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

Wie werden P3b-Amplituden während Rateaufgaben evoziert? Eine entsprechende Anwendung der S-R-Link-Hypothese auf Vergleichsaufgaben

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

vorgelegt von
Stephanie Cäsar
geboren in Haltern

Lübeck 2020

1. Berichterstatterin/Berichterstatter: PD Dr. Anna Cirkel

2. Berichterstatterin/Berichterstatter: Prof. Dr. Martin Driessen

Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2021

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 22.07.2021

Promotionskommission der Sektion Medizin

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG 2

1.1 Ereigniskorrelierte Potentiale 2

1.2 Die P300 3
1.2.1 Theorien über die P3b 4
1.2.2 Die Bedeutung der P3b-Amplitude bei Rate- und Vergleichsaufgaben 5

1.3 Erwartete Ergebnisse 7

2 METHODEN 10

2.1 Versuchspersonen 10

2.2 Versuchsaufbau 10

2.3 EEG Ableitungen 11

2.4 Versuchsablauf 13

2.5 Datenverarbeitung 18

3 ERGEBNISSE 21

3.1 Häufigkeiten der unterschiedlichen Ereigniskombinationen 22

3.2 Reaktionszeiten auf S2 23
3.2.1 Reaktionszeit in Bezug auf die Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses 25
3.2.2 Reaktionszeit in Bezug auf den Aufgabentyp 26
3.2.3 Reaktionszeit in Bezug auf die Aufgabenversion 27

3.3 Fehlerrate 27
3.3.1 Fehlerrate in Bezug auf die Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses 29
3.3.2 Fehlerrate in Bezug auf den Aufgabentyp 29
3.3.3 Fehlerrate in Bezug auf Aufgabenversion 30

3.4 Reaktionszeit auf S1 bzw. S0 30

3.5 Ereigniskorrelierte Potentiale 30
3.5.1 Die P3 in Bezug auf die Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses 34
3.5.2 Die P3 in Bezug auf den Aufgabentyp 34
3.5.3 Die P3 in Bezug auf die Aufgabenversion 34
3.5.4 Ereigniskorrelierte Potentiale vor dem ersten Ereignis 35
3.5.4.1 CNV 35
3.5.4.2 P3 evoziert durch S1 37

4 DISKUSSION 39

4.1 Effekte der Häufigkeiten der Ereigniskombinationen auf die P3-Amplitude 41

4.2 Größere P3-Amplituden in Rate- als in Vergleichsaufgaben 44

4.3 S1- evozierte P3-Amplituden 47

4.4 Auswirkungen auf die Reaktionszeiten und Fehlerraten 48

5 ZUSAMMENFASSUNG 51

6 LITERATURVERZEICHNIS 53

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 58

8 TABELLENVERZEICHNIS 59

9 ETHIKANTRAG 60

10 DANKSAGUNG 61

11 LEBENSLAUF 62

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
CNV	Contingent Negative Variation
EEG	Elektroenzephalogramm
EKP	Ereigniskorrelierte Potentiale
EPSP	Exzitatorisches postsynaptisches Potential
ERP	Event-Related Potentials
EOG	Elektrookulogramm
Hz	Hertz
IPSP	Inhibitorisches postsynaptisches Potential
kΩ	Kiloohm
ms	Millisekunde
µV	Microvolt
n. s.	nicht signifikant
R1	erste Reaktion
R2	zweite Reaktion
S1	erster Reiz
S2	zweiter Reiz/Zielreiz
s	Sekunde
S-R-Link-Hypothese	Reiz-Reaktion-Verbindungs-Hypothese

1. Einleitung

Beschäftigt sich das menschliche Gehirn mit Rateaufgaben, können Potentialschwankungen an der Kopfhaut gemessen werden. Eine markante Potentialschwankung im Elektroenzephalogramm (EEG) ist die P3-Welle, deren Bedeutung jedoch sehr umstritten ist. Das Auftreten der P3-Welle während der Ausführung von Rateaufgaben soll in diesem Experiment anhand der S-R-Link-Hypothese besser verstanden werden. Dafür wurden EEG-Potentiale während der Ausführung von Vergleichs- und Rateaufgaben aufgezeichnet und gegenübergestellt.

EEG-Potentiale sind Potentialschwankungen zwischen zwei Punkten, die an der Kopfhaut gemessen und aufgezeichnet werden können (Berger, 1929; Luck, 2014). Durch Verschiebung von Ionen zwischen dem extrazellulären und intrazellulären Raum einer Nervenzelle entstehen – abhängig von der Ladung der Ionen – Potentialänderungen des Ruhemembranpotentials. Dabei kann es zu Hyperpolarisationen und zu Depolarisationen von Zellen kommen (Hoth, et al., 2016). Postsynaptisch entstehen somit EPSPs (exzitatorische postsynaptische Potentiale) und IPSPs (inhibitorische postsynaptische Potentiale) (Birbaumer und Schmidt, 2010). Im EEG werden summierte, synchron auftretende, postsynaptische Potentiale von Nervenzellen vom Kortex abgeleitet und generieren bestimmte Wellen und Muster (Hoth, et al., 2016). Den größten Anteil liefern dabei die EPSPs an den Synapsen der Pyramidenzelldendriten (Silbernagel und Despopoulos, 2007). Die Wellen und Muster lassen dabei Rückschlüsse auf die Aktivitätszustände der Hirnrinde zu und werden sowohl in der Forschung als auch in der klinischen Untersuchung genutzt (Birbaumer und Schmidt, 2010). „*Das Spontan-EEG repräsentiert die Aktivität von unterschiedlichen Neuronengruppen an verschiedenen Punkten des Kortex, wodurch das EEG in seiner Rohfassung eine unspezifische Messmethode darstellt*“ (Luck, 2014).

1.1 Ereigniskorrelierte Potentiale

Da das EEG die Aktivität von verschiedenen Bereichen präsentiert, ist es schwierig, isolierte individuelle neurokognitive Prozesse darzustellen (Luck, 2014). Eine Möglichkeit, die sowohl in der Klinik und als auch in der Forschung eingesetzt wird,

um mittels EEG die Funktionen des Nervensystems begreifen zu können, sind ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) bzw. Event-Related Potentials (ERPs).

Unter ereigniskorrelierten Potentialen werden Potentialschwankungen im EEG verstanden, die in einem zeitlichen Zusammenhang mit einem bestimmten Ereignis stehen (Luck und Kappenman, 2012). Dieses Ereignis kann ein Reiz sein, der ein spezifisches Sinnessystem anspricht, zum Beispiel durch visuelle Reize die Sehbahn oder durch akustische Reize die Hörbahn (Luck, 2014). Hierdurch kann eine isolierte Funktionsprüfung dieser Reizleitungsbahnen stattfinden (Krozovska, 2014). In der Forschung werden ereigniskorrelierte Potentiale genutzt, um kognitive Prozesse besser nachvollziehen zu können (Luck, 2014; Sutton et al., 1965; Polich, 2007). Die Wellen, die durch ereigniskorrelierte Potentiale auftreten, können in Komponenten unterteilt werden. Zwei besonders häufig diskutierte ERP-Komponenten stellen die „Contingent Negative Variation“ und die P300 (oder auch P3) dar. Die „Contigent Negative Variation“ (CNV) ist eine negative Potentialverschiebung, die vor allem im frontalen Bereich zwischen einem Warnsignal und einem Zielsignal auftritt (Walter, et al.,1964; Luck, 2014). Es wird davon ausgegangen, dass die CNV die Erwartung und Vorbereitung auf den folgenden Reiz widerspiegelt (Walter, et al., 1964; Brunia, 2003, Brunia et. al., 2012). Eine weitere offensichtliche ERP-Komponente stellt die P3 dar, deren Bedeutung Thema dieser Arbeit ist.

1.2 Die P300

Die P300 oder auch P3 stellt die größte positive Potentialverschiebung nach einem Reiz dar. “*However, the most dramatic difference is in the large positive deflection whose latency at peak amplitude is about 300 ms*” (Sutton, et al., 1965).

Benannt wurde die Potentialverschiebung nach dem zeitlichen Auftreten 300 ms nach dem Reiz (Ritter et al. 1968; Polich 2007). Dabei wurde als Zeitfenster das Auftreten des Reizes bis zu dem Punkt der maximalen positiven Amplitude definiert (Polich, 2007). Die maximale P3-Amplitude wandert von der frontalen zur temporalen und parietalen Region, sie kann in zwei Unterkomponenten, die P3a und die P3b, unterteilt werden (Gaeta et al., 2003; Dien et al., 2004; Polich 2007, Verleger, 2008). Die Generatoren der P3a liegen im frontalen Kortex, danach sind

Areale der temporo-parietalen Region aktiv, welche vermutlich die Generatoren der P3b darstellen (Polich, 2007).

Über die Bedeutung der P3a, die als ein Aufmerksamkeitsprozess gedeutet wird, der sich durch eine Veränderung im frontalen Bereich während der Aufgabenverarbeitung ausdrückt, besteht größtenteils Einigkeit (Polich 2007; Verleger, 2020). Die Bedeutung der P3b in der parietalen Region ist Thema zahlreicher Diskussionen (Verleger, 2020). Daher ist in den meisten Publikationen, die sich auf die P3 Komponente beziehen, die P3b Komponente gemeint (Luck, 2014). In einigen Studien konnte nachgewiesen werden, dass die P3b-Amplitude bei psychologischen und neurologischen Erkrankungen reduziert ist (Mathalon et al, 2000; Devrim- Üçok et al., 2006; Beste et al., 2009).

Eine weitere Besonderheit der P3b ist, dass die Größe der P3b-Amplitude von der Auftretenswahrscheinlichkeit des Reizes abhängig ist. Wenn die Auftretenswahrscheinlichkeit des Reizes kleiner wird, nimmt dagegen die P3b-Amplitude zu. Dieser Effekt wird auch als Oddball-Effekt bezeichnet (Duncan-Johnson und Donchin,1977; Pfefferbaum, 1985; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a).

1.2.1 Theorien über die P3b

Eine häufig zitierte Theorie zur Bedeutung der P3b stellt die „Context Updating“ Hypothese dar (Donchin, 1981). Diese geht davon aus, dass nach einem Reiz zunächst eine sensorische Verarbeitung bzw. ein intensiver Vergleich des eingehenden Stimulus stattfindet. Der Stimulus wird mit den vorherigen Ereignissen verglichen und evaluiert. Wenn der Stimulus nicht als neu bewertet wird, finden laut der Theorie nur kleine Änderungen im bisherigen Handlungskontext statt. Tritt jedoch ein unerwarteter Reiz auf, muss der alte Handlungskontext neustrukturiert werden und es werden Konsequenzen für zukünftiges Verhalten gezogen. Dieser Aktualisierungsprozess stellt sich in der P3b dar (Duncan-Johnson und Donchin,1977; Polich, 2007).

Andere Ansätze diskutierten, ob die P3b als Indikator für die Arbeitskapazität nach einem Reiz genutzt werden könne. Dabei wird davon ausgegangen, dass die P3-Amplitude die Aktivierung einer Ereigniskategorisierung reflektiert, welche durch die Aufmerksamkeit und das Arbeitsgedächtnis beeinflusst werden (Kok, 2001).

Eine weitere Theorie geht eher davon aus, dass die P3b mit einem Prozess der Entscheidung über eine angemessene Reaktion auf den Stimulus in Verbindung steht (Squires, et al., 1973; Nieuwenhuis, 2005, O'Connell, et al., 2012) oder sogar die Bildung einer Entscheidung ausdrückt. "*Our results indicate that the P300 represents the formation of the decision itself*" (O'Connell, et al., 2012).

Es gibt darüber hinaus Annahmen, dass Wahrnehmung und Handlung nicht isoliert voneinander zu betrachten sind. Kognitive Repräsentationen von Ereignissen sollen nicht nur eine Repräsentationsfunktionen (z.B. Wahrnehmung) haben, sondern auch handlungsbezogene Funktionen erfüllen (Hommel, 2001).

In diese Richtung geht auch die Reiz-Reaktion-Verbindungs-Hypothese (S-R-Link Hypothese), die im Fokus dieser Arbeit liegt. Es wird davon ausgegangen, dass eine Verbindung zwischen Reiz und Reaktion besteht und dass die P3b-Amplitude eine Art Kurzform des Entscheidungsprozesses widerspiegelt. Die P3b zeigt die Reaktivierung einer bereits vorhandenen Reiz-Reaktions-Verbindung an (Verleger, et al., 2005; Verleger et al., 2014, Verleger et al., 2015b). Bei mehrfacher Wiederholung einer Entscheidung zwischen zwei Reizen muss der Proband sich nicht jedes Mal ausführlich entscheiden, sondern es bildet sich eine Brücke zwischen dem Reiz und der Reaktion aus, wie beispielsweise Reiz A – rechte Hand, Reiz B – linke Hand. Das Erscheinen des Stimulus würde diese Verbindung abrufen. Falls die Verbindung in den vorherigen Durchgängen nicht genutzt wurde, würde eine Reaktivierung benötigt. Die Amplitude der P3b spiegelt dabei „*die Reaktivierung der Reiz-Reaktions-Verbindung wider, dabei ist die Amplitude der P3 umso größer je fester diese Reiz-Reaktions-Verbindung ist und je weniger sie aktuell gebahnt war* " (Verleger, et al., 2005; Verleger et al., 2014, Verleger et al., 2015b).

1.2.2 Die Bedeutung der P3b-Amplitude bei Rate- und Vergleichsaufgaben

Wie schon beschrieben, besagt der Oddball-Effekt, dass die Amplitude der P3 umso größer wird, je seltener die Auftretenswahrscheinlichkeit des Reizes ist (Duncan-Johnson und Donchin,1977; Polich, 2007; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a).

In Rateaufgaben tritt ein ähnlicher Effekt auf (Tueting, et al., 1970; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a). Auch hier sind P3-Amplituden nach einem Reiz mit einer geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit größer als nach einem Reiz mit einer

größeren Auftretenswahrscheinlichkeit (Tueting, et al., 1970; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a). Die Frage, ob die durch Zielstimuli evozierten P3b-Amplituden nach fehlerhaften (Sutton et al.,1965) oder nach korrekten Vorhersagen (Bellebaum et al., 2010) größer sind, war umstritten (Verleger et al., 2015b).

Es könnte angenommen werden, dass seltene Zielreize größere P3-Amplituden evozieren, da sie unerwartet auftreten (Verleger et al., 2015b; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a).

Tatsächlich konnte in einer Studie ein Effekt der Vorhersage auf die P3-Amplitude bei häufigen Reizen gefunden werden: Die P3-Amplituden waren erhöht, wenn häufige Reize falsch vorhergesagt wurden, das heißt wenn ein häufiger Reiz erwartet wurde, jedoch ein seltener Reiz erschien. Andererseits wurde ein umgekehrter Effekt der Vorhersage für seltene Zielreize gefunden: Die P3-Amplituden waren erhöht, wenn seltene Stimuli korrekt vorhergesagt wurden (Verleger et al., 2015b).

Somit scheinen sowohl die Auftretenswahrscheinlichkeit des Zielreizes als auch die Auftretenswahrscheinlichkeit der Vorhersage einen kombinierten Einfluss auf die P3-Amplitude des vorhergesagten Reizes zu haben (Tueting, et al., 1970; Verleger et al., 2015b).

Mithilfe der S-R-Link-Hypothese ließe sich dieser kombinierte Einfluss von Auftretenswahrscheinlichkeit der Vorhersage und Auftretenswahrscheinlichkeit des Zielreizes erklären. Zunächst scheint die Anwendung dieser Hypothese auf Rateaufgaben schwierig, da in Rateaufgaben nach der Wahrnehmung des Reizes, im Gegensatz zu den Antwortauswahlaufgaben, normalerweise keine Reaktion gefordert wird. Daher stellt sich die Frage: Inwieweit gibt es tatsächlich Reaktionen, mit denen der Reiz eine Verbindung bilden könnte?

Die Idee der vorliegenden Arbeit ist, dass auf den zu erratenden Reiz durchaus eine interne Reaktion erfolgt, nämlich die Entscheidung, ob die Vorhersage richtig oder falsch war. Zwischen dem Reiz und dieser Reaktion würde sich eine Verbindung ausbilden. Dabei würde die Reaktivierung dieser Verbindung die P3b-Amplitude darstellen. Somit würde nicht nur die Auftretenswahrscheinlichkeit des Reizes, sondern auch die Auftretenswahrscheinlichkeit der Vorhersage die Größe der P3b-Amplitude beeinflussen. Von der Auftretenswahrscheinlichkeit der Vorhersage wäre nämlich die Reaktion *-passt* bzw. *-passt nicht* abhängig.

Sollen zum Beispiel in einer Rateaufgabe zwei Reize erraten werden, der eine häufig (H), der andere selten (S), dann würde sich zwischen Reiz und Reaktion (- *passt* oder - *passt nicht)* eine Verbindung ausbilden, zum Beispiel *H - passt.* Die Verbindung *H - passt* wäre vermutlich die am häufigsten genutzte Verbindung, da aufgabenbedingt der häufige Reiz vermutlich häufig vorhergesagt wird und aufgabenbedingt meistens mit der Vorhersage übereinstimmt. Da diese Verbindung durch die vorherigen Durchgänge bereits aktiviert wäre, würde sich im EEG eine kleine P3-Amplitude darstellen. Die Verbindung *H - passt nicht* dagegen müsste reaktiviert werden und würde deswegen eine größere P3-Amplitude evozieren. Das bedeutet konkret, dass ein Reiz nicht fest mit einer Reaktion verbunden ist, beispielsweise Reiz *H* mit *passt*, sondern dass es sowohl für Reiz H als auch für Reiz S eine Antwortauswahl zwischen Alternativen gibt (z.B. *H - passt, H - passt nicht*).

Diese Eigenschaften sind allerdings nicht spezifisch für Rateaufgaben. In anderen Aufgabentypen, in denen zwei Stimuli hintereinander auftreten, wäre diese Reaktion ebenfalls möglich. Gemäß der S-R-Link-Hypothese würde das Vergleichen von zwei Reizen ähnliche Effekte auf die P3b-Amplitude haben, da die Reaktion auf den Reiz ebenfalls davon abhängt, ob der erste Stimulus mit dem zweiten übereinstimmt. Um die Berechtigung dieser Überlegungen zu überprüfen, soll die Ähnlichkeit zwischen Vergleichs- und Rateaufgaben in der aktuellen Studie demonstriert werden.

1.3 Erwartete Ergebnisse

Es wurde untersucht, ob die P3-Amplitude in Rateaufgaben tatsächlich durch den Vergleich mit der vorangehenden Vorhersage beeinflusst wird. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden in unserem Experiment Vergleichs- und Rateaufgaben gegenübergestellt. In allen Aufgabentypen wurde je nachdem, ob der zweite Stimulus dem ersten gleicht, eine Reaktion gefordert. Die Effekte der Auftretenswahrscheinlichkeiten des vorangehenden Ereignisses wurden in beiden Aufgabentypen untersucht und miteinander verglichen.

Sowohl in den Rate- als auch in den Vergleichsaufgaben erschienen zwei Buchstaben mit unterschiedlicher Auftretenswahrscheinlichkeit, der eine häufig (H), der andere selten (S).

Als erstes Ereignis wurde in der Rateaufgabe vor jedem Durchgang eine Vorhersage häufiger (h) oder seltener (s) Buchstabe abgegeben und in der Vergleichsaufgabe erschien entweder der häufige (h) oder der seltene (s) Buchstabe. Als zweites Ereignis erschien entweder der häufige (H) oder der seltene (S) Buchstabe. Durch diese unterschiedlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten der Buchstaben ergaben sich vier verschiedene Ereigniskombinationen. Diese können sowohl abhängig von der Übereinstimmung (*H - passt, H - passt nicht, S - passt, S - passt nicht*) als auch abhängig von der Reihenfolge der Auftretenswahrscheinlichkeit (*häufig – häufig*, *häufig – selten, selten - häufig, selten - selten)* ausgedrückt werden. Die Ereigniskombinationen, die von der Übereinstimmung (*H - passt*) abhängig sind, eignen sich, um die S-R-Link Hypothese zu veranschaulichen. Jeder Zielreiz, der als zweites Ereignis auftritt, wird mit einer Reaktion - *passt* oder - *passt nicht* - verbunden. Abhängig davon, ob der zweite Reiz (z. B. *H*) dem ersten gleicht, wird eine der beiden Reiz-Reaktions-Verbindungen des Reizes aktiviert (z. B. *H - passt* oder *H - passt nicht*). Die Probanden wurden über die Auftretenswahrscheinlichkeiten von 80 % für den häufigen Buchstaben und 20 % für den seltenen Buchstaben informiert. Dadurch sollten die Probanden dazu verleitet werden, die Buchstaben ebenfalls ungefähr im Verhältnis 1:4 (selten : häufig) vorherzusagen.

Rate- und Vergleichsaufgaben unterscheiden sich vor allem darin, dass bei einer Vergleichsaufgabe als erstes Ereignis ein Reiz vom Computer gegeben wird, wohingegen bei Rateaufgaben als erstes Ereignis eine Vorhersage vom Probanden gefordert wird. Bei der Rateaufgabe kann dementsprechend die Häufigkeit der Vorhersage durch die Versuchsperson bestimmt werden, während bei der Vergleichsaufgabe die Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Ereignisses durch den Computer vorgegeben wird. Der zweite Reiz wird in beiden Aufgabentypen vom Computer gegeben. Daher ist die Auftretenswahrscheinlichkeit des zweiten Ereignisses in beiden Aufgabentypen vorgegeben und somit in beiden Aufgaben gleich. Die Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Ereignisses kann in Rateaufgaben bei der Vorhersage jedoch variieren.

Um in den Vergleichsaufgaben den ersten Reiz S1 mit dem zweiten Reiz S2 vergleichen zu können, wurde nach dem zweiten Reiz, abhängig davon ob der erste Reiz mit dem zweiten übereinstimmt oder nicht, eine Reaktion mittels Tastendruckes R2 gefordert (siehe Abbildung 6) . In gewöhnlichen Rateaufgaben erfolgt als erstes Ereignis eine Vorhersage mittels Tastendruckes R1, danach folgt

der Reiz S2. Damit die Aufgaben sich möglichst ähneln, wurde auch in den Rateaufgaben nach dem Zielreiz S2 eine Reaktion mittels Tastendruckes R2 gefordert. Die Aufgaben wurden so ähnlich wie möglich zueinander gestaltet (siehe Abbildung 5), um die Auswirkungen der unterschiedlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten der Reize auf die P3b-Amplitude in beiden Aufgabentypen beurteilen zu können. Daher gab es zudem noch eine weitere Aufgabenversionen der Rate- und der Vergleichsaufgabe. In der erweiterten Version der Rateaufgabe wurde nach der Vorhersage 30 ms nach dem Tastendruck des vermuteten Buchstabens dieser kurz eingeblendet. In der erweiterten Version der Vergleichsaufgabe sollte nach dem Erscheinen des Stimulus dieser mittels Tastendrucks bestätigt werden.

Somit enthielten die erweiterten Versionen der Rate- und Vergleichsaufgabe sowohl einen Tastendruck R1 (eine Vorhersage oder eine Bestätigung) als auch einen Reiz S1 (als informativer Stimulus oder als Wiederholung der Vorhersage), wohingegen die einfachen Versionen entweder R1 oder S1 beinhalteten. In allen Aufgaben erschien als zweites Ereignis ein Reiz S2, auf den eine Reaktion sowohl in der Vergleichs- als auch in der Rateaufgabe gefordert wurde.

Daher wurde vor dem Versuch erwartet, dass die Unterschiede zwischen den Rate- und Vergleichsaufgaben und den verschiedenen Aufgabenversionen keine große Rolle spielen würden. Die Auftretenswahrscheinlichkeiten des ersten und des zweiten Ereignisses würden ähnliche Effekte auf die P3b-Amplitude in beiden Aufgabentypen hervorrufen. Die Größe der P3b-Amplitude würde sowohl durch die Häufigkeit des ersten als auch des zweiten Ereignisses beeinflusst werden.

Die weniger genutzte Reiz-Reaktions-Verbindung würde eine größere P3b-Amplitude evozieren als die häufiger genutzte Reiz-Reaktions-Verbindung. Die Verbindung *H - passt* würde häufig aktiviert werden, die Verbindung *H - passt nicht* würde dagegen weniger häufig vorkommen, dadurch braucht die Verbindung *H - passt nicht* mehr Reaktivierung als *H - passt* und würde deswegen eine größere P3b-Amplitude evozieren. Die Verbindungen des seltenen zweiten Ereignisses würden sowohl bei Übereinstimmung als auch bei nicht Übereinstimmung nur wenig aktiviert sein und würden deswegen vermutlich eine größere P3b-Amplitude evozieren als die Verbindungen des häufigen Ereignisses. Dabei würde die Verbindung *S - passt nicht* vermutlich häufiger vorkommen als *- passt.*

Die Reaktionszeiten und die Fehlerrate würden sich nicht deutlich zwischen den Aufgabentypen und Versionen unterscheiden und die Häufigkeiten des ersten und

des zweiten Ereignisses würden ähnliche Effekte in beiden Aufgabentypen hervorrufen.

2 Methoden

2.1 Versuchspersonen

In die Versuche eingeschlossen waren 16 Probanden im Alter zwischen 20 und 27 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug 23 Jahre und die Standardabweichung 2 Jahre.

Die Versuchsperson 12 musste aufgrund technischer Fehler ausgeschlossen werden. Ein anderer Proband wurde dafür in der gleichen Aufgabenblockanordnung nachgemessen. An dem Experiment nahmen 8 weibliche und 8 männliche Probanden teil, 4 der Probanden waren Linkshänder, 12 Probanden Rechtshänder. Überprüft wurde dieses durch den „Edinburgh Handedness Inventory“ nach Oldfield. Der Durchschnittswert bei den Linkshändern betrug -72,5 die Standardabweichung 12,58. Bei den Rechtshändern 88,33 und die Standardabweichung 13,44. Die Probanden waren ausschließlich Studenten. 4 Probanden benötigten eine Brille als Sehhilfe, die anderen gaben an, ohne Sehhilfe normalsichtig zu sein.

Eigenanamnestisch gaben die Probanden an, keine neurologisch wirksame Medikation einzunehmen und nicht unter einer neurologischen Krankheit zu leiden. Die Teilnahme am Experiment war freiwillig, jeder Proband wurde vor dem Experiment aufgeklärt und hatte eine Einwilligungserklärung unterschrieben.

Die Aufwandsentschädigung ergab sich nicht durch einen festen Stundensatz, sondern summierte sich aus den Bonuspunkten für richtiges Tastendrücken; sie lag insgesamt durchschnittlich bei 15,91 €, maximal bei 17,36 € und minimal bei 14,76 €. Die Standardabweichung lag bei ca. 0,65 €.

2.2 Versuchsaufbau

Die Messungen fanden in einem abgedunkelten, reizarmen Raum statt. Die Versuchsperson saß auf einem Sessel 1,3 m von einem 17-Zoll Röhren Bildschirm entfernt. An dem Sessel war ein Klapptisch angebracht, auf dem eine Tastatur der Variante QWERTZ lag, die zum Raten benutzt werden sollte

Hinter den Probanden war der EEG-Verstärker mit der Elektroden Einsteckbox aufgebaut. Deutlich wird der Versuchsaufbau anhand von Abbildung 2. Die Beine konnten die Probanden je nach Körpergröße auf einer kleinen Stufe vor dem Stuhl abstellen und die Arme auf einer Armlehne ablegen.
Zum Raten konnten die linke Umschalttaste (⇧), die Taste für die Vergleichszeichen (<>) neben der Umschalttaste, die Taste für den Pfeil nach unten (↓) und die Taste für den Pfeil nach links (←) verwendet werden. Dabei sollte während des Versuches der Mittelfinger der linken Hand auf der Umschalttaste (⇧) liegen und der Zeigefinger der linken Hand auf der Taste für die Vergleichszeichen (<>). An der rechten Hand sollte der Zeigefinger für die Taste Pfeil zur linken Seite (←) und der Mittelfinger für die Taste Pfeil nach unten (↓) verwendet werden (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6).
Die Probanden wurden gebeten, sich auf den Bildschirm zu konzentrieren und möglichst wenig zu bewegen, um Artefakte zu vermeiden.
Der Computer, der die Reize mit dem Programm „Presentation“, Version 17.2 steuerte, befand sich im Nebenraum.

2.3 EEG Ableitungen

Zur Anlage des EEGs wurde eine EEG-Haube vom Typ „easycap“ verwendet. Der Kopfumfang der Person wurde ausgemessen und die entsprechende Größe der Haube ausgesucht. Zur korrekten Positionierung der Haube wurde zunächst der Abstand zwischen Nasion und Inion an der Protuberantia occipitalis gemessen. Die Elektrode an der Position Cz sollte dabei auf halber Strecke liegen. Zudem sollte die Kappe auf der linken und rechten Seite symmetrisch sein. Der Abstand zwischen den Ohren wurde ebenfalls gemessen, dabei wurde ein Maßband quer zum Scheitel über den Kopf gelegt, Cz sollte ebenso auf halber Strecke zwischen den Ohren liegen.
Im Gesicht wurden 4 Elektroden zu der Aufzeichnung des Elektrookulogramms verwendet. Zwei Elektroden wurden jeweils am lateralen Augenrand angebracht, diese dienten der Aufzeichnung der lateralen Augenbewegung. Am rechten Auge wurden jeweils oberhalb und unterhalb des Bulbus Elektroden angebracht, durch die die vertikale Augenbewegung und Blinzeln gemessen wurde. Die Positionierung der Elektroden im Gesicht wird in Abbildung 3 dargestellt.

Während der Ableitung diente online die Elektrode an der Position Fz als Referenz. Um den Übergangswiderstand von der Kopfhaut zu jeder Elektrode zu senken, wurde die Kopfhaut im ersten Schritt mit Alkohol (Cutasept der Firma Chemie Hamburg) gereinigt. Im zweiten Schritt wurde eine Elektrodenpaste (Hersteller: Theodor-Körner-Apotheke Graz) mit Hilfe einer Spritze aufgetragen (siehe Abbildung 4). Zur Anbringung der Elektroden im Gesicht wurde zunächst das Gesicht mit Alkohol (Cutasept) gereinigt und eine Peeling Paste (Everi, Conductive and abrasive paste, Spes Media – Italien) aufgetragen. Die Elektroden wurden zusammen mit der Elektrodenpaste mit Hilfe eines Klebestreifens (3M Transpore, Health Care Business) befestigt. Der Widerstand jeder Elektrode wurde durch dieses Verfahren auf unter 5 kΩ gesenkt.

Abbildung 1: Proband sitzt auf einem Sessel 1,3 m von einem 17-Zoll Röhren Bildschirm entfernt.

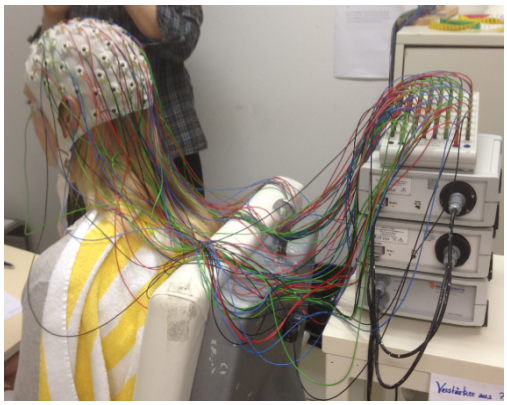


Abbildung 2: Elektroden verbunden mit dem Verstärker.

Abbildung 3: Anbringung der Elektroden im Gesicht.

Abbildung 4: Anbringen der Elektrodenpaste.

2.4 Versuchsablauf

Zur Einweisung der Probanden wurde die Versuchsanleitung in der Schriftgröße 16 im Schrifttyp „Helvetica“ in schwarz vor jedem Aufgabenblock auf dem Bildschirm eingeblendet. Der Bildschirmhintergrund war während des gesamten Versuches hellgrau. Mit der Leertaste konnte weitergeblättert werden. Mit der linken Maustaste konnte der Aufgabenblock gestartet werden. Vor jedem Aufgabenblock fanden jeweils 10 Probedurchgänge statt, die ebenfalls mit der linken Maustaste gestartet werden konnten. Die Maustaste wurde in Absprache mit den Probanden von der

Versuchsleiterin im Nebenraum gesteuert. Das Experiment war in vier Blöcke unterteilt:

A) *Raten*, B) *Raten plus*, C) *Vergleichen* und D) *Vergleichen plus*. Jeder Aufgabenblock bestand aus 250 Durchgängen und dauerte jeweils ca. 15-20 Minuten.

Beim **Aufgabenblock A)** *Raten* sollten die Probanden einen Buchstaben erraten. Durch die Versuchsanweisung wurden die Versuchspersonen vor dem Experiment informiert, dass der eine Buchstabe häufig und der andere selten im Verhältnis 4:1 auftreten würden.

Auf dem Bildschirm erschien in der Schriftgröße 35 in Helvetica die Anweisung: „Bitte raten X oder U".

Mit dem linken Mittelfinger auf der Umschalttaste sollten der Buchstabe „X" oder mit dem rechten Mittelfinger auf der Taste für den Pfeil nach unten „U" geraten werden. 1 s nach dem Tastendruck, erschien dann entweder der Buchstabe „X" oder „U" in der Schriftgröße 35 in schwarz für 0,2 s auf dem Bildschirm.

Diesen Buchstaben sollten die Probanden durch Tastendruck bestätigen.

(1) Wenn ein „X" geraten wurde und „X" erschien, sollte die Umschalttaste ⇧ gedrückt werden.

(2) Wenn ein „X" geraten wurde und ein „U" erschien, sollte die Taste für die Vergleichszeichen (<>) gedrückt werden.

(3) Wenn ein „U" geraten wurde und ein „U" erschien, die Taste Pfeil nach unten (↓) drücken.

(4) Wenn ein „U" geraten wurde, aber ein „X" erschien, sollte die Taste Pfeil zur linken Seite (←) gedrückt werden.

Dabei wurde die Hand (rechts oder links) durch das erste Ereignis definiert. Das zweite Ereignis wiederum gab an, ob bei Übereinstimmung die gleiche Taste nochmal gedrückt werden sollte oder ob eine andere Taste mit der gleichen Hand gedrückt werden sollte.

Entsprechend des folgenden Schemas:

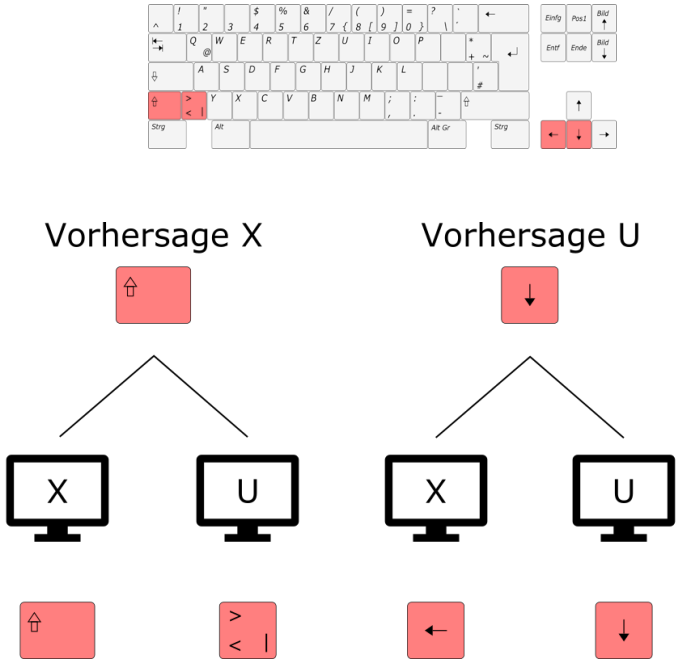


Abbildung 5: Schema für Rateaufgaben

Das erste Ereignis einer Rateaufgabe ist die Vorhersage R1. Hierfür nutzten die Probanden den Mittelfinger entweder der rechten oder der linken Hand. Auch in der Vergleichsaufgabe gibt das erste Ereignis an, mit welcher Hand auf R2 reagiert werden soll. Mit dem zweiten Ereignis wird angegeben, mit welchem Finger reagiert werden soll. Entweder es erscheint der gleiche Buchstabe noch einmal und es wird erneut der Mittelfinger zur Reaktion auf das zweite Ereignis genutzt, oder es erscheint der andere Buchstabe und der Zeigefinger soll als Reaktion auf das zweite Ereignis genutzt werden. Somit findet sowohl bei Rate- als auch bei Vergleichsaufgaben ein ähnliches Reaktionsschema auf den zweiten Reiz statt.

Eine Sekunde nach dem letzten Tastendruck begann der nächste Durchgang.

Beim **Aufgabenblock B** *Raten plus* sollte zunächst wieder „X“ oder „U“ erraten werden. Im Unterschied zu A erschien aber, nachdem die Probanden die entsprechende Taste gedrückt hatten, nach 30 ms der geratene Buchstabe für 0,2 s blau auf dem Bildschirm. Nach 1 s wurde dann der zweite Buchstabe in groß und schwarz für 0,2 s eingeblendet und musste durch Tastendruck bestätigt werden.

Der zweite Schritt entsprach dem zweiten Schritt in Aufgabenblock A und es begann wieder 1 s nach dem letzten Knopfdruck der nächste Durchgang (siehe Abbildung 7).

Beim **Aufgabenblock C** *Vergleichen* sollten zwei Reize miteinander verglichen werden. Als erster Reiz erschien ein „X“ oder „U“ für 0,2 s in blau. Dabei trat wieder der eine Buchstabe häufig und der der andere selten im Verhältnis 4:1 auf. Nach 1 s wurde als zweiter Reiz ein großer Buchstabe in schwarz für 0,2 s auf dem Bildschirm eingeblendet.

Diesen Buchstaben sollten die Probanden durch Tastendruck mit dem vorigen Buchstaben vergleichen. Die Logik für den Tastendruck war ähnlich der Ratebedingung: Der erste Buchstabe determinierte die Reaktionshand und wenn der zweite Buchstabe identisch mit dem ersten war, sollte mit dem Mittelfinger gedrückt werden; wenn der zweite Buchstabe anders als der erste war, sollte die Taste daneben gedrückt werden. Daher:

Wenn der erste blaue Buchstabe ein „X“ war und ein „X“ erschien, sollte die Umschalttaste (⇧ gedrückt werden. Wenn der zweite Buchstabe ein „U“ war, sollte die Taste für Vergleichszeichen (<>) gedrückt werden.

Wenn der erste blaue Buchstabe ein „U“ war und ein „U“ erschien, sollte die Taste Pfeil nach unten (↓ gedrückt werden. Wenn der zweite Buchstabe ein „X“ war, sollte die Taste Pfeil zur linken Seite (←) gedrückt werden.

Nach 1,3 s wurde mit dem nächsten Durchgang begonnen und es erschien wieder für 0,2 s in klein und blau ein „x“ oder „u“.

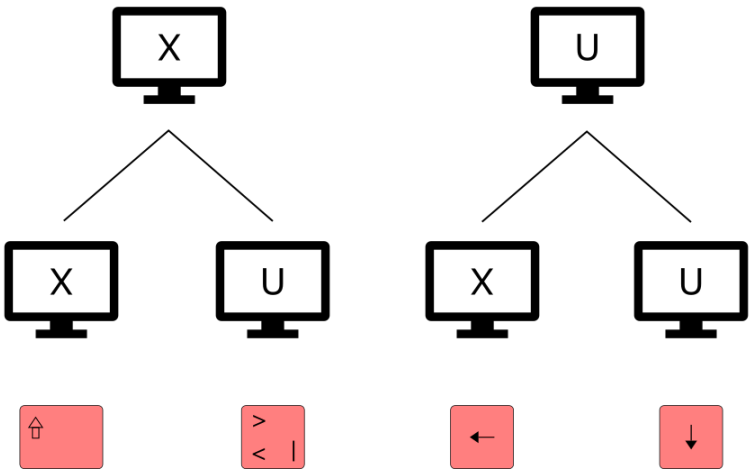


Abbildung 6: Schema für Vergleichsaufgaben

Beim Aufgabenblock D „Vergleichen plus“ erschien wie im Aufgabenblock C als erster Reiz ein kleiner Buchstabe in blau für 0,2 s auf dem Bildschirm. Dieser sollte durch die entsprechend determinierte Taste (X = Umschalttaste ⇧; U= die Taste Pfeil nach unten ↓ bestätigt werden. Eine Sekunde nach dem Tastendruck erschien als zweiter Stimulus ein Großbuchstabe in schwarz für 0,2 s. Im zweiten Schritt sollten dann wie im Aufgabenblock C die Buchstaben miteinander verglichen werden. 1,3 s nach dem letzten Tastendruck startete der nächste Durchgang und es wurde ein kleines „x“ oder „u“ eingeblendet.
Wenn die Probanden eine Taste drückten, bevor der Buchstabe eingeblendet wurde, erschien in Rot: „Zu früh gedrückt“ und die Probanden musste 4 s warten. Im Fall einer Falschantwort blieb das Programm in der Warteschleife und es änderte sich nichts, bis die richtige Taste gedrückt wurde.
Als Anreiz erhielten die Probanden für jeden richtig geratenen seltenen Buchstaben 8 Cent, für jeden häufig geratenen Buchstaben 2 Cent. Um nicht nur das Raten zu belohnen, erhielten die Versuchspersonen auch beim Vergleichen Belohnungen:
8 Cent für eine Wiederholung des seltenen Buchstabens und 2 Cent bei Wiederholung des häufigen Buchstabens.

Nach jedem zwanzigsten Durchgang erhielten die Probanden ein Feedback, wie viele „U“ und „X“ Buchstaben jeweils richtig geraten wurden und wie viel Geld bereits erzielt wurde. Das Experiment dauerte insgesamt ohne Vorbereitungszeit und Anlegen des EEGs ca. 60-80 Minuten. Bei 50 % der Probanden, war X häufig in der anderen Hälfte war U häufig.
Die Reihenfolge der Versuchsblöcke änderte sich wie folgt:
Versuchsperson 1 und 9: ABCD; X ist häufig, U ist selten
Versuchsperson 2 und 10: BADC; X ist häufig, U ist selten
Versuchsperson 3 und 11: CDAB; X ist häufig, U ist selten
Versuchsperson 4 und 12: DCBA; X ist häufig, U ist selten
Versuchsperson 5 und 13: ABCD; U ist häufig, X ist selten
Versuchsperson 6 und 14: BADC; U ist häufig, X ist selten
Versuchsperson 7 und 15: CDBA; U ist häufig, X ist selten
Versuchsperson 8 und 16: DCBA; U ist häufig, X ist selten

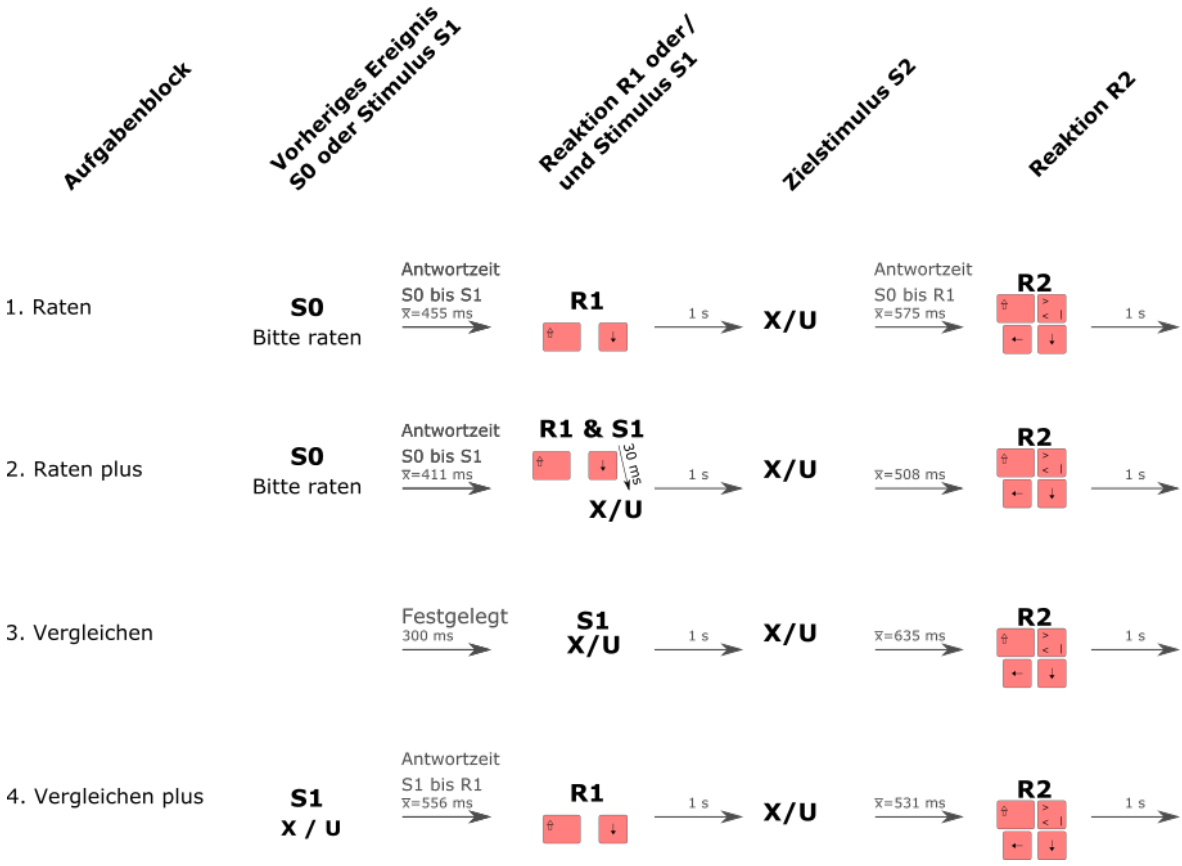


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Aufgabenstruktur

„S0" bezeichnet das Einblenden von „Bitte raten X oder U“ vor der ersten Reaktion R1 (Tastendruck) oder vor dem ersten Stimulus S1 (Erscheinen der Buchstaben X oder U). R1 steht je nach Aufgabentyp für die Vorhersage oder die Bestätigung eines Buchstabens. S2 steht für das Einblenden eines schwarzen Buchstabens X oder U. R2 ist die Antwort auf S2, mit der angegeben wird, ob S1 und S2 übereinstimmen oder nicht.

2.5 Datenverarbeitung

Die „Presentation“ Software 17.2 (www.neurobs.com) wurde genutzt, um die Aufgaben zu präsentieren, die Antworten zu registrieren und um Stimulus und Antwort in Zahlen codiert auf den Steuerungscomputer aufzuzeichnen. Das EEG wurde durch 64 Elektroden abgeleitet. 60 Elektroden befanden sich auf dem Kopf darunter 8 auf den Mittellinienpositionen von AFz bis Oz und 26 Elektroden jeweils symmetrischer auf der linken und rechten Seite. Zudem wurde eine Elektrode an der Nasenspitze angebracht, die als Offline-Referenz diente, sowie an der Position

Fpz, welche als Erdungselektrode (ground) diente. Die Elektrode an der Position Fz diente als Online-Referenz.

Durch vier Elektroden an den Augen wurden Bewegungen an den Augen registriert (siehe Abbildung 3). Dafür wurden die Elektroden ober und unterhalb der Augen und am seitlichen Augenrand befestigt.

Signale, die zwischen DC (direct current = Gleichstrom) bis zu 250 Hz lagen, wurden durch den Verstärker BrainAmp MR plus verstärkt, in einen Aufzeichnungscomputer geleitet und dort mit einem Analog-Digital-Wandler alle 2 ms als Zahlenwert codiert. Die Offlineverarbeitung fand mittels des Programms Brain Vision Analyzer (Version 2.03) statt. Zu Beginn der Auswertung wurde offline mittels der gemessenen Potentiale zwischen der Elektrode auf der Nase und der Online-Referenz bei Fz re-referenziert. Das bedeutet, dass die Elektrode auf der Nase offline als neue Referenzelektrode diente und somit die Differenzen zwischen jeder Elektrode und dieser neuen Referenz berechnet wurden.

Durch einen Tiefpass-Filter konnten Frequenzen von unterhalb von 25 Hz passieren und höhere herausgefiltert werden. Da bei 50 Hz die Wechselstromfrequenz der öffentlichen elektrischen Energieversorgung liegt, dämpfte ein Kerbfilter diese Frequenz, um Einstreuungen durch die Stromleitungen herauszufiltern. Das EEG wurde in die einzelnen Versuchsdurchgänge eingeteilt. Zu diesem Zweck wurden Segmente von 2,1 s eingeteilt, dafür wurde ein Zeitfenster von -1100 ms vor dem ersten Buchstaben bis 1000 ms nach dem zweiten Buchstaben definiert. Um abrupte nichtphysiologische Spannungsveränderungen zu erkennen und auszuschließen, wurden Segmente, bei denen zwei aufeinanderfolgende Datenpunkte sich um mehr als 50 µV unterschieden, verworfen. Spannungsänderungen in dieser Größenordnung können auch aufgrund von Blinzeln entstehen. Um nicht Segmente aufgrund von Blinzeln ausschließen zu müssen, wurde das EOG von dieser Methode ausgenommen. Um diese Artefakte herauszukorrigieren, wurde mithilfe der Brain Analyzer Software geschätzt, wie sehr die an den Augen-Elektroden messbaren Potentiale in jede EEG-Elektrode übertragen werden. Dann wurde der geschätzte Artefaktanteil aus den Daten jeder EEG-Elektrode heraus subtrahiert.

Anschließend wurden die Mittelwerte der ersten 100 ms eines jeden Segments bestimmt und diese als Baseline verwendet. Um nach dem Entfernen der großen Blinzel-Potentiale weitere Artefakte herauszufiltern, wurden Segmente mit Spannungen über oder unter 150 µV ausgeschlossen.

X oder U traten entweder häufig oder selten im ersten oder zweiten Schritt auf. Daraus ergaben die vier möglichen Ereigniskombinationen. Bei der Vergleichsaufgabe waren die Reihenfolge der Buchstaben und somit auch der Ereignisablauf vom Computer vorgeschrieben. Bei den Rateaufgaben waren sie allerdings abhängig von der Vorhersage der einzelnen Probanden.

Häufiger Buchstabe geraten - häufiges Ereignis **h - H**, *H - passt*
Seltener Buchstabe geraten - häufiges Ereignis **s - H,** *H - passt nicht*
Häufiger Buchstabe geraten - seltenes Ereignis **h - S,** *S - passt nicht*
Seltener Buchstabe geraten - seltenes Ereignis **s - S,** *S - passt*

Segmente, die nicht korrekt beantwortet wurden, wurden ausgeschlossen. Aus den verbliebenen Durchgängen der EEG-Daten, wurde für die unterschiedlichen Ereigniskombinationen und die verschiedenen Aufgabentypen die mittlere Wellenform bestimmt.
Die mittlere Anzahl der eingeschlossenen Durchgänge war 140, 42, 29, und 11 für *h - H, s - H, h - S,* und *s - S*.
Die minimale Anzahl der eingeschlossenen Durchgänge war
100, 16, 5, und 2 für *h - H, s - H, h - S,* und *s - S*.
Aufgrund dieser geringen Anzahl an Durchgängen war das Signal sehr verrauscht. Daher wurden die P3 Amplituden in einer breiten Zeitspanne von 300 ms - 500 ms nach dem Ereignis gemessen. Da bei der Position CPz die Amplitude der P3 am größten ist, fand auch hier hauptsächlich die Datenanalyse statt.
Des Weiteren wurden die Reaktionszeiten und die Fehlerraten untersucht. Für jede Ereigniskombination und jeden Aufgabentyp der korrekt beantworteten Durchgänge wurde die Zeit von dem Erscheinen des zweiten Buchstabens S2 bis zum zweiten Tastendruck R2 gemessen und der Durchschnittswert errechnet.
In den nicht korrekt beantworteten Durchgängen wurden die Gründe für die inkorrekte Beantwortung ermittelt, nämlich falscher Finger an der korrekten Hand oder andere Fehler. Für diese zwei unterschiedlichen Fehlertypen wurde dann die Fehlerquote in allen Durchgängen errechnet.

3 Ergebnisse

Die Ereigniskombination (*häufig - häufig*, *häufig - selten, selten - häufig, selten - selten)*, die Antwortzeiten, die Arcus-Sinus transformierten Fehlerquoten und die P3-Amplituden wurden mit Hilfe von Varianzanalysen mit dem Programm IBM SPSS Statistics 22 untersucht. Als Faktoren der Analyse dienten: Der Aufgabentyp (Raten vs. Vergleichen), die Aufgabenversion (Raten vs. Raten plus bzw. Vergleichen vs. Vergleichen plus), die Häufigkeit des ersten Ereignisses (häufig vs. selten) und die Häufigkeit des zweiten Ereignisses (häufig vs. selten).

Die Reaktionszeiten bis zum ersten Tastendruck wurden anhand der Faktoren Aufgabenversion (Raten vs. Raten plus) und der Häufigkeit der ersten Reaktion (häufig vs. selten) analysiert. Hieraus wurden die durchschnittlichen Reaktionszeit ermittelt und mit den Reaktionszeiten nach Erscheinen des ersten Buchstabens S1 bis zum Tastendruck R1 in der Vergleichen plus Aufgabe mit den beiden Faktoren Aufgabetyp (Raten vs. Vergleichen) und Häufigkeit des ersten Ereignisses (häufig vs. selten) mittels einer Varianzanalyse verglichen.

Um die Interaktionen zu verdeutlichen, wurden ANOVAs auf den einzelnen Ebenen der in Interaktion tretenden Faktoren durchgeführt.

3.1 Häufigkeiten der unterschiedlichen Ereigniskombinationen

Tabelle 1: Häufigkeiten der unterschiedlichen Ereigniskombinationen in den Rate- und in den Vergleichsaufgaben.

Erstes Ereignis	**Zweites Ereignis**		**Vergleichen**	**Raten**
Häufiges Ereignis *h*	Häufiges Ereignis *H*	Passt	64 %	59%
Häufiges Ereignis *h*	Seltenes Ereignis *S*	Passt nicht	16%	15%
Seltenes Ereignis *s*	Häufiges Ereignis *H*	Passt nicht	16%	21%
Seltenes Ereignis *s*	Seltenes Ereignis *S*	Passt	4%	5%

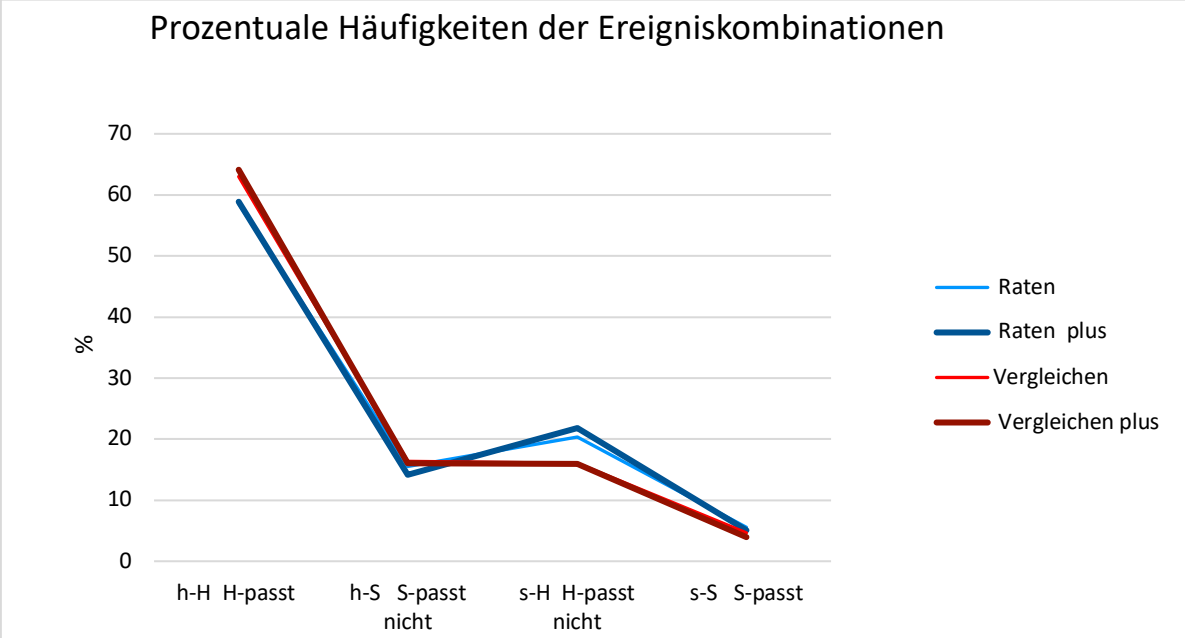


Abbildung 8: Prozentuale Häufigkeit der verschiedenen Ereigniskombinationen

Die verschiedenen roten und blauen Farben und Dicken der Linien stehen für die verschiedenen Aufgabentypen Raten oder Vergleichen und Aufgabenversionen Raten plus oder Vergleichen plus.

Die Häufigkeiten der vier Kombinationen sollten sich unterscheiden und in der Tat ergaben sich klare Signifikanzen ($F_{1,15} \geq 385$, $p<0.001$) sowohl für die Haupteffekte der Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses als auch für den Interaktionseffekt.

Obwohl die Auftretenswahrscheinlichkeit von 4:1 bzw. 80% häufiges Ereignis, 20% seltenes Ereignis angegeben war, rieten die Probanden seltener den häufigen Buchstaben und häufiger den seltenen Buchstaben als die angegebene Auftretenswahrscheinlichkeit (Aufgabentyp x Häufigkeit des ersten Ereignisses $F_{1,15}=7.4$, $p=0.02$).

In absoluten Zahlen war dieser Effekt größer für die häufigen als für die seltenen Ereignisse. Dies spiegelte sich in einer dreifachen Interaktion von Aufgabetyp x Häufigkeit des ersten Ereignisses x Häufigkeit des zweiten Ereignisses ($F_{1, 15} = 5.9$, $p= 0,03$) wider.

Zwischen den Aufgabenversionen (z.B. Raten vs. Raten plus) konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (F für den Haupteffekt von Aufgabenversion und den Interaktionen dieses Effekts mit anderen Faktoren ≤ 3.7, $p \geq 0.07$).

3.2 Reaktionszeiten auf S2

Effekte, die Aufgabentyp, Aufgabenversion und ihre Interaktion umfassen, sind in die Spalten eingetragen. In den Zeilen sind Effekte der Häufigkeit des ersten Ereignisses, der Häufigkeit des zweiten Ereignisses, sowie ihre Interaktion zueinander eingetragen. F-Werte und p-Werte sind dick geschrieben, wenn p ≤ 0.050 ist. Wenn die p-Werte p ≤ 0.10 waren, sind sie in der Tabelle aufgeführt. Freiheitsgrade sind immer 1/15. Die Haupteffekte der einzelnen Faktoren sind in der ersten Zeile sowie in der ersten Spalte der Tabelle eingetragen. Die Werte in den zweiten, dritten und vierten Zeilen und Spalten beschreiben, ob zwischen den verschiedenen Faktoren eine signifikante Interaktion vorlag. Der Wert F = 1.0 in der zweiten Zeile der zweiten Spalte beschreibt beispielsweise, dass die Faktoren Aufgabentyp und Häufigkeit des ersten Ereignisses keine signifikante Wechselwirkung miteinander haben. Der Wert F = 6.7 und p = 0.02 in der zweiten Zeile und der dritten Spalte dagegen bedeuten, dass sich die Faktoren Aufgabentypen und Häufigkeit des zweiten Ereignisses zusammen einen

kombinierten Einfluss auf die Reaktionszeit vorweisen. Effekte, die Aufgabentyp, Aufgabenversion und ihre Interaktion umfassen, sind in die Spalten eingetragen. In den Zeilen sind Effekte der Häufigkeit des ersten Ereignisses, der Häufigkeit des zweiten Ereignisses, sowie ihre Interaktion zueinander eingetragen. F-Werte und p-Werte sind dick geschrieben, wenn p ≤ 0.050 ist. Wenn die p-Werte p ≤ 0.10 waren, sind sie in der Tabelle aufgeführt. Freiheitsgrade sind immer 1/15. Die Haupteffekte der einzelnen Faktoren sind in der ersten Zeile sowie in der ersten Spalte der Tabelle eingetragen. Die Werte in den zweiten, dritten und vierten Zeilen und Spalten beschreiben, ob zwischen den verschiedenen Faktoren eine signifikante Interaktion vorlag. Der Wert F = 1.0 in der zweiten Zeile der zweiten Spalte beschreibt beispielsweise, dass die Faktoren Aufgabentyp und Häufigkeit des ersten Ereignisses keine signifikante Wechselwirkung miteinander haben. Der Wert F = 6.7 und p = 0.02 in der zweiten Zeile und der dritten Spalte dagegen bedeuten, dass sich die Faktoren Aufgabentypen und Häufigkeit des zweiten Ereignisses zusammen einen kombinierten Einfluss auf die Reaktionszeit vorweisen.

Tabelle 2: Reaktionszeiten auf S2 Ergebnisse der Varianzanalyse

	Haupteffekt der Zeile	**Aufgabentyp**	**Aufgaben-version**	**Aufgabe x Aufgaben-version**
Haupteffekt der Spalte		2.4	**13.6** **0.006**	0.7
Häufigkeit des ersten Ereignisses	0.0	1.0	2.7	0.4
Häufigkeit des zweiten Ereignisses	**54.5** **<0.001**	**6.7** **0.02**	0.3	0.4
Häufigkeit des Erstereignisses x Häufigkeit des Zweitereignisses	**58.5** **<0.001**	1.1	0.6	0.3

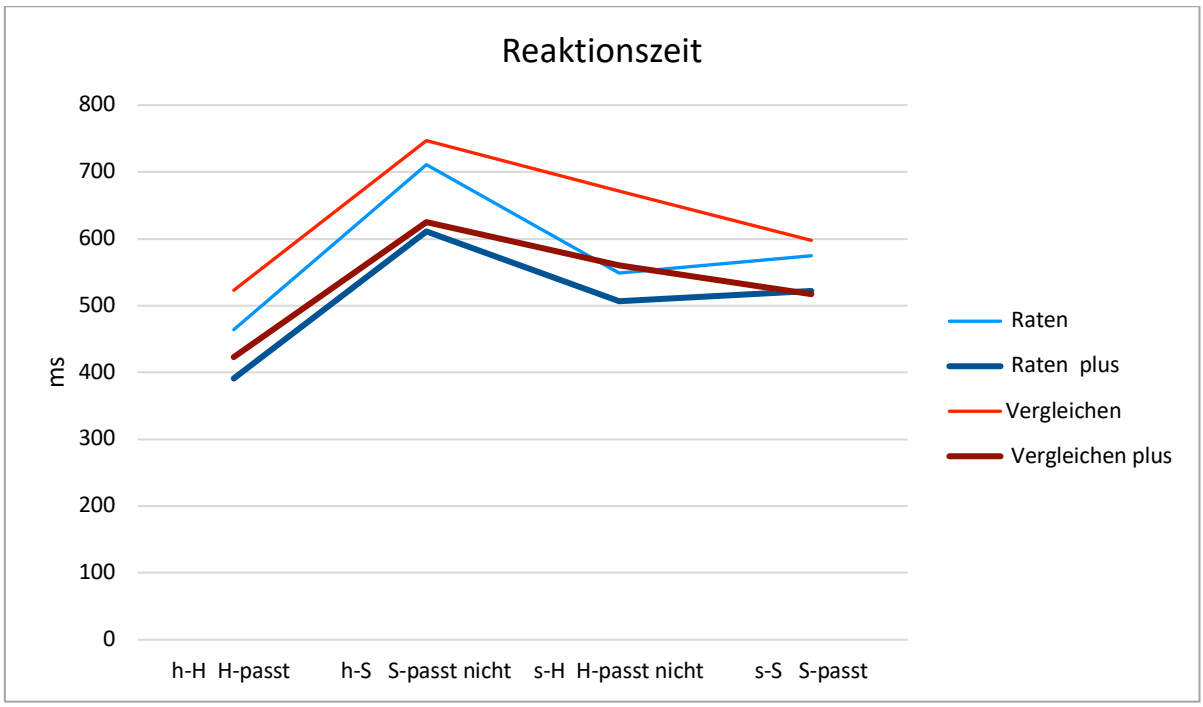


Abbildung 9: Reaktionszeit auf S2 bei den verschiedenen Ereigniskombinationen

Dargestellt sind die Mittelwerte der Reaktionszeit für die verschiedenen Ereigniskombinationen. Auf der x-Achse sind die Ereigniskombinationen aufgetragen, dabei stehen h und s für häufige und seltene erste Ereignisse. H und S stehen für häufige und seltene zweite Ereignisse. Auf der y- Achse ist die Zeit in ms angegeben. Die blauen und roten Farben stehen für die verschiedenen Aufgabentypen Raten oder Vergleichen. Dünne helle oder dicke dunkle Linien stehen für die unterschiedlichen Aufgabenversionen Raten plus oder Vergleichen plus.

3.2.1 Reaktionszeit in Bezug auf die Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses

Ein signifikanter Haupteffekt konnte für den Faktor der Häufigkeit des zweiten Ereignisses festgestellt werden ($F_{1,15}$ = 54.5, $p < 0.001$). Außerdem trat eine signifikante Interaktion zwischen der Häufigkeit des ersten und des zweiten Ereignisses auf ($F_{1,15}$ = 58.5, $p < 0.001$): Wenn das erste Ereignis (S1 oder R1) und das zweite Ereignis häufig waren (h-H), waren die Reaktionszeiten viel schneller als wenn der zweite Buchstabe von seltener Häufigkeit war (h - S); einfacher Effekt ($F_{1,15}$=107.9, p<0,001). Nach seltenen ersten Ereignis lagen die Reaktionszeiten zwischen diesen beiden Extremen: Beide (s-H und s-S) waren langsamer als h - H und schneller als (h - S), im paarweisen Vergleich ($F_{1,15} \geq 19.8$, p<0,001), und

unterschieden sich nicht signifikant voneinander (Effekt der Häufigkeit des zweiten Ereignisses S2 nach einem seltenen ersten Ereignis $F_{1,15} = 0.8$, n. s.). Abbildung 9 ist die Interaktion der Häufigkeiten des ersten Ereignisses und des zweiten Ereignisses deutlich sichtbar. Nach der Ereigniskombination (h - H) waren die Reaktionszeiten in allen Aufgabenblöcken am schnellsten, nach den Ereigniskombinationen (h - S) waren sie in allen Aufgabenblöcken am langsamsten.

3.2.2 Reaktionszeit in Bezug auf den Aufgabentyp

Es trat kein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Aufgabentyp auf ($F_{1,15} = 2.4$). Dennoch unterschieden sich die Reaktionszeiten bei den verschiedenen Aufgabentypen (Vergleichen vs. Raten) in einem Punkt: Beim Raten waren die Reaktionszeiten auf häufige zweite Ereignisse ein bisschen schneller als beim Vergleichen (Häufigkeit des zweiten Ereignis x Aufgabentyp $F_{1,15} = 6.7$, $p = 0.02$; einfacher Effekt des Aufgabentyps bei häufigen zweiten Ereignis $F_{1,15} = 4.9$, $p = 0.04$; bei seltenen zweiten Ereignis ($F_{1,15} = 0.4$, p = n. s.).

Dies galt gleichermaßen nach häufigen und seltenen ersten Ereignissen. Die dreifache Interaktion der Häufigkeit des ersten Ereignisses, der Häufigkeit des zweiten Ereignisses und des Aufgabentyps war nicht signifikant ($F_{1,15} = 1.1$, p= n. s.).

In Abbildung 9 zeigt sich die Interaktion der Häufigkeit des zweiten Ereignisses mit dem Aufgabentyp allerdings nach häufigen und seltenen ersten Ereignissen etwas unterschiedlich. Hier ist nach häufigen ersten Ereignissen ein großer Effekt von S2-Häufigkeit (h - H ist schneller als h - S) bei beiden Aufgaben deutlich, nur beim Raten etwas stärker ($F_{1,15} = 73.8$, $p < 0.001$) als beim Vergleichen ($F_{1,15} = 42.2$, $p < 0.001$). Bei seltenen Erstereignissen zeigt sich der etwas stärkere Effekt der Häufigkeit des zweiten Ereignisses beim Raten als beim Vergleichen als ein qualitativer Unterschied: Die Häufigkeit des zweiten Ereignisses hat einen Effekt in Vergleichsaufgaben ($F_{1,15} = 5.9$, $p=0.03$) mit späteren Reaktionszeiten bei (s - H) als bei (s - S), nicht aber in den Rateaufgaben ($F_{1,15} = 0.7$, p= n. s.).

3.2.3 Reaktionszeit in Bezug auf die Aufgabenversion

Für den Faktor Aufgabenversion trat ein signifikanter Haupteffekt auf ($F_{1,15}$= 13.6, p= 0.002). In den Aufgabenversionen, in denen sowohl S1 als auch R1 vorhanden waren, also in den Aufgabenversionen Raten plus und Vergleichen plus, waren die Reaktionszeiten schneller als wenn nur eines dieser beiden Ereignisse vorhanden war. Dieser Effekt unterschied sich nicht in den Rate- und Vergleichsaufgaben ($F_{1,15}$ für alle Wechselwirkungen von Aufgabenversion x Aufgabentyp ≤ 0.7, n. s).

3.3 Fehlerrate

Tabelle 3: Arkussinus transformierte Fehler, durch Gebrauch des falschen Fingers bei der Antwort auf S2

Zur Beschreibung des Tabellenaufbaus siehe Legende der Tabelle 3.

	Haupteffekt der Reihe	**Aufgabentyp**	**Aufgaben-version**	**Aufgabe x Aufgabenversion**
Haupteffekt der Zeile		**7.2** **0.02**	2.4	4.2 0.06
Häufigkeit S1	**9.6** **0.007**	3.2 0.09	0.3	0.3
Häufigkeit S2	**28.6** **<0.001**	**6.0** **0.03**	3.0	**5.7** **0.03**
Häufigkeit S1 x Häufigkeit S2	**10.9** **0.005**	3.5 0.08	0.9	0.2

Bei der Antwort auf das zweite Ereignis, konnten Fehler aufgrund von unterschiedlichen Ursachen auftreten. Die Probanden konnten beispielsweise den falschen Finger der richtigen Hand oder die falsche Hand benutzen.

Die häufigste Ursache von Fehlern war mit 5,5%, das Benutzen des falschen Fingers an der richtigen Hand. In nur 0,5 % der Durchgänge trat ein Fehler aufgrund einer Reaktion mit der falschen Hand auf.
Deswegen wurden vor allem die Fehlerraten des Fehlers „falscher Finger der korrekten Hand“, aufgeführt. Die Fehlerraten wurden um eine bessere Anpassung an die Normalverteilung zu erreichen, zunächst in den Arkussinus transformiert und anschließend analysiert.

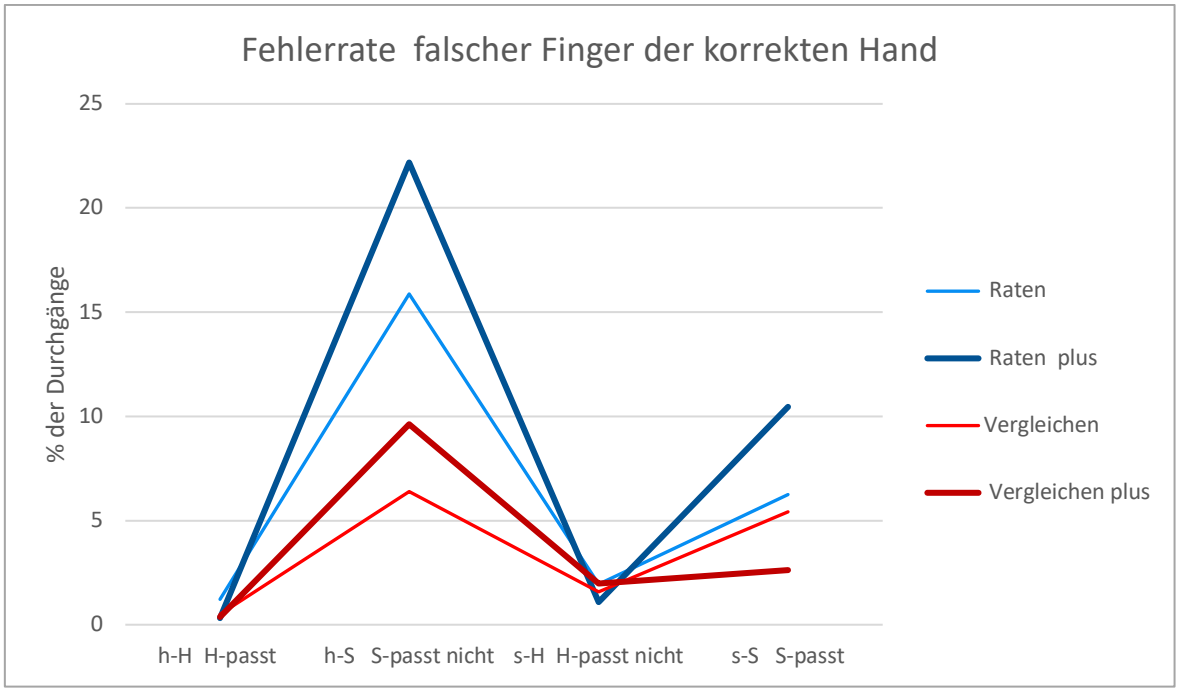


Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Fehler bei den unterschiedlichen Ereigniskombinationen

Dargestellt ist der prozentuale Anteil der Fehler für die verschiedenen Ereigniskombinationen. Auf der x-Achse sind die Ereigniskombinationen aufgetragen, dabei stehen h und s für häufige und seltene erste Ereignisse. H und S stehen für häufige und seltene zweite Ereignisse. Auf der y- Achse ist der Prozentsatz der Durchgänge angegeben. Die blauen oder roten Linien stehen für die verschiedenen Aufgabentypen Raten oder Vergleichen. Dünne oder dicke Linien stehen für die unterschiedlichen Aufgabenversionen mit zwei oder einem ersten Ereignis.

3.3.1 Fehlerrate in Bezug auf die Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses

Es traten signifikante Haupteffekte für die Faktoren Häufigkeit des ersten Ereignisses ($F_{1,15}$ =9.6, p= 0.007) und Häufigkeit des zweiten Ereignisses auf ($F_{1,15}$ = 28.6, p<0.001). Es wurden mehr Fehler bei seltenen als bei häufigen Zweitereignissen gemacht. Dieser Effekt war größer bei häufigen als bei seltenen Erstereignissen (Häufigkeit des ersten Ereignisses x Häufigkeit des zweiten Ereignisses $F_{1,15}$ = 10.9, p= 0.005; einfacher Effekt der Häufigkeit des zweiten Ereignisses bei häufigen ersten Ereignissen $F_{1,15}$ = 46.0, p < 0.001, bei seltenen Erstereignissen $F_{1,15}$ = 7.6, p = 0.02).

Aufgrund der Interaktion mit der Häufigkeit des zweiten Ereignisses zeigte die Häufigkeit des ersten Ereignisses keinen Effekt, wenn die zweiten Ereignisse häufig waren (einfacher Effekt bei häufigem zweiten Ereignis $F_{1,15}$ = 0.4, n.s.), da dort die Fehlerraten bei nahezu null lagen.

In Abbildung 10 ist deutlich dargestellt, dass die Fehlerrate nach häufigen zweiten Ereignissen (x-H) geringer ist als nach seltenen zweiten Ereignissen (x-S). Außerdem wird der kombinierte Einfluss der Häufigkeit des ersten Ereignisses und der Häufigkeit des zweiten Ereignisses deutlich.

3.3.2 Fehlerrate in Bezug auf den Aufgabentyp

Der Haupteffekt des Aufgabentyps war relevant ($F_{1,15}$ = 7.2, p = 0.02). Die Kurvenverläufe in Abbildung 10 zeigen, dass die Fehlerrate in den Rateaufgaben stärker ausgeprägt war als in den Vergleichsaufgaben.

Dieser Effekt war deutlicher bei den seltenen als bei den häufigen zweiten Ereignissen, daher zeigte sich eine Interaktion von dem Aufgabentyp und der Häufigkeit des zweiten Ereignisses ($F_{1,15}$ = 6.0, *p* = 0.03). Obwohl die Fehlerrate bei häufigen zweiten Ereignissen fast null war, war der einzelne Effekt von Aufgabentyp auch hier deutlich signifikant. (Effekt von Aufgabentyp bei häufigen Zweitbuchstaben $F_{1,15}$= 11.0, p = 0.005; seltenen Zweitbuchstaben $F_{1,15}$ = 6.6, p = 0.02).

Es gab eine statistisch signifikante Interaktion zwischen Aufgabentyp, Aufgabenversion und Häufigkeit des zweiten Ereignisses ($F_{1,15}$ = 5.7, p= 0.03).

3.3.3 Fehlerrate in Bezug auf Aufgabenversion

Ein signifikanter Haupteffekt für die Aufgabenversion war nicht offensichtlich ($F_{1,15}$ = 2.4). Es gab jedoch die gerade genannte Interaktion der Faktoren Aufgabentyp, Aufgabenversion und Häufigkeit des zweiten Ereignisses ($F_{1,15}$ = 5.7, p = 0.03; Aufgabenversion x Häufigkeit des zweiten Ereignisses in Rateaufgaben $F_{1,15}$= 5.5, p= 0.03; in Vergleichsaufgaben $F_{1, 15}$ = 0.1, p= n.s): Mehr Fehler wurden bei dem seltenen zweiten Ereignis in der Version Raten plus gemacht, als in dem Aufgabenblock Raten (siehe Abbildung 10). Beim Vergleichen gab es für die unterschiedlichen Aufgabenversionen keinen deutlichen Unterschied.

3.4 Reaktionszeit auf S1 bzw. S0

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten auf S0, also die Aufforderung: „Bitte raten!“, im Aufgabenblock Raten betrug 455 ms. Im Aufgabenblock Raten plus lag sie bei 411 ms (siehe Abbildung 7). Es konnte dennoch kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Aufgabenversionen und zwischen häufigen und seltenen Ereignissen erkannt werden (alle F≤1.4, n.s.).
Die durchschnittliche Reaktionszeit von S1 bis R1 beim Aufgabentyp Vergleichen plus lag dagegen bei 556 ms. Das war länger als die durchschnittliche Reaktionszeit in den Rateaufgaben, bei häufigen Ereignissen 91 ms und 251 ms bei seltenen Ereignissen. Es traten daher signifikante Unterschiede für die Haupteffekte des Aufgabentyps (Raten vs. Vergleichen), der Häufigkeit des ersten Ereignisses (häufig vs. selten) sowie ihrer Interaktion miteinander auf (alle Fs ≥13.2, p≤0.002).

3.5 Ereigniskorrelierte Potentiale

Die größten Wellenformen wurden an Position CPz aufgezeichnet. Für die verschiedenen Ereigniskombinationen traten nach dem zweiten Stimulus, in den Aufgabenblöcken unterschiedliche Wellenformen auf. Am stärksten ausgeprägt war die Amplitude 300 ms - 500 ms im Aufgabenblock Raten plus bei der Ereigniskombination s-S.

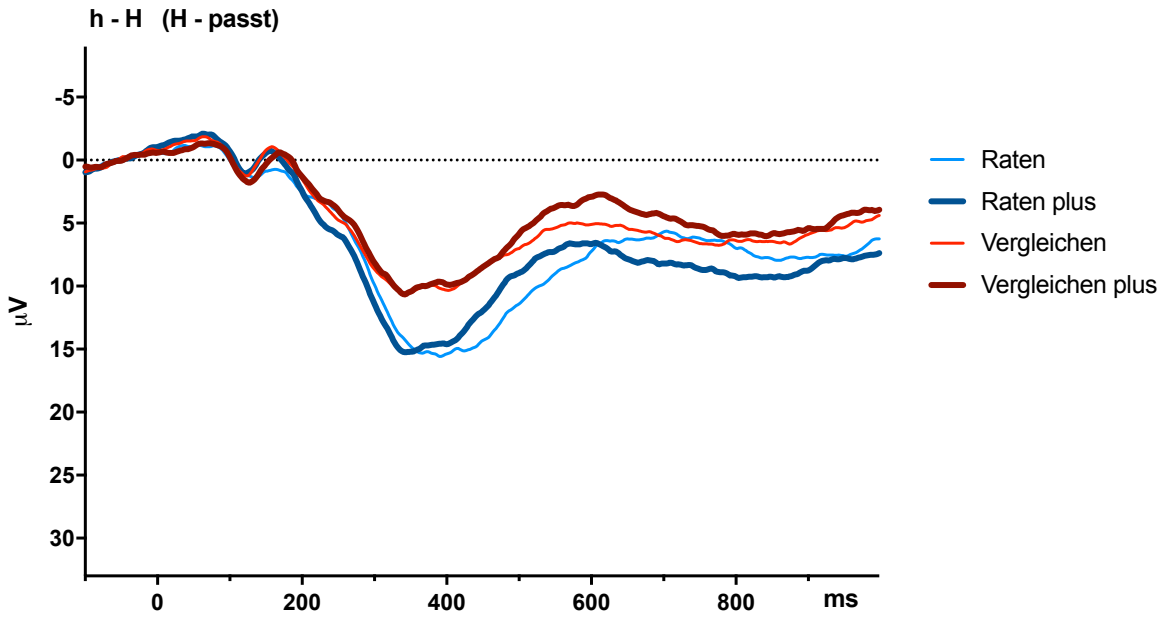


Abbildung 11: h-H (H - passt)

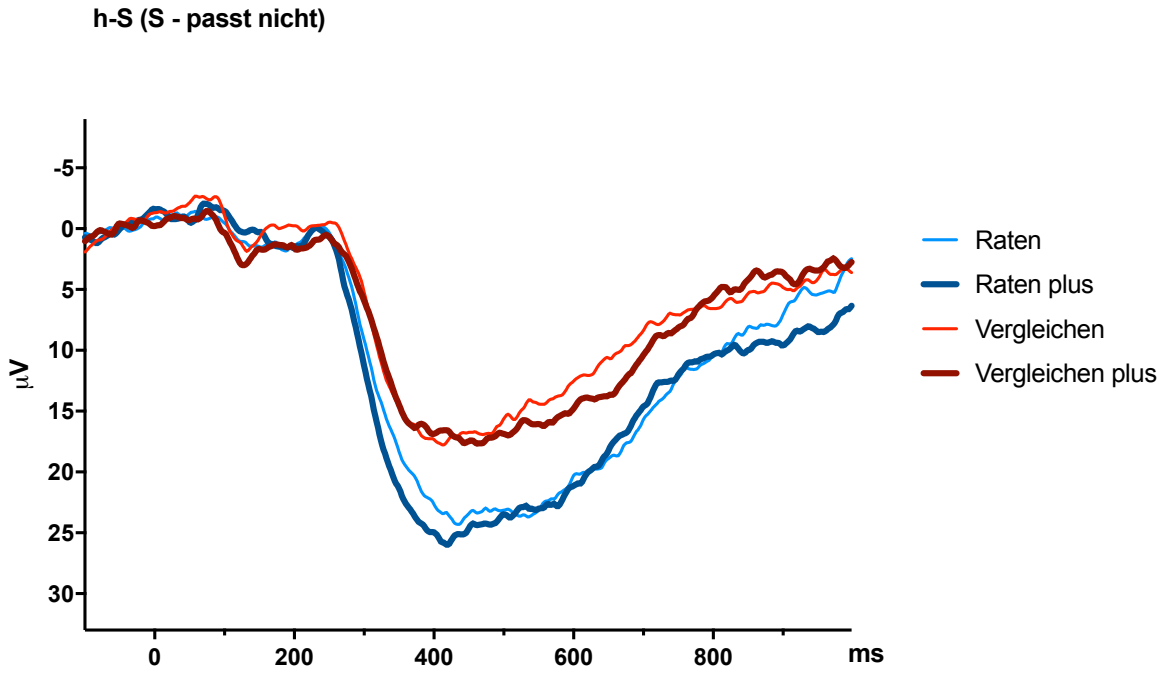


Abbildung 12: h-S (S - passt nicht)

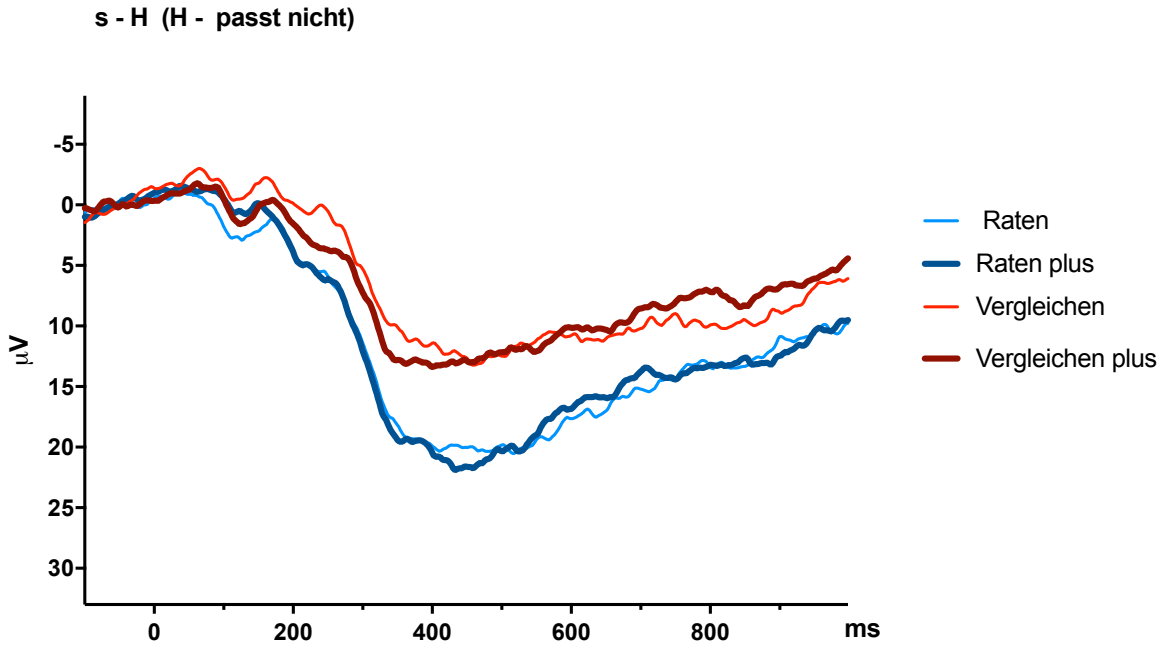


Abbildung 13: s-H (H - passt nicht)

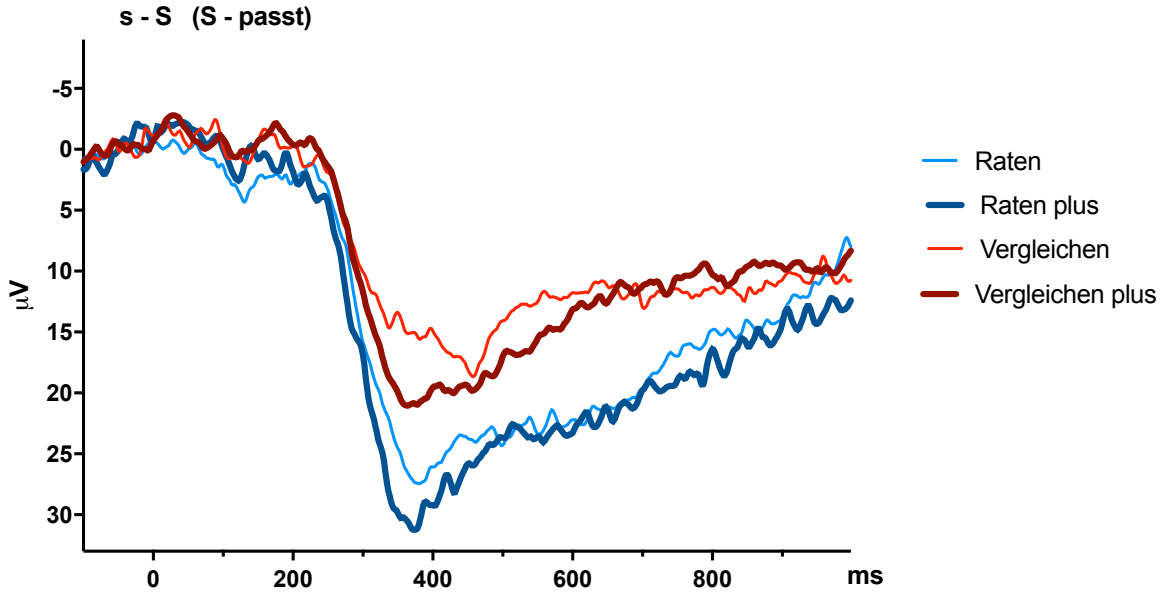


Abbildung 14: s-S (S - passt)

In den Abbildungen sind die durchschnittlichen Wellenformen der Ereigniskorrelierten Potentiale dargestellt. Gemessen wurden die Potentiale an Position CPz. Jedes Feld stellt eine Ereigniskombination dar. Ähnlich wie in den vorherigen Abbildungen stehen die blauen und roten Linien für die verschiedenen Aufgabentypen Raten oder Vergleichen. Dünne oder dicke Linien stehen für die unterschiedlichen Aufgabenversionen mit zwei oder einem Stimulus. Die Einheit der

x-Achse ist ms. Die Einheit der y-Achse ist µV, dargestellt ist der Bereich von -5µV bis 30 µV.

Tabelle 4: Amplitude der gemittelten Wellenform der P3 (Position CPz, Cz, Pz, CP1 und CP2). Zur Beschreibung des Tabellenaufbaus siehe Legende der Tabelle 2.

	Haupteffekt der Reihe	**Aufgabe**	**Aufgabenversion**	**Aufgabe x Aufgabenversion**
Haupteffekt der Zeile		**33.7** **0.001**	3.5 0.08	0.0
Häufigkeit S1	**12.8** **0.003**	3.0	3.8 0.07	0.3
Häufigkeit S2	**83.6** **<0.001**	3.5 0.08	3.3 0.09	0.5
Häufigkeit S1 x Häufigkeit S2	0.4	0.9	0.4	0.6

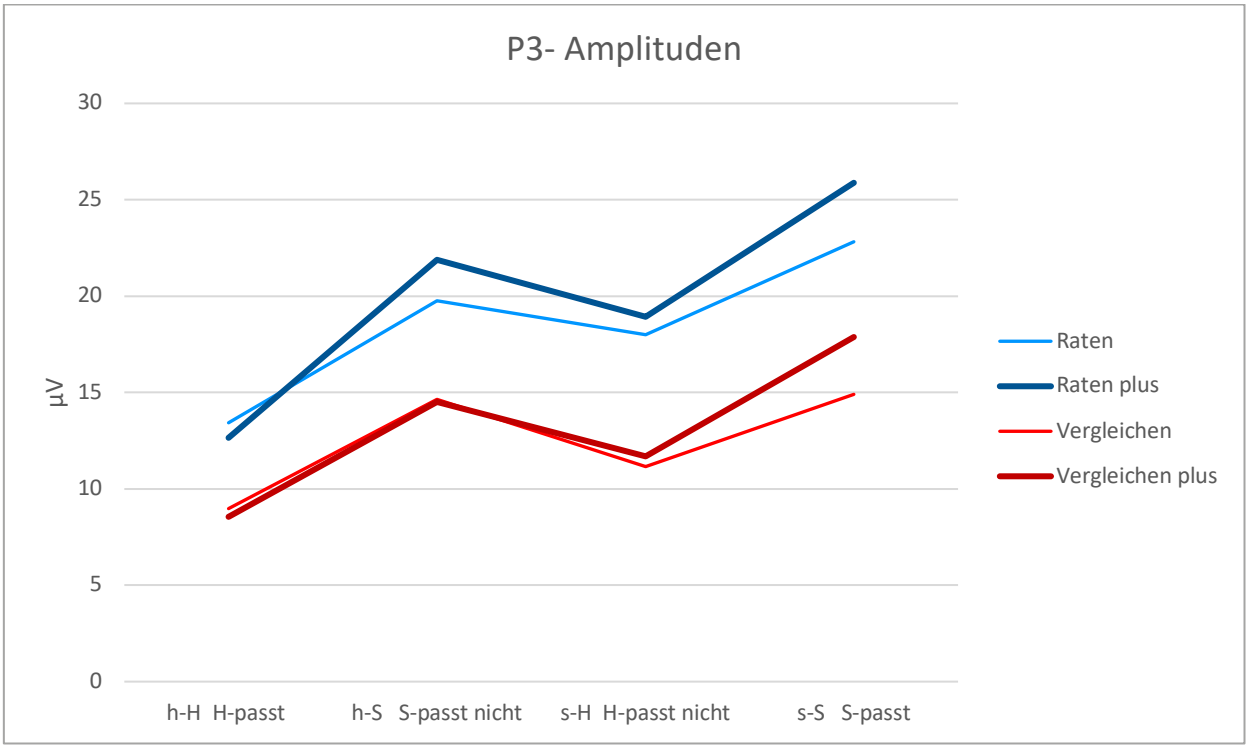


Abbildung 15: Durchschnittliche P3-Amplituden für die verschiedenen Ereigniskombinationen.

Dargestellt sind die gemittelten Amplitudenwerte für die verschiedenen Ereigniskombinationen. Auf der x-Achse sind die Ereigniskombinationen aufgetragen, dabei stehen h und s für häufige und seltene erste Ereignisse. H und S stehen für häufige und seltene zweite Ereignisse. Auf der y-Achse ist die Amplitudengröße in µV angegeben. Die blauen oder roten Linien stehen für die verschiedenen Aufgabentypen Raten oder Vergleichen. Dünne oder dicke Linien stehen für die unterschiedlichen Aufgabenversionen mit zwei oder einem ersten Ereignis.

3.5.1 Die P3 in Bezug auf die Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses

Sowohl beim Faktor der Häufigkeit des ersten Ereignisses, als auch beim Faktor der Häufigkeit des zweiten Ereignisses, traten signifikante Haupteffekte auf ($F_{1,15}$ = 12.8, p = 0.003; $F_{1,15}$ = 83.6, p<0.001). Es gab keine signifikante Wechselwirkung zwischen diesen beiden Faktoren ($F_{1,15}$ = p>0,05). Die P3-Amplituden waren größer bei seltenen als bei häufigen zweiten Ereignissen. Zudem wurde die Amplitudengröße, evoziert durch das zweite Ereignis, durch die Häufigkeit des ersten Ereignisses beeinflusst: Die P3s nach seltenen ersten Ereignissen waren größer als die P3 nach häufigen ersten Ereignissen. Dies wird deutlich anhand der Kurvenverläufe in Abbildung 15. Es bestand keine statistisch signifikante Interaktion, dementsprechend galt dies sowohl nach häufigen als auch seltenen ersten Ereignissen.

3.5.2 Die P3 in Bezug auf den Aufgabentyp

Die P3 war deutlich größer in Rate- als in Vergleichsaufgaben ($F_{1,15}$ = 33.7, p < 0.001) (siehe Abbildung 15).

3.5.3 Die P3 in Bezug auf die Aufgabenversion

Es gab keinen signifikanten Haupteffekt für den Faktor der Aufgabenversion ($F_{1,15}$ = 3,8, p ≥ 0,07), und auch keine Wechselwirkung mit den anderen Faktoren (Aufgabenversion x Häufigkeit des ersten Ereignisses $F_{1,15}$= 3.8, p = 0.07; Aufgabenversion x Häufigkeit des zweiten Ereignisses $F_{1,15}$= 3.3, p = 0.09).

3.5.4 Ereigniskorrelierte Potentiale vor dem ersten Ereignis

3.5.4.1 CNV

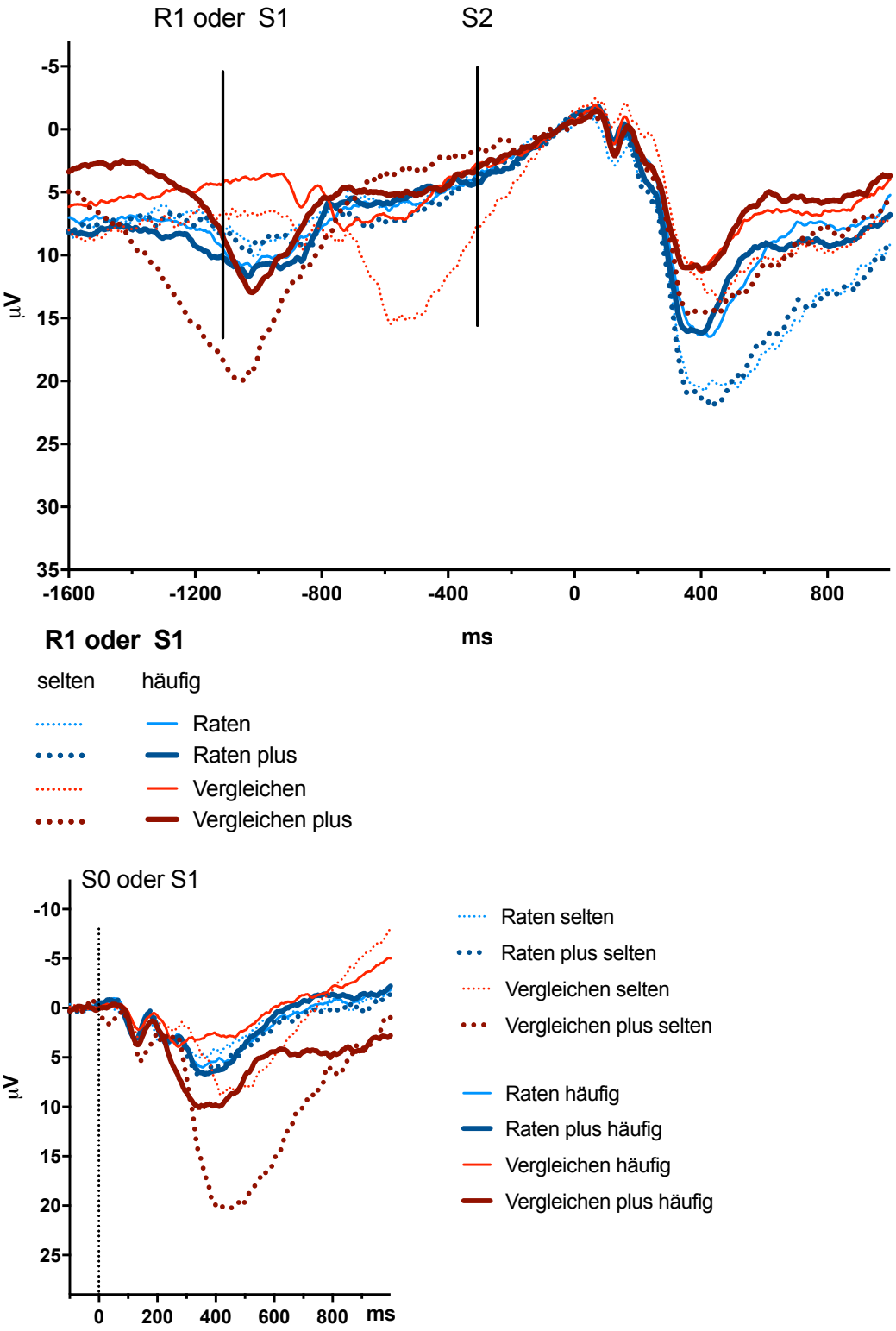


Abbildung 16: Ereigniskorrelierte Potentiale vor dem zweiten Ereignis. Dargestellt sind die durchschnittlichen Ereigniskorrelierten Potentiale aufgenommen an Position CPz. Wie in den vorherigen Abbildungen repräsentieren blaue und rote

Linien Rate- und Vergleichsaufgaben. Dünne und dicke Linien stehen für die unterschiedlichen Aufgabenversionen mit einem (R1 oder S1) oder zwei (R1 und S1) ersten Ereignissen. Durchgezogene und gepunktete Linien stehen für häufige und seltene Ereignisse. Die Einheit der y-Achse ist µV, die negative Polarität ist dabei nach oben gerichtet. Die Einheit der x-Achse ist ms. Die Daten von häufigen und seltenen zweiten Stimuli sind zusammen dargestellt. Im unteren Feld liegt der Nullpunkt der x-Achse auf dem Zeitpunkt des ersten Stimulus. Dieser ist S0 „Bitte raten" in den Rateaufgaben und S1 (eingeblendetes X oder U) in den Vergleichsaufgaben.

In der Varianzanalyse der gemittelten Amplitudenwerte der P3 zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Aufgabentyp. Dieser könnte ebenso mit anderen ereigniskorrelierten Potentialen wie zum Beispiel der CNV (Walter, et al., 1964) zusammenhängen. Daher wurden die ereigniskorrelierten Potentiale vor dem zweiten Ereignis ebenfalls untersucht. Dargestellt sind die EEG-Daten im oberen Feld in Abbildung 16. Dort sind ereigniskorrelierte Potentiale im Zeitraum von 1600 ms vor dem zweiten Buchstaben bis 800 ms nach dem zweiten Stimulus dargestellt.

Die Daten von häufigen und seltenen Zielstimuli wurden hier zusammen untersucht, da die Teilnehmer vor dem zweiten Ereignis nicht wussten, welcher Buchstabe gezeigt werden würde. Das Ereignis bei -1000 ms stellt in den reinen Vergleichsaufgaben den Stimulus S1 dar. In den anderen drei Aufgabenversionen stellt dieses Ereignis eine Reaktion R1, also einen Tastendruck dar.

In allen vier Wellenkurven sieht man deutlich eine langsame Negativität. Diese beginnt bei etwa -500 ms vor dem zweiten Ereignis und erreicht ihren Höhepunkt bei S2-Beginn.

Diese langsame Negativität ist vermutlich eine CNV („kontingente negative Variation", Walter et al., 1964) und steht möglicherweise für eine Erwartungshaltung und die Vorbereitung auf die Reaktionsantwort R2.

Die CNV erreicht hier bei 100 ms vor dem Zielbuchstaben ihren Höhepunkt, dies wurde aber in der obigen Analyse der P3 und daher auch hier in der Abbildung als Grundlinie verwendet. Daher beginnen die Spannungen im positiven Bereich und gleichen sich bis zum Zeitpunkt des zweiten Ereignisses an die Nulllinie an.

Die CNV-Amplituden haben sowohl bei den verschiedenen Aufgabentypen als auch bei den verschiedenen Aufgabenversionen einen ähnlichen Kurvenverlauf (siehe Abbildung 16).
Die P3-Amplituden treten dagegen in den Rate- und Vergleichsaufgaben in unterschiedlicher Form auf; dies deutet daraufhin, dass die CNV und die unterschiedlichen P3-Amplituden in keinem Zusammenhang stehen.

3.5.4.2 P3 evoziert durch S1

Es sind auch noch andere positive Potentiale vor der CNV sichtbar. In der reinen Vergleichsaufgabe zeigt sich bei seltenen Ereignissen ein positives Potential bei - 600 ms. Dies ist offensichtlich eine P3, evoziert durch ein seltenes Ereignis bei -1000 ms. Ähnlich stellt sich in dem Aufgabenblock Vergleichen plus eine P3 bei -1000 ms bei seltenen Stimuli dar. Diese wird durch den Stimulus S1 bei diesem Aufgabentyp ca. 500 ms vor dem ersten Tastendruck R1 (siehe Abbildung 16) hervorgerufen.
In der Aufgabenversion Raten plus dagegen stellt sich eine ähnliche Potentialverschiebung nicht dar. Es zeigt sich keine P3-ähnliche positive Potentialverschiebung, obwohl der Buchstabe S1 in dieser Aufgabenversion 30 ms nach dem Tastendruck präsentiert wird.
Um die positiven Potentialanstiege vor den Stimuli zu analysieren, sind die ereigniskorrelierten Potentiale, die durch den ersten Stimulus evoziert wurden, im unteren Feld dargestellt.
Im Aufgabenblock Raten stellt S0 den Stimulus ("Raten, bitte") dar. In den Vergleichsaufgaben wird S1 durch das Erscheinen des Buchstabens X oder U in blau dargestellt.
In der Aufgabenversion Vergleichen sind die ereigniskorrelierten Potentiale mit den ereigniskorrelierten Potentialen in der Zeitspanne von -1100 ms bis 0 ms aus dem oberen Feld identisch, da sich dort S1 1000 ms vor dem zweiten Stimulus befindet.
Die anderen drei Aufgaben sind zeitlich auf den Stimulus S1, also das Erscheinen des Buchstabens X/U in den Vergleichsaufgaben, oder S0, das Erscheinen des Schriftzuges „Bitte raten“ in den Rateaufgaben, abgestimmt. All diese Stimuli liegen ungefähr 1500 ms vor dem zweiten Ereignis S2.

Im Detail: In der Aufgabenversion Vergleichen plus liegt der Stimulus S1 durchschnittlich bei -1556 ms vor dem zweiten Ereignis. Beim Raten liegt S0 durchschnittlich bei -1455 ms vor S2, ohne dass ein Buchstabe S1 eingeblendet wird. In der Aufgabenversion Raten plus liegt er bei durchschnittlich -1411 ms vor S2.

P3s, die durch dieses erste Ereignis 300 ms bis 500 ms nach Ereignisbeginn hervorgerufen wurden, wurden an Position CPz gemessen und durch eine Varianzanalyse auf Einflüsse der Faktoren Aufgabentyp, Aufgabenversion und Häufigkeit (häufig vs. selten) überprüft.

Mit dem Faktor Häufigkeit ist die Antwortwahrscheinlichkeit auf den S0-Stimulus in den Rateaufgaben gemeint, die Stimulus-Wahrscheinlichkeit von S1 in reinen Vergleichsaufgaben und die Stimulus- und Antwortwahrscheinlichkeit von S1 in der Aufgabenversion Vergleichen plus.

Alle drei Haupteffekte ($F_{1,15}$ = 20.9, p< 0.001), alle drei Interaktionen zweiter Ordnung ($F_{1,15}$ ≥17.6 p ≤0.001) und die Wechselwirkung dritter Ordnung ($F_{1,15}$= 6.4, p= 0.02) waren signifikant.

Gesonderte Varianzanalysen für die beiden Aufgaben zeigten, dass bei den Rateaufgaben keine Effekte auftraten ($F_{1,15}$ ≤ 2.4, p ≥ 0.15 für Haupteffekt von Aufgabenversion, Haupteffekt von Wahrscheinlichkeit und der Wechselwirkung von Aufgabenversion x Wahrscheinlichkeit).

In den Vergleichsaufgaben dagegen traten signifikante Haupteffekte für die Faktoren Aufgabenversion und Wahrscheinlichkeit auf, sowie für die Interaktion von Aufgabenversion x Wahrscheinlichkeit ($F_{1,15}$ ≥ 17.7, p ≤ 0.001). Die S1- evozierten P3 Amplituden waren in den Vergleichsaufgaben bei seltenem Ereignis größer als bei häufigem Ereignis. Deutlich sichtbar wird dies an den gestrichelten Linien für seltene und an den durchgezogenen Linien für häufige Stimuli in Abbildung 16. Außerdem war der Häufigkeitseffekt im Aufgabenblock Vergleichen plus größer als im Aufgabenblock Vergleichen.

4 Diskussion

Unsere Arbeitshypothese ging davon aus, dass die Bedeutung der P3b mithilfe der Reiz-Reaktion-Verbindungs-Hypothese (S-R-Link-Hypothese) erklärt werden kann. Diese Hypothese besagt, dass Reize und Reaktionen durch Anweisungen miteinander verbunden sind (z.B. *U - rechte Hand* oder *X - linke Hand)* (Verleger, et al., 2005; Verleger, et al., 2014). In einer Standardaufgabe mit zwei Reizen würde das bedeuten, dass durch ständiges Wiederholen der Reize (X oder U) und der entsprechenden Reaktionen (rechte Hand oder linke Hand) nicht jedes Mal eine ausführliche Auswahl der Antwort stattfinden muss. Die Assoziationen *„U - rechte Hand“* oder *„X - linke Hand“* würden gespeichert werden. Dadurch würde die Wahrnehmung des Reizes die Reaktion reflexartig anstoßen (De Jong, 1993; Verleger, et al.; 2014). Wenn eine Reiz-Reaktions-Verbindung einige Zeit nicht benutzt wurde, muss diese reaktiviert werden. Die Reaktivierung einer solchen vorhandenen Reiz-Reaktions-Verbindung stellt die P3b-Amplitude dar. Selten genutzte Reiz-Reaktions-Verbindungen evozieren größere P3b-Amplituden als häufig genutzte, da diese stärker reaktiviert werden müssen (Verleger, et al., 2014). Die dieser Arbeit zugrundeliegende Frage war nun: Wie kann das Auftreten der P3b-Amplitude in Rateaufgaben mithilfe der Reiz-Reaktion-Verbindungs-Hypothese erklärt werden, obwohl in Rateaufgaben nach Erscheinen des Reizes keine Reaktion gefordert wird? Als mögliche Antwort auf diese Frage wurde hier vermutet, dass auf den vorhergesagten Reiz eine innere Reaktion stattfindet, abhängig davon, ob der Reiz zur Vorhersage passt oder nicht (Verleger et al., 2015a). Bei den zwei zu ratenden Reizen [häufig] und [selten] gäbe es demnach vier mögliche und immer wiederkehrende Reiz-Reaktions-Verbindungen: *häufig - passt (H - passt) , häufig - passt nicht (H - passt nicht), selten - passt nicht (S - passt nicht)* und *selten - passt (S - passt).*

Das bedeutet, dass ein zu ratender Reiz eine größere oder kleinere P3-Amplitude evozieren kann, nicht beeinflusst davon, ob die Vorhersage mit dem Reiz übereinstimmt oder nicht, sondern davon, wie selten die Verbindung von Reiz und interner Reaktion ist, denn dann muss diese Verbindung reaktiviert werden. Daraus ergeben sich folgende Vorhersagen:

Die weniger genutzten Reiz-Reaktions-Verbindungen würden eine größere P3b-Amplitude evozieren als die häufiger genutzten Reiz-Reaktions-Verbindungen. Die Verbindung *H - passt* würde häufig aktiviert werden, die Verbindung *H - passt nicht*

würde dagegen weniger häufig vorkommen. Deswegen braucht die Verbindung *H - passt nicht* mehr Reaktivierung als *H - passt* und würde eine größere P3b-Amplitude evozieren. Dagegen würde beim seltenen zweiten Ereignis die Verbindung *S - passt* eine größere P3b auslösen als die Verbindung *S - passt nicht*. Zum einen da die Verbindungen des seltenen zweiten Ereignisses weniger aktiviert sein würden als nach häufigen zweiten Ereignissen, zum anderen weil der seltene Reiz eher mit der Reaktion - *passt nicht* als mit der Reaktion - *passt* verbunden wäre.

In einer Vergleichsaufgabe findet ebenfalls eine Reaktion auf den zweiten Stimulus statt, abhängig davon, ob die beiden Reize übereinstimmen oder nicht. Wenn die P3b in der Rateaufgabe wirklich von der Kopplungsstärke des Reizes mit einer internen Vergleichsantwort abhängt, dann sollte sie sich so verhalten wie die P3b in einer Vergleichsaufgabe und den gleichen Gesetzmäßigkeiten unterliegen. Zur Überprüfung dieser Vermutung wurden Rateaufgaben, bei denen ein Vergleich von Vorhersage und Reiz als interne Reaktion auf den Reiz stattfindet, Vergleichsaufgaben gegenübergestellt, bei denen ein Vergleich vom ersten Reiz zum zweiten Reiz stattfindet.

Um die Probanden in Vergleichsaufgaben dazu zu motivieren, die beiden Reize miteinander zu vergleichen, wurde eine Reaktion mittels Tastendruckes nach dem zweiten Reiz gefordert. Damit die Vergleichbarkeit der beiden Aufgabentypen gewährleistet wurde, wurde auch in Rateaufgaben eine Reaktion mittels Tastendruckes gefordert. Dabei sollte die innere Reaktion unterstützt werden, indem durch das erste Ereignis (Vorhersage oder Reiz) die Hand und durch das zweite Ereignis der Finger definiert wurde, mit denen reagiert werden sollte.

Tatsächlich zeigten die Auftretenswahrscheinlichkeiten des Zielreizes (d.h. des zweiten Ereignisses (- *H* oder - *S*) und die abhängigen Reaktionsfrequenzen (- *passt* oder - *passt nicht*), welche durch die Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Ereignisses und deren Übereinstimmung bzw. Nichtübereinstimmung bestimmt werden, in beiden Aufgabentypen ähnliche Effekte auf die P3b-Amplitude des zweiten Ereignisses. Bei seltenen Zielreizen waren die P3b-Amplituden stärker ausgeprägt als bei häufigen Zielreizen. Dieser Effekt konnte sowohl während der Ausführung von Rate- als auch in Vergleichsaufgaben beobachtet werden. Des Weiteren wurde vermutet, dass die P3b-Amplituden in Rate- und Vergleichsaufgaben gleich groß ausgeprägt sein würden. Diese Annahme konnte

nicht bestätigt werden. Die durch das zweite Ereignis evozierten P3b-Amplituden waren in Rateaufgaben größer als in Vergleichsaufgaben.

4.1 Effekte der Häufigkeiten der Ereigniskombinationen auf die P3-Amplitude

Die P3-Amplituden waren sowohl in Rateaufgaben als auch in Vergleichsaufgaben nach dem seltenen Zielreiz größer als nach dem häufigem Zielreiz. Dieser Effekt wurde für Rateaufgaben schon in einigen Studien beobachtet (Tueting, et al.,1970; Verleger, et al., 2015a; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a). In einer Studie wurde in Frage gestellt, ob dieser Effekt auftritt, weil seltene Reize unerwartet sind und deswegen größere P3-Amplituden evozieren als häufige Reize (Verleger und Śmigasiewicz, 2016a). Da die P3b-Amplituden bei der Vorhersage eines häufigen Reizes und Auftreten des seltenen Reizes größer sind als bei Vorhersage eines häufigen Reizes und Auftreten eines häufigen Reizes, würde diese Vermutung nahe liegen. Bei genauerer Betrachtung der Rateaufgaben wurde diese Annahme angezweifelt, da die angesprochenen Effekte auf die P3b-Amplitude besonders bei häufigen Zielreizen auftraten. Wohingegen die großen P3b-Amplituden, die durch seltene Zielstimuli evoziert wurden, als unempfindlich gegenüber den Vorhersagen beschrieben wurden (Verleger und Śmigasiewicz, 2016a).

In unserer Studie zeigten sich ähnliche Ergebnisse: Nach seltenen Vorhersagen und korrekt erratenen seltenen Reizen traten größere P3-Amplituden auf als nach häufigen Reizen. Obwohl die Probanden einen seltenen Stimulus vorhergesagt und erwartet hatten, wurden größere P3-Amplituden bei der Kombination *S - passt (selten - selten)* als bei der Kombination *S - passt nicht (häufig - selten)* erzielt. Insgesamt ist es daher unwahrscheinlich, dass größere P3-Amplituden evoziert werden, wenn ein Reiz unerwartet auftritt (Verleger und Śmigasiewicz, 2016a).

In der aktuellen Studie untersuchten wir, wie sich die Effekte der abhängigen Reaktionsfrequenz (- *passt* oder - *passt nicht*) und der Auftretenswahrscheinlichkeit des Zielstimulus (zweiten Ereignisses) in Vergleichsaufgaben gegenüber Rateaufgaben verhielten. Tatsächlich zeigten die vom ersten Reiz abhängigen Reaktionsfrequenzen (S1) und die Auftretenswahrscheinlichkeiten des Zielreizes (S2) in den Vergleichsaufgaben ähnliche Effekte auf die P3-Amplitude wie die von der Vorhersage abhängigen Reaktionsfrequenzen und Auftretenswahrscheinlichkeiten des Zielreizes (R1 und S2) in den Rateaufgaben.

Eine mögliche Erklärung für diese Effekte wäre, dass in beiden Aufgabentypen tatsächlich ein ähnlicher interner Prozess abläuft. Dadurch kann das Auftreten der P3 in Rateaufgaben mithilfe der S-R-Link-Hypothese erklärt werden.

Wenn die Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Ereignisses (S1/ R1) die P3-Amplitude des zweiten Ereignisses beeinflusst, könnte vermutet werden, dass alternativ zur Reiz-Reaktions-Verbindungs-Hypothese ein anderer psychologischer Mechanismus dieser Beeinflussung zugrunde liegt. Möglicherweise gibt es einen elektrophysiologischen Prozess, der die Verbindung zwischen dem ersten Ereignis und dem zweiten Ereignis darstellt. Deswegen wurden im Intervall zwischen dem ersten und zweiten Stimulus die CNV-Amplituden untersucht. Diese stellen eine negative Potenzialverschiebung dar, die die Erwartung und Vorbereitung auf den folgenden Reiz widerspiegelt (Walter, et al.,1964; Brunia, 2003; Verleger, et al., 2017). Es konnten allerdings keine systematischen Unterschiede nach häufigen oder seltenen ersten Reizen festgestellt werden. Das spricht dafür, dass die Effekte des ersten Ereignisses auf die P3 eher indirekt sind und durch die Kombination aus der Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten und des zweiten Ereignisses beeinflusst werden.

Die in der Einleitung angesprochene Annahme, dass die P3 die Entscheidung selbst darstellt (O'Connell, et al., 2012), konnte anhand unserer Ergebnisse nicht bestätigt werden. Die Entscheidungen, die in Rateaufgaben getroffen werden könnten, wären zum Beispiel „Ja, ich habe richtig geraten", wenn Vorhersage und Reiz übereinstimmen und „Nein, ich habe falsch geraten", wenn Vorhersage und Reiz nicht übereinstimmen. In der aktuellen Studie waren die P3-Amplituden größer bei der Kombination *H - passt nicht* als bei der Kombination *H - passt*. Bei der Kombination *S - passt nicht* waren die P3-Amplituden kleiner als bei *S - passt*. Folglich ist nicht klar, warum eine größere P3-Amplitude bei der Entscheidung „Nein ich habe falsch geraten" nach dem häufigen Zielstimulus evoziert wird, wohingegen eine kleinere P3-Amplitude bei der die Entscheidung „Nein ich habe falsch geraten" beim seltenen Zielstimulus hervorgerufen wird. Warum würde Nichtübereinstimmung beim häufigen Zielstimulus eine größere P3-Amplitude evozieren als Übereinstimmung und im Gegensatz dazu Übereinstimmung beim seltenen Stimulus eine größere P3-Amplitude evozieren als Nichtübereinstimmung? Folglich konnten keine weiteren Argumente für die „Entscheidungs-Hypothese" (O'Connell, et al., 2012) gewonnen werden.

Eine weitere mögliche Erklärung für das Auftreten der P3-Amplitude in beiden Aufgabentypen wäre, dass die ähnlichen Effekte in beiden Aufgaben durch die einfache Abfolge der Reize mit unterschiedlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten zustande kämen. Wie schon beim vorher beschriebenen Oddball-Effekt evoziert der Wechsel eines Reizes in der Regel größere P3-Amplituden als die Wiederholung eines Reizes (Duncan-Johnson und Donchin, 1977; Polich 2007). Das würde allerdings bedeuten, dass die Effekte nicht aufgrund der Auftretenswahrscheinlichkeit des zweiten Stimulus in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Stimulus aufträten. Wenn tatsächlich der Oddball-Effekt durch den Wechsel der Häufigkeit der Reize für die ähnlichen Effekte in beiden Aufgaben verantwortlich wäre, würde erwartet werden, dass bei der Kombination *häufig - häufig (H - passt)* kleinere P3-Amplituden evoziert werden als bei *häufig - selten (S – passt nicht)* und dass bei *selten - häufig (H - passt nicht)* größere P3-Amplituden evoziert werden als bei *selten – selten (S - passt)*. Die erste Annahme, dass bei der Kombination *häufig - häufig* kleinere P3-Amplituden evoziert werden, traf zu. Die zweite Annahme, dass bei der Kombination *selten - selten* kleinere P3-Amplituden festgestellt werden konnten als bei *selten - häufig*, traf nicht zu.

Eine Einschränkung dieser Studie besteht darin, dass es für die Reiz-Reaktions-Verbindung *S - passt* nur wenige Durchgänge gab, wodurch dementsprechend ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis erreicht wurde. Mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 4 % in den Vergleichsaufgaben und 5 % in den Rateaufgaben ergaben sich bei 250 Durchgängen pro Aufgabenversion ca. 10-13 Durchgänge für diese Kombination. Ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis erhöht die Größe des Fehlerterms der ANOVA (der Variabilität eines Effekts zwischen den Versuchspersonen), was dazu führen kann, dass einige Interaktionen nicht signifikant werden konnten. Die Interaktion von Aufgabe und Aufgabenversion mit der S2-Frequenz und der abhängigen Reaktionsfrequenz wären vermutlich bei einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis signifikant geworden.

In einer nachfolgenden Datenanalyse wurden Daten aus dieser Studie und zwei weiteren Studien (Verleger, et al., 2015; Verleger und Śmigasiewicz, 2016a) zusammengefasst (Verleger, 2020). Die Daten wurden über alle verschiedenen Versionen der Rateaufgaben in jedem Experiment gemittelt. Das Ergebnis dieser Datenanalyse war, dass größere P3-Amplituden nicht nur bei falsch vorhergesagten häufigen Reizen (verglichen mit richtig vorhergesagten) hervorgerufen wurden –

dies war in jeder der drei Studien auch stabil als Ergebnis herausgekommen – sondern auch größere P3-Amplituden bei richtig geratenen seltenen Reizen (verglichen mit falsch vorhergesagten) – dies war nicht in jeder der Studien signifikant geworden – in der jetzigen nicht, wie gerade beschrieben und auch im Experiment von Verleger und Śmigasiewicz 2016 nicht; dort war der Anstieg der P3-Amplitude bei korrekt vorhergesagten seltenen Reizen gegenüber nicht vorhergesagten seltenen Reizen nur bei Fz und FCz signifikant und wurde dort wegen dieser anterioren Topographie einem Überlappungseffekt einer verlängerten N2 zugeschrieben (Verleger & Śmigasiewicz, 2016a). In der Gesamtanalyse aller drei publizierten Rate-Studien durch Verleger (2020) für die posteriore P3b (gemessen bei CPz) war der Effekt aber deutlich signifikant, $F_{1,64} = 16.4$, $p < 0.001$, sodass man annehmen kann, dass die Nicht-Signifikanz in meiner Studie wie vermutet am schlechten Signal/Rausch-Verhältnis wegen der wenigen Durchgänge liegt.

Daraus lässt sich schließen, dass nicht allein die Auftretenswahrscheinlichkeit eines einzelnen Reizes die Größe der P3-Amplitude beeinflusst – selbstverständlich lösen häufige Reize eine kleinere P3 aus als seltene –, sondern der Kontext: Ob auch „häufig“ oder „selten“ geraten wurde. Interessanterweise hängt dabei die Ausprägung der P3-Amplitude nicht vom Erfolg der Vorhersage ab, sondern davon wie häufig die Verbindung von Reiz und interner Reaktion ist. Denn häufige Reize lösen eine größere P3 aus, wenn sie nicht vorhergesagt wurden als wenn sie vorhergesagt wurden, seltene Reize dagegen lösen eine größere P3 aus, wenn sie vorhergesagt wurden als wenn sie nicht vorhergesagt wurden. Der ausschlaggebende Faktor ist offenbar die Auftretenswahrscheinlichkeit: Die Auftretenswahrscheinlichkeit der Reiz-Reaktions-Verbindung *H - passt nicht (selten - häufig)* ist geringer als die der Kombination *H - passt (häufig - häufig*), während umgekehrt die Auftretenswahrscheinlichkeit der Kombination *S - passt (selten – selten)* kleiner ist als die der Kombination *S - passt nicht (häufig - selten).*

4.2 Größere P3-Amplituden in Rate- als in Vergleichsaufgaben

Entgegen unserer Erwartungen waren die P3-Amplituden in den Rateaufgaben größer als in den Vergleichsaufgaben. Wir hatten vermutet, dass sowohl in Rateaufgaben als auch Vergleichsaufgaben eine ähnliche innere Reaktion

stattfindet. Daher hatten wir ähnliche Ausprägungen der P3-Amplitude in Rate- und in Vergleichsaufgaben erwartet.

In der oben genannten Studie (Verleger und Śmigasiewicz, 2016a) wurden Rateaufgaben, in denen nach Auftreten des Reizes dieser mittels Tastendruckes bestätigt werden sollte, Rateaufgaben ohne Bestätigung gegenübergestellt. Dabei wurden größere P3-Amplituden bei dem Aufgabentyp mit Bestätigung festgestellt (Verleger und Śmigasiewicz, 2016a). Um die Vergleichbarkeit von Rateaufgaben und Vergleichsaufgaben zu gewährleisten, sollte in der aktuellen Studie ebenfalls eine Reaktion in den Rateaufgaben erfolgen. Es wurden sowohl in Rate- als auch in Vergleichsaufgaben Reaktionen mittels Tastendruckes nach einem ähnlichen Schema gefordert (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6). Daher scheint es unwahrscheinlich, dass die Reaktionen mittels Tastendruckes ausschlaggebend für die unterschiedlichen Ausprägungen der P3-Amplituden in beiden Aufgabentypen waren. Insgesamt wurden die Aufgaben möglichst ähnlich zueinander gestaltet. Sowohl die Zeitspanne zwischen dem ersten Ereignis und dem zweiten Ereignis als auch die Bezahlung war in beiden Aufgaben ähnlich, somit scheint es zweifelhaft, dass diese die unterschiedlich großen P3-Amplituden erklären könnten. Dieser Effekt kann auch nicht durch das Auftreten oder die Abwesenheit einer Reaktion R1 oder eines Reizes S1 begründet werden, da es von beiden Aufgabentypen ebenfalls Versionen gab, in denen ein zusätzlicher Reiz S1 in Rateaufgaben oder eine zusätzliche Reaktion R1 beim Vergleichen gefordert wurde (Raten plus und Vergleichen plus) (siehe Abbildung 7).

Bei der Ausprägung der durch das erste Ereignis evozierten P3-Amplitude gab es allerdings einen Unterschied bei den Rate- und Vergleichsaufgaben. Bei seltenen ersten Ereignissen wurden bei den Vergleichsaufgabe im Gegensatz zu den Rateaufgaben große P3-Amplituden durch den ersten Stimulus evoziert (siehe Abbildung 15). Dadurch bietet sich die Möglichkeit eines weiteren Erklärungsansatzes für die kleineren P3-Amplituden in den Vergleichsaufgaben: Da beim Vergleichen schon beim ersten Ereignis eine große P3-Amplitude evoziert wurde, sind die Generatoren der P3-Amplitude schon an P3-auslösende Faktoren habituiert und evozieren deswegen beim zweiten Ereignis eine kleinere P3-Amplitude. Dagegen spricht, dass bei einem Gewöhnungsprozess erwartet wird, dass die P3-Amplituden des Zielstimulus nach seltenen ersten Ereignissen kleiner sein sollten als nach häufigen ersten Ereignissen, weil durch seltene erste Ereignisse eine größere P3-Amplitude evoziert wurde als durch häufige erste

Ereignisse. Diese Annahme traf nicht zu stattdessen konnten nach seltenen ersten Ereignissen eher größere durch den Zielstimulus evozierte P3-Amplituden beobachtet werden.

Die in der Einleitung erwähnte „Context Updating Hypothese“ (Donchin, 1981; Donchin und Coles, 1988; Donchin et al., 1997) würde eine Erklärung für die größeren P3-Amplituden in Rateaufgaben bieten. Diese Theorie geht davon aus, dass die P3-Amplitude 33 (Donchin und Coles, 1988; Kamp, et al., 2013). Wenn ein Konflikt zwischen neuen Informationen und Erwartungen besteht, wird das alte Schema aktualisiert. Dieser Aktualisierungsprozess manifestiert sich durch die P3b-Amplitude. Dabei ist der sich in der P3b manifestierende Prozess an der Vorbereitung und Steuerung von zukünftigem Verhalten beteiligt (Donchin und Coles, 1988; Kamp, et al., 2013). Diese Vorbereitung würde in den Rateaufgaben Sinn ergeben, da hier beeinflusst werden kann, welcher Stimulus in den nächsten Durchgängen geraten werden soll. In den Vergleichsaufgaben wird dagegen der Stimulus vom Computer vorgegeben und kann nicht vom Probanden beeinflusst werden. Daher wäre es möglich, dass in Vergleichsaufgaben der vorbereitende Aktualisierungsprozess weniger stark ausgeprägt ist. Allerdings würde demnach erwartet werden, dass dieser Aktualisierungsprozess bei seltenen Zielstimuli stärker ausgeprägt ist als bei häufigen Zielstimuli, weil besonders bei seltenen Stimuli ein Konflikt zwischen neuen Informationen und Erwartungen besteht. Dieser Effekt konnte nicht beobachtet werden: Sowohl bei seltenen als auch bei häufigen Zielstimuli waren die P3-Amplituden der Vergleichsaufgaben kleiner als die der Rateaufgaben.

Eine andere Hypothese für die Vergrößerung der P3-Amplitude wäre, dass der Prozess, der sich durch die P3-Amplitude ausdrückt, beim Raten eine größere Kapazität benötigt als beim Vergleichen. In einer systematischen Übersichtsarbeit (Kok, 2001) wird thematisiert, ob die P3-Amplitude einen Hinweis auf die Größe der für eine Aufgabe benötigten Verarbeitungskapazität gibt. Für unsere Ergebnisse könnte daraus abgeleitet werden, dass in Rateaufgaben eine größere Arbeitskapazität benötigt wird. In der Studie wurde jedoch der Schluss gezogen, dass der Nutzen der P3-Amplitude als diagnostisches Maß begrenzt bleibt. Der Grund dafür war, dass die Manipulation der zwei Variablen Aufgabenrelevanz und Aufgabenschwierigkeit, die zur Messung der Kapazität genutzt werden sollten, entgegengesetzte Auswirkungen auf die P3-Amplitude haben (Kok, 2001). Die P3b-Amplituden nahmen jedoch zu, wenn eine bestimmte Aufgabe eine höhere

Relevanz erreichte und nahmen ab, wenn eine Aufgabe schwieriger wurde. Das Konzept der Arbeitskapazität impliziert aber, dass in beiden Bereichen mehr Kapazität investiert wird (Kok, 2001; Verleger, 2020).

Das Auftreten der größeren P3-Amplituden in Rateaufgaben könnte auch damit erklärt werden, dass der Zielreiz in Rateaufgaben einen größeren motivierenden Wert hat. Obwohl das Auszahlungsschema in beiden Aufgaben gleich war, kann es einen subjektiven Unterschied machen, ob die Übereinstimmung durch die eigene Vorhersage R1 (in Rateaufgaben) oder durch einen computergenerierten Reiz S1 (in Vergleichsaufgaben) erreicht wurde. Somit würden die Zielreize in der Rateaufgabe subjektiv als relevanter empfunden werden als in der Vergleichsaufgabe. In einer Studie zeigte sich, dass tatsächlich Zielreize mit einem hohen Anreizwert größere P3-Amplituden evozieren als mit einem niedrigen und dass die Größe der P3-Amplitude vom Anreiz oder der Motivation abhängt (Begleiter, et al.,1983; Flores, et al., 2015).

Zusammenfassend bietet die letzte Erklärung die wahrscheinlichste Begründung für die unterschiedlichen Größen der P3-Amplituden in Rate- und in Vergleichsaufgaben. Doch muss zugegeben werden, dass sie zwar nicht im direkten Widerspruch zur Reiz-Reaktions-Hypothese steht, aber auch keinen direkten Bezug zu dieser Hypothese hat.

4.3 S1- evozierte P3-Amplituden

Wie schon angesprochen, wurden durch seltene erste Ereignisse in den Vergleichsaufgaben große P3-Amplituden evoziert (siehe Abbildung 16). Am stärksten ausgeprägt waren diese in der *Vergleichen plus* Aufgabe, dort sollte der erste Reiz mittels Tastendruckes bestätigt werden (siehe Abbildung 7). Im Gegensatz dazu gab es in der *Raten plus* Aufgabe überhaupt keine S1-evozierte P3, dort erschien der vorhergesagte Reiz *S1* 30 ms nach dem Tastendruck.

Dieser Effekt kann im Rahmen der Reiz-Reaktions-Verbindungs-Hypothese erklärt werden. Die P3-Amplitude in der *Vergleichen plus* Aufgabe war am größten, denn es wurde eine sofortige Reaktion gefordert, welche davon abhängig war, welcher Stimulus erschien (z.B. X - rechte Hand, U - linke Hand). Wenn diese Reiz-Reaktions-Verbindung in den vorherigen Durchgängen nicht aktiviert wurde, musste sie reaktiviert werden, welches sich in einer großen P3-Amplitude widerspiegelte.

Das Auftreten der P3-Amplitude in der reinen Vergleichsaufgabe könnte dadurch erklärt werden, dass der erste Reiz, obwohl keine Reaktion mittels Tastendruckes gefordert wurde, die Antwort auf den zweiten Reiz spezifizierte: Der erste Reiz gab an, ob die Antwort entweder mit der linken oder der rechten Hand zu erfolgen hatte, während der zweite Reiz angab, mit welchem Finger geantwortet werden sollte (siehe Abb. 1). In einer Studie konnte beobachtet werden, dass kleinere P3-Amplituden evoziert werden, wenn die Antwort verzögert auftritt (Verleger, et al., 2016b). Dieser Effekt könnte die kleineren P3-Amplituden in der reinen Vergleichsaufgabe im Gegensatz zu den P3-Amplituden in der *Vergleichen plus* Aufgabe erklären: Die Antwort, die auf den ersten Reiz gegeben werden sollte, wurde verzögert und war noch nicht vollständig festgelegt, da erst nach dem zweiten Reiz eine Reaktion erfolgen sollte und auch erst durch den zweiten Reiz der Finger festgelegt wurde, mit dem geantwortet werden sollte.
In der *Raten plus* Aufgabe wurde hingegen keine Reaktivierung der Reiz-Reaktions-Verbindung benötigt, da die zugehörige Reaktion, nämlich die Vorhersage, schon 30 ms vor dem Auftreten des ersten Reizes aktiviert wurde.

4.4 Auswirkungen auf die Reaktionszeiten und Fehlerraten

Wie schon im Ergebnisteil angesprochen, war das Benutzen des falschen Fingers an der richtigen Hand der am häufigsten begangene Fehler. Dieser Fehler trat in durchschnittlich 5,5% der Durchgänge auf. Andere Fehler traten nur in 0,5 % der Durchgänge auf und werden daher nicht detailliert besprochen. Nach seltenen Zielreizen wurden die meisten Fehler beobachtet. Oft drückten die Probanden die Taste, die nach häufigen Zielreizen anstatt nach seltenen Zielreizen gedrückt werden sollte. Dass vor allem Fehler nach seltenen Reizen gemacht wurden und demzufolge einfach die häufige Reaktion wiederholt wurde, ist eine übliche Beobachtung in Wahlreaktions-Aufgaben (Verleger und Śmigasiewicz, 2016a). In der aktuellen Studie zeigte sich dieses Phänomen sowohl in den Rate- als auch in Vergleichsaufgaben. Dies ist erstaunlich, da angenommen werden könnte, dass in Rateaufgaben die Probanden eher die gleiche Taste drücken würden, die sie zur Vorhersage genutzt hatten, bzw. in Vergleichsaufgaben die gleiche Taste auswählen, die durch das erste Ereignis determiniert wurde.

Das hätte bedeutet, dass weniger Fehler bei den Kombinationen aufgetreten wären, bei denen erstes und zweites Ereignis übereinstimmen *(passt)*, als bei den Kombinationen, bei denen die beiden Ereignisse nicht übereinstimmen (*passt nicht)*. Stattdessen zeigte sich, dass vor allem mehr Fehler nach seltenen als nach häufigen Zielreizen begangen wurden, sogar wenn der seltene Zielreiz S2 mit der Vorhersage übereinstimmte, d. h. bei der Kombination *S - passt* (*selten - selten)* (siehe Abbildung 10). Dies deutet daraufhin, dass die Fehlerraten vor allem von den Auftretenswahrscheinlichkeiten des Zielstimulus abhängen und diese dementsprechend relevanter zu sein scheinen als der Erfolg der Vorhersage bzw. die Übereinstimmung vom ersten und zweiten Ereignis.

Auch bei den Reaktionszeiten wird ein Einfluss der Auftretenswahrscheinlichkeiten (häufig oder selten) der Antworten deutlich. Um die Länge der Reaktionszeiten unabhängig von der Händigkeit beurteilen zu können, wechselte die Hand, die zur häufigen Reaktion genutzt werden sollte, nach der Hälfte der Durchgänge. Mit der häufig genutzten Hand, die bei häufigen Vorhersagen R1 in Rateaufgaben verwendet werden sollte oder durch häufige Reize S1 in Vergleichsaufgaben determiniert wurde, waren die Reaktionszeiten bei - *passt* deutlich kürzer als bei - *passt nicht*. Mit der selten genutzten Hand, die für seltene Vorhersagen in Rateaufgaben verwendet und durch seltene Stimuli in Vergleichsaufgaben determiniert wurde, waren die Reaktionszeiten sowohl bei der Kombination *s - S (S - passt)* als auch bei *s - H (H - passt nicht)* länger. Der Einfluss von Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung von erstem und zweitem Ereignis auf die Reaktionszeit war dementsprechend von der Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Ereignisses abhängig.

Allerdings muss zugegeben werden, dass der Erfolg der Vorhersage (- *passt* oder - *passt nicht)* in Rateaufgaben doch einen Effekt hatte, nämlich auf die Fehlerrate. In Rateaufgaben trat ein besonders starker Anstieg bei der Fehlerrate der Reiz-Reaktionsverbindung *h - S (S - passt nicht)* auf: Wenn ein häufiger Reiz vorhergesagt wurde aber ein seltener Reiz erschien, wurde so geantwortet, als wäre ein häufiger Zielreiz aufgetreten. Dies deutet daraufhin, dass eine falsche Vorhersage die Fehlertendenz erhöht. Ein alternativer Erklärungsansatz wäre, dass innerhalb des Durchgangs ein Bahnungseffekt durch die häufige vorangehende Vorhersageaktion (R1) stattfindet. Dieser könnte die erhöhte Fehlerrate bei der Kombination *h - S (S - passt nicht)* erklären: Dadurch dass die Probanden bei der Vorhersage diese Taste gedrückt haben, neigen sie dazu, auch bei der Reaktion

auf den Zielstimulus diese Taste zu drücken. Wenn jedoch tatsächlich eine Bahnung durch die vorangehende Reaktion R1 für die Erhöhung der Fehlerrate verantwortlich ist, dann würde auch in der Aufgabenversion *Vergleichen plus* eine erhöhte Fehlerrate erwartet werden, denn bei dieser Aufgabenversion fand ebenfalls eine Reaktion R1 auf den ersten Reiz statt. Ein gleichermaßen starker Anstieg der Fehlerrate bei der Kombination *h - S (S - passt nicht)* konnte in dieser Aufgabenversion allerdings nicht beobachtet werden. Deswegen scheint eher der Misserfolg der Vorhersage der Grund für den Anstieg der Fehlerrate zu sein.

Im Gegensatz dazu wurden die Reaktionszeiten nicht von dem Erfolg der Vorhersage beeinflusst: Die Reaktionszeiten bei der Antwort - *passt nicht* waren in den Rateaufgaben nicht länger als in den Vergleichsaufgaben. Darüber hinaus waren in Vergleichsaufgaben die Antworten nach seltenen Zielreizen bei der abhängigen Reaktion - *passt* sogar kürzer als bei - *passt nicht*, in den Rateaufgaben konnte dies jedoch nicht beobachtet werden (siehe Abbildung 9).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Reiz und Reaktion einen größeren Einfluss auf die Reaktionszeiten und Fehlerraten zu haben scheinen als die Erwartungen darauf, welcher Reiz auftreten wird. Das könnte einen weiteren Hinweis für die These liefern, dass in Rateaufgaben auch für die Ausprägung der P3-Amplitude die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Reizen und Reaktionen bedeutender sind als der Erfolg beziehungsweise Misserfolg der Vorhersage.

5 Zusammenfassung

Die P3 ist ein elektrisches Potential, das ca. 300 ms nach einem Reiz (Stimulus) im EEG sichtbar wird. In Vorstudien (Verleger et al., 2014) wurde die Bedeutung der P3b mithilfe der „Stimulus-Response-Link-Hypothese“ (S-R-Link-Hypothese) erklärt. Diese Hypothese geht davon aus, dass die P3b die Aktivierung einer vorhandenen Reiz-Reaktions-Verbindung anzeigt. Unklar ist, wie diese Hypothese erklären kann, warum auch in Rateaufgaben große P3-Amplituden evoziert werden können, da nach dem Erscheinen des zu erratenden Reizes keine externe Reaktion in der Aufgabe gefordert wird, die mit dem Reiz verknüpft werden könnte.

Die Idee der vorliegenden Arbeit ist, dass auf den zu erratenden Reiz durchaus eine interne Reaktion erfolgt, nämlich die Entscheidung, ob die Vorhersage richtig oder falsch war. Gemäß dieser Hypothese würde vermutlich das Vergleichen von zwei Stimuli ähnliche Effekte auf die P3-Amplitude haben, da hier die Antwort auf das zweite Ereignis ebenfalls davon abhängt, ob der erste Stimulus mit dem zweiten übereinstimmt. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden in unserem Experiment Vergleichs- und Rateaufgaben gegenübergestellt. Diese unterscheiden sich in der Art der ersten Ereignisse, in Rateaufgaben ist nämlich das erste Ereignis eine Reaktion in Vergleichsaufgaben ist der Reiz das erste Ereignis.

Um den Einfluss der Häufigkeit des ersten und zweiten Ereignisses in den verschiedenen Aufgabentypen zu untersuchen, wurden zwei Reize mit unterschiedlicher Auftretenswahrscheinlichkeit – der eine häufig der andere selten – gegeben. Durch die unterschiedlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten des ersten und zweiten Ereignisses ergaben sich vier verschiedene Kombinationen des ersten und zweiten Ereignisses, deren Effekte in den unterschiedlichen Versionen der Rate- und Vergleichsaufgaben miteinander verglichen wurden.

Um die Aufgaben noch ähnlicher zu machen und somit besser miteinander vergleichen zu können, wurden zwei weitere Aufgabenversionen von der Rate- und Vergleichsaufgabe gestellt. In der erweiