)
Signifikanz	t = -0,150 p = 0,883	t = 2,724 p = 0,020

BP-Maximum (-300 bis -100 ms vor der Bewegung)

Faktor	Uhr	Mindestzeitabstand	Elektrode	Uhr x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 0,605 p = 0,555	F = 0,002 p = 0,966	F = 4,800 p = 0,007	F = 1,314 p = 0,289
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,936$ p = 0,545	$\epsilon = 1,000$ p = 0,966	$\epsilon = 0,864$ p = 0,010	$\epsilon = 0,984$ p = 0,289
Faktor	Uhr x Elektrode	Mindestzeitabst. x Elektrode	Uhr x Mindestzeitabst. x Elektrode	
Signifikanz	F = 0,945 p = 0,469	F = 0,672 p = 0,576	F = 0,257 p = 0,955	
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,760$ p = 0,401	$\epsilon = 0,318$ p = 0,538	$\epsilon = 0,355$ p = 0,789	

BP-Amplitude im Zeitfenster -1500 bis -1000 ms vor der Bewegung

Faktor	Uhr	Mindestzeitabstand	Elektrode	Uhr x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 1,847 p = 0,181	F = 2,118 p = 0,173	F = 0,070 p = 0,976	F = 0,991 p = 0,387
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,607$ p = 0,198	$\epsilon = 1,000$ p = 0,173	$\epsilon = 0,501$ p = 0,886	$\epsilon = 0,634$ p = 0,358
Faktor	Uhr x Elektrode	Mindestzeitabst. x Elektrode	Uhr x Mindestzeitabst. x Elektrode	
Signifikanz	F = 0,452 p = 0,841	F = 0,015 p = 0,997	F = 0,771 p = 0,595	
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,760$ p = 0,718	$\epsilon = 0,318$ p = 0,980	$\epsilon = 0,355$ p = 0,527	

Analyse der Untergruppen: Standardabweichungen

Faktor	Uhr	Mindestzeitabstand	Uhr x Mindestzeitabstand
Signifikanz	F = 53,619 p = 0,000	F = 41,856 p = 0,000	F = 24,817 p = 0,000
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\varepsilon = 0,681$ p = 0,000	$\varepsilon = 1,000$ p = 0,000	$\varepsilon = 0,866$ p = 0,000
Faktor	Uhr x Untergruppe	Mindestzeitabst. x Untergruppe	Uhr x Mindestzeitabst. x Untergruppe
Signifikanz	F = 3,204 p = 0,052	F = 0,161 p = 0,696	F = 1,844 p = 0,184
Greenhouse-Geisser-Korrektur	$\varepsilon = 0,681$ p = 0,086	$\varepsilon = 0,681$ p = 0,696	$\varepsilon = 0,681$ p = 0,190
Faktor	Gruppeneffekt Untergruppe		
Signifikanz	F = 243,924 p = 0,000		

Analyse der Untergruppen: BP-Maximum (-300 bis -100 ms vor der Bewegung)

Faktor	Uhr	Mindestzeitabst.	Elektrode	Uhr x Mindestzeitabst.	Uhr x Elektrode
Signifikanz	F = 0,557 p = 0,582	F = 0,002 p = 0,968	F = 4,831 p = 0,007	F = 1,290 p = 0,297	F = 0,915 p = 0,490
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,929$ p = 0,570	$\epsilon = 1,000$ p = 0,968	$\epsilon = 0,883$ p = 0,010	$\epsilon = 0,971$ p = 0,297	$\epsilon = 0,322$ p = 0,414
Faktor	Mindestzeitabst. x Elektrode	Uhr x Mindestzeitabst. x Elektrode	Uhr x Untergruppe	Mindestzeitabst. x Untergruppe	Elektrode x Untergruppe
Signifikanz	F = 0,640 p = 0,595	F = 0,252 p = 0,957	F = 0,133 p = 0,877	F = 0,230 p = 0,642	F = 1,072 p = 0,376
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,725$ p = 0,550	$\epsilon = 0,363$ p = 0,797	p = 0,863	p = 0,642	p = 0,372
Faktor	Uhr x Mindestzeitabst. x Untergruppe	Uhr x Elektrode x Untergruppe	Mindestzeitabst. x Elektrode x Untergruppe	Uhr x Mindestzeitabst. x Elektrode x Untergruppe	Gruppeneffekt Untergruppe
Signifikanz	F = 0,800 p = 0,463	F = 0,655 p = 0,686	F = 0,482 p = 0,697	F = 0,794 p = 0,578	F = 11,424 p = 0,007
Greenhouse- Geisser- Korrektur	p = 0,460	p = 0,526	p = 0,640	p = 0,474	

Untergruppen: BP-Amplitude im Zeitfenster -1500 bis -1000 ms vor der Bewegung

Faktor	Uhr	Mindestzeitabst.	Elektrode	Uhr x Mindestzeitabst.	Uhr x Elektrode
Signifikanz	F = 1,699 p = 0,208	F = 2.005 p = 0,187	F = 0,068 p = 0,976	F = 1,281 p = 0,300	F = 0,449 p = 0,843
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,603$ p = 0,221	$\epsilon = 1,000$ p = 0,187	$\epsilon = 0,466$ p = 0,873	$\epsilon = 0,656$ p = 0,293	$\epsilon = 0,489$ p = 0,716
Faktor	Mindestzeitabst. x Elektrode	Uhr x Mindestzeitabst. x Elektrode	Uhr x Untergruppe	Mindestzeitabst. x Untergruppe	Elektrode x Untergruppe
Signifikanz	F = 0,015 p = 0,997	F = 0,747 p = 0,957	F = 0,121 p = 0,887	F = 0,410 p = 0,536	F = 0,773 p = 0,518
Greenhouse- Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,622$ p = 0,981	$\epsilon = 0,614$ p = 0,539	p = 0,780	p = 0,536	p = 0,436
Faktor	Uhr x Mindestzeitabst. x Untergruppe	Uhr x Elektrode x Untergruppe	Mindestzeitabst. x Elektrode x Untergruppe	Uhr x Mindestzeitabst. x Elektrode x Untergruppe	Gruppeneffekt Untergruppe
Signifikanz	F = 4,223 p = 0,030	F = 0,933 p = 0,478	F = 1,084 p = 0,371	F = 0,655 p = 0,686	F = 11,424 p = 0,007
Greenhouse- Geisser- Korrektur	p = 0,052	p = 0,436	p = 0,355	p = 0,594	

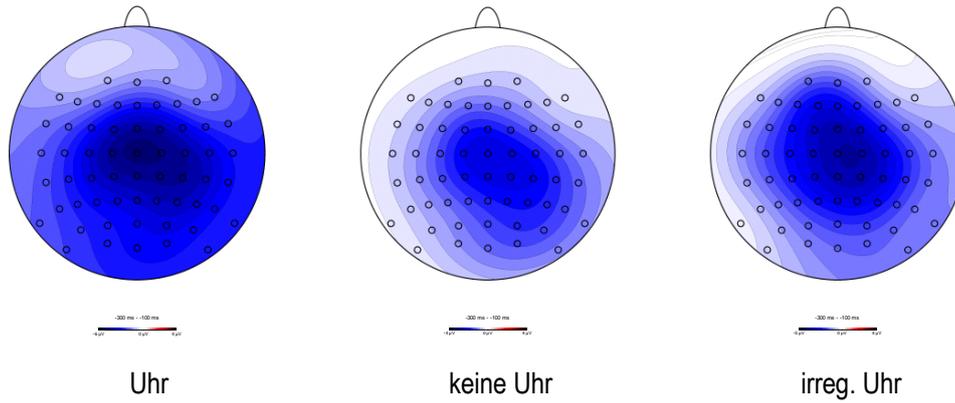
Separate Analyse bei 4 s Mindestzeitabstand

Faktor	Uhr	Uhr x Untergruppe	Gruppeneffekt Untergruppe
Signifikanz	F = 2,381 p = 0,118	F = 1,094 p = 0,354	F = 1,101 p = 0,319
Greenhouse-Geisser- Korrektur	$\epsilon = 0,608$ p = 0,146	p = 0,331	p = 0,898

7.2 Topografische Karten

Experiment 2

Nachtrag aus dem Abschnitt 3.2.3: Topografische Verteilung der Spannungswerte des BP-Maximums zum Zeitpunkt -300 ms bis -100 ms vor der Bewegung bei 2 s Mindestzeitabstand. Ansicht von oben, im Zentrum befindet sich die Elektrode Cz.



7.3 Votum der Ethikkommission:



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 Studienerweiterung 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)

7.4 Aufklärungsbogen

UNIVERSITÄTSKLINIKUM Schleswig-Holstein
Campus Lübeck
Klinik für Neurologie
Direktor: Prof. Dr. med. Thomas Münte

Universitätsklinikum S-H, Klinik für Neurologie, Ratzeburger Allee 160 23538 Lübeck

Campus Lübeck

Unser Zeichen:

Auskunft erteilt:

Prof. Dr. Rolf Verleger, Dipl.-Psych.

Telefon: 0451 / 500 -2916

Telefax: 0451 / 500-2489

E-Mail: Rolf.Verleger@neuro.uni-luebeck.de

Datum: 01.06.2016

Teilnehmer-Aufklärung für EEG- Untersuchung

Von Frau/Herrn _____,

geboren am _____.

Sehr geehrte Studienteilnehmerin, sehr geehrter Studienteilnehmer,

Thema der Forschung in unserem EEG-Labor der Neurologischen Klinik ist, wie das Gehirn bei Wahrnehmung, Gedächtnis und Bewegungskontrolle funktioniert und wie demzufolge Ausfälle solcher Leistungen bei neurologischen Patienten erklärt werden können.

Als Mittel zur Untersuchung dienen uns ereignisbezogene Potentiale des EEG. Diese elektrischen Potentiale der Hirnrinde, ausgelöst bei der Wahrnehmung von Ereignissen und bei der Vorbereitung auf Handlungen, können von außen mit Elektroden an der Kopfhaut gemessen werden.

Für die Messung des EEGs setzen wir Ihnen eine Haube mit 64 Elektroden auf und reiben Gel (Hauptbestandteile: Kochsalz, Wasser) auf die Kopfhaut. Des Weiteren werden 5 Elektroden ins Gesicht geklebt, um Augenbewegungen zu registrieren. Dazu wird das Gesicht vorher mit Alkohol und einer Peelingpaste gereinigt. Wenn alle Elektroden angebracht sind, wird deren Übergangswiderstand zur Kopfhaut gemessen, um zu überprüfen, ob die Gehirnaktivität gut gemessen werden kann.

Das Gel kann in manchen Fällen Hautrötungen verursachen. Weitergehende Nebenwirkungen sind uns nicht bekannt.

Die Teilnahme an dieser Studie ist zu jedem Zeitpunkt freiwillig und kann ohne Bedingungen jederzeit, d.h. auch während der Messungen, durch den Versuchsteilnehmer beendet werden. Für die Durchführung der Untersuchung wurde keine eigene Versicherung abgeschlossen. Im Falle einer Schädigung haftet das Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck, nach den allgemeinen Haftungsgrundsätzen des Universitätsklinikums.

Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
Anstalt des Öffentlichen Rechts

Bankverbindungen:
Dresdener Bank Lübeck Nr.: 3 000 412 00 (BLZ 230 800 40)
Postbank Hamburg Nr.: 38 56 51 – 207 (BLZ 200 100 20)

7.5 Einverständniserklärungen

UNIVERSITÄTSKLINIKUM Schleswig-Holstein

Campus Lübeck

Klinik für Neurologie

Direktor: Prof. Dr. med. Thomas Münte

Universitätsklinikum S-H, Klinik für Neurologie, Ratzeburger Allee 160 23538 Lübeck

Campus Lübeck

Unser Zeichen:

Auskunft erteilt:

Prof. Dr. Rolf Verleger, Dipl.-Psych.

Telefon: 0451 / 500 -2916

Telefax: 0451 / 500-2489

E-Mail: Rolf.Verleger@neuro.uni-luebeck.de

Datum: 05.04.2016

Einwilligungserklärung der Studienteilnehmerin/ des Studienteilnehmers

Von Frau/Herrn _____,

geboren am _____

Frau Kamila Smigasiewicz hat mich anhand der schriftlichen Teilnehmererklärung über meine Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie informiert und ich konnte alle mich interessierenden Fragen stellen.

Ich bin einverstanden, in dieser Studie als Probandin/ Proband teilzunehmen, kann aber jederzeit ohne Angabe von Gründen diese Einwilligung entziehen.

Ich bin ferner einverstanden, dass meine im Rahmen dieser Arbeit erstellten personenbezogenen Daten nach vollständiger Anonymisierung durch die an dieser Arbeit beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter der Klinik für Neurologie analysiert, elektronisch gespeichert und in wissenschaftlichen Veröffentlichungen benutzt werden.

Lübeck, den _____

Unterschrift der Studienteilnehmerin/ des Studienteilnehmers

Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
Anstalt des Öffentlichen Rechts

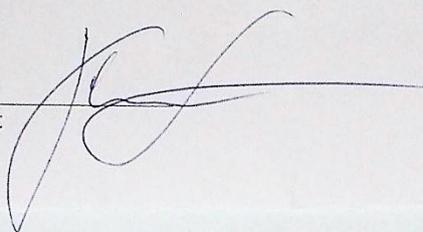
Bankverbindungen:
Dresdener Bank Lübeck Nr.: 3 000 412 00 (BLZ 230 800 40)
Postbank Hamburg Nr.: 38 56 51 – 207 (BLZ 200 100 20)

Zustimmungserklärung zur Veröffentlichung von Fotos in einer Dissertation

Hiermit erkläre ich Valentina Sheric, dass ich damit einverstanden bin, dass 3 Fotos von mir (siehe Anlage) in der Dissertation über das Bereitschaftspotential von Mechthild Haake veröffentlicht werden.

Mechthild Haake sichert zu, dass ohne Zustimmung der Unterzeichnenden Rechte an den im Rahmen der Dissertation veröffentlichten Fotos nicht an Dritte veräußert, abgetreten usw. werden.

Die Verfasserin der Dissertation kann nicht dafür haften, dass Dritte ohne Wissen der Verfasserin den Inhalt der Dissertation für weitere Zwecke nutzen, so insbesondere auch durch das Herunterladen und/oder Kopieren von Fotos.

Göttingen, d. 11.17
Ort/Datum/Unterschrift 

7.6 Deutsche Fassung des Edinburgh Handedness Inventory

Datum _____ Versuchsperson Nr. _____

Name: _____

Telefon: _____

Geburtsdatum: _____

Email: _____

Straße: _____

Plz./ Wohnort: _____

Geschlecht (bitte ankreuzen) weiblich _____ männlich _____

Medikamente:

Haben Sie gesundheitliche Beschwerden? Wenn ja, welche?

Ja _____ Nein _____

Ausbildung (Zutreffendes ankreuzen): Realschulabschluss __ Abitur __

Berufsausbildung __ Studium __ Sonstiges __

Derzeitige Tätigkeit: berufstätig, wenn ja, was? _____

Selbstständig, wenn ja, was? _____ Sonstiges: _____

Tragen Sie eine Brille? Ja _____ Nein _____

Händigkeit: Bitte **2 Kreuze** für bevorzugte Hand oder je **1 Kreuz** bei beidseitiger BenutzungMit welcher **Hand**...

schreiben Sie?	Links	Rechts
zeichnen Sie?	Links	Rechts
werfen Sie einen Ball?	Links	Rechts
benutzen Sie eine Schere?	Links	Rechts
putzen Sie die Zähne?	Links	Rechts
schneiden Sie mit einem Messer? (ohne Gabel)	Links	Rechts
benutzen Sie einen Löffel?	Links	Rechts
fegen Sie? (obere Hand am Besen)	Links	Rechts
zünden Sie Streichhölzer an?	Links	Rechts
öffnen Sie einen Behälter?	Links	Rechts

Mit welchem **Fuß** schießen Sie beim Fußball bevorzugt? links rechtsMit welchem **Auge** gucken Sie, wenn Sie nur eines benutzen? links rechts

7.7 Standardisierte Versuchsanweisungen

EEG-Studie "Das Bereitschaftspotential bei Variation der Mindestzeit"

Standardisierte Versuchsanweisung Experiment 1:

Generell:

- Keine Handys/ elektronischen Geräte im Versuchsraum
- Fixationskreuz durchgehend anschauen
- Ruhig sitzen, nicht Kauen
- Blinzeln ausdrücklich nicht erwähnen

Aufgabenstellung:

- Nach Belieben linke Maustaste drücken
- Nur der Mindestzeitabstand muss eingehalten werden, dieser ist vorgegeben und ändert sich nach jedem Versuchsblock
- Pro Block gibt es 50 Wiederholungen, die ersten drei sind zum Üben, danach möglichst keine Fehler mehr
- Bei Fehler erscheint Fehlermeldung "Zu früh gedrückt", danach warten bis Meldung ausgeblendet wird, dann erst fortfahren
- Zwischen den Blöcken gibt es eine Pause, zum Fortfahren Versuchsleiter informieren
- Aufgaben so gut es geht durchführen

Standardisierte Versuchsanweisung Experiment 2:

Generell:

- Keine Handys/ elektronischen Geräte im Versuchsraum
- Fixationskreuz durchgehend anschauen
- Ruhig sitzen, nicht Kauen
- Blinzeln ausdrücklich nicht erwähnen

Aufgabenstellung:

- Nach Belieben linke Maustaste drücken
- Nur der Mindestzeitabstand muss eingehalten werden, dieser ist vorgegeben und ändert sich nach jedem Versuchsblock.
- Es gibt drei Rahmenbedingungen, einmal tickt eine Uhr, einmal tickt eine Uhr unzuverlässig, einmal gibt es keine Uhr (bzw. kein Ticken wird vorgespielt)
- In Gedanken die Sekunden mitzuzählen, ist in Ordnung
- Pro Block gibt es 60 Wiederholungen, die ersten drei sind zum Üben, danach möglichst keine Fehler mehr
- Bei Fehler erscheint Fehlermeldung „Zu früh gedrückt“, danach warten bis Meldung ausgeblendet wird, dann erst fortfahren
- Zwischen den Blöcken gibt es eine Pause, zum Fortfahren Versuchsleiter informieren
- Aufgaben so gut es geht durchführen
- Fragen?

7.8 Fragebögen

Fragebogen zu Experiment 1:

1. Wie bist du mit der Aufgabenstellung zurande gekommen?

sehr gut sehr schlecht

2. Was fiel dir schwerer?

Innerlich zählen Nicht zählen kein Unterschied

3. Hast du bei der Anweisung "nicht innerlich zählen" nicht zählen können?

a) Ja (ich habe nicht mit gezählt) Nein (ich habe doch gezählt)

b) Falls ja, was war deine Strategie, um das Zählen zu vermeiden?

Originalantworten im Freitext

Frage 4 b)

- Nichts Besonderes, einfach abgewartet.
- Melodie im Kopf summen, Rhythmus einhalten.
- Melodien „gedacht“.
- Auf eigene Atmung konzentriert.
- An andere Sachen zu denken und nur nebenbei zu klicken
- I was thinking about what I will do after this experiment. What I will cook. Also, I thought about how other people can react with this experiment, if they are able to count all the clicks meanwhile they are focussing on the task. However, what I think helped me was to imagine a song that I listened to this morning on the radio. This gave me some references... but I guess this also is a way of counting.
- Ich habe versucht, eine Art Rhythmus zu finden. Das fiel bei den kürzeren Zeitabständen leichter. Bei den längeren habe ich auch auf die Atmung geachtet, um eine Zeiteinschätzung zu bekommen – habe dann aber versucht, das zu lassen, weil es ja quasi Zählen ist.
- Ablenkung, Songtexte im Kopf durchgehen (teils Melodie).
- Auf die Atmung achten
- Mir sind zwischenzeitlich Gedanken über den heutigen Tag in den Kopf gekommen, sprich, was ich noch vorhabe usw. Habe aber versucht, dies zu vermeiden.
- An andere Dinge gedacht (Urlaub), die nichts mit Zeitabständen zu tun haben.
- Nach Atmung orientiert.
- Auf die Atmung achten, Sätze vorsagen.
- Atemmoduliert klicken.
- Atmen (Atemzyklus).
- An nichts denken und dann kurz erinnern, dass man ja mal klicken muss.
- Bei den 1 und 2 Sekunden Pausen konnte man sich an eine Art Rhythmus gewöhnen.

Fragebogen zu Experiment 2:

1. Was fiel am schwersten?

Keine Uhr

Zuverlässiges Ticken
der Uhr

Unzuverlässiges
der Uhr

2. Zu wie viel Prozent hast du dich an der Uhr orientiert bei zuverlässigem Ticken der Uhr?

_____ %

3. Zu wie viel Prozent hast du dich an der Uhr orientiert bei unzuverlässigem Ticken der Uhr?

_____ %

4. Woran hast du dich orientiert, als kein Ticken zu hören war?

5. Woran hast du dich orientiert, als die Uhr unzuverlässig getickt hat?

6. Woran hast du dich orientiert, als die Uhr zuverlässig getickt hat?

7.8.1 Originalantworten im Freitext

Frage 4)

- Zählen in Gedanken von 21 – 22/ 24.
- Zählen und Zeitgefühl.
- Innerlich selbst gezählt.
- Inneres Zählen und Atemzüge, teils synchron.
- Herzschlag, Atmung, Zählen im Kopf.
- Ich habe mich an meinem eigenen Zeitgefühl und Körpergefühl orientiert. Ich habe immer 1-2, 1-2... gezählt.
- Ich habe mir die Uhr vorgestellt.
- Zählen im Kopf.
- Am eigenen Puls.
- Zählen im Kopf, 21...
- Ich habe das selbst gerechnet – 21.
- „21, 22“ Mitsprechen im Kopf.

Frage 5)

- Zählen in Gedanken von 21 – 22/ 24, während ich nach Möglichkeit die Uhr ignoriert habe.
- Zählen und Rhythmusgefühl.
- Selbst gezählt.
- Inneres Zählen und Atemzüge, teils synchron.
- Herzschlag, Atmung.
- Im Kopf gezählt, mich an das Ticken der Uhr erinnert, 1-2, 1-2 ...
- An meinem Atem (4 s), Intuition (2 s).
- Zählen im Kopf, an und zu auch die Uhr.
- Am eigenen Puls.
- Zählen im Kopf, 21...
- Ich habe das selbst gerechnet – 21.
- „21, 22“ Mitsprechen im Kopf.

Frage 6)

- Die Uhr, größtenteils, plus ein bisschen Mit zählen.
- An der Anzahl der Schläge.
- Selbst gezählt.

- Inneres Zählen, abgestimmt auf die Uhr.
- Urticken, Zählen.
- Zum größten Teil an dem Ticken der Uhr.
- An der Uhr (gezählt).
- Gefühl/ Mitzählen des Tickens.
- An der Uhr
- An der Uhr.
- Ich habe das selbst gerechnet und Ich habe die Uhr gehört.
- An der Uhr.

8 Danksagung

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dem Leiter der Klinik für Neurologie, Prof. Dr. Thomas F. Münte, gebührt mein Dank für die vertrauensvolle Überlassung der Räumlichkeiten und Materialien, die zu Stätte und Stoff dieser Arbeit wurden.

Prof. Dr. rer. soc. Rolf Verleger möchte ich ausdrücklich für die Überlassung des Themas und die hervorragende Betreuung danken. Wohl kaum ein anderer Doktorvater ist für seinen wissenschaftlichen Nachwuchs menschlich, räumlich und zeitlich so erreichbar gewesen wie Prof. Verleger. Danke für den guten Nährboden aus Wertschätzung, konstruktiver Kritik und Geduld. Selbstverständlich haben alle Abschnitte dieser Arbeit von seiner außerordentlichen Fachkenntnis und seinem Engagement profitiert.

Großen Dank möchte ich Dr. Kamila Śmigasiewicz aussprechen, die Herz und Konstante des EEG-Labors war. Danke für das Beantworten der manchmal nicht enden wollenden Fragen und das geduldige Anlernen vor dem Durchführen der Experimente.

Vielen Dank auch an Leonie und Ulrike und meine zahlreichen Doktorschwestern und -brüder. Ihr habt die Tage im EEG-Labor zu geselligen Tagen gemacht.

Den Probandinnen und Probanden danke ich für ihre Ausdauer und Motivation bei der Durchführung der Experimente.

Für die Bereitstellung der Elektrolytpaste, als diese in unserem Institut nicht zu bekommen war, gilt mein Dank dem Institut für Neuroendokrinologie und Prof. Dr. rer. medic. Lisa Marshall.

Ein besonderer Dank gilt meinen lieben Eltern Gertrud und Borchert und meinem lieben Bruder Lorenz, dafür, dass sie mich immer begleiten, bedingungslos unterstützen und mit Liebe und Neugierde an meinem Leben teilhaben. Euer großes Interesse am Vorankommen dieser Dissertation erfüllt mich mit Freude und Stolz.

Ein liebevolles Dankeschön auch an meinen Freund Malte für seinen Rückhalt und dafür, dass auch wenn ich mich selbst nicht immer verstehe, er mich immer zu verstehen sucht.

Oma, dir möchte ich diese Arbeit widmen, mit der ich dir so gerne eine Freude gemacht hätte.

9 Lebenslauf

Mechthild Maria Haake

geboren 04.03.1990 in Bremen



Promotion

März 2015 bis November 2016 Experimentelle Untersuchungen für diese Dissertation

Wintersemester 15/16 Freisemester zur Fortführung der Dissertation

März 2016-August 2016 Förderung durch Promotionsstipendium Lübecker Exzellenzmedizin

Dezember 2016 Veröffentlichung einer Originalarbeit über Inhalte der Dissertation

Schule und Studium

Juli 2009 allgemeine Hochschulreife (Ökumenisches Gymnasium zu Bremen)

September 2009 – März 2010 Volontariat an Grundschule und Krankenhaus in Ghana

Oktober 2010 – Immatrikulation für das Studium der Humanmedizin an der Universität zu Lübeck

August 2012 Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

April 2016 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

Mai 2016 bis Mai 2017 Praktisches Jahr in Itzehoe, Darmstadt und Lübeck

Juni 2017 Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

10 Publikationsliste

Die experimentellen Daten dieser Arbeit sind Bestandteil einer Originalarbeit, eines Posters sowie einiger Vorträge.

Die Originalarbeit erschien am 21.12.2016 in *Frontiers in Human Neuroscience* (10:642) unter dem Titel „Time to Move Again: Does the Bereitschaftspotential Covary with Demands on Internal Timing? “. Koautoren waren Prof. Rolf Verleger, Kamila Śmigasiewicz und Alexandra Baur. doi: 10.3389/fnhum.2016.00642

Das Poster wurde im Rahmen von „Uni im Dialog“, beim Doktorandentag 2015 der Universität zu Lübeck unter dem Titel „Eine Verteidigung des freien Willens oder das Bereitschaftspotential als innere Uhr“ gezeigt.

Die Vorträge wurden gehalten von Prof. Rolf Verleger (bei der Konferenz des Lübecker Center of Brain, Behavior and Metabolism (CBBM), März 2015 in Eutin; bei der dritten Internationalen Konferenz der European Society for Cognitive and Affective Neuroscience (ESCAN), Juni 2016 in Porto, Portugal; bei der Arbeitstagung „Diskurs über Neuropsychologie“, März 2018, an der Sigmund-Freud-Universität in Wien, Österreich) und Mechthild Haake (Wintersymposium, Januar 2016, Montafon, Österreich).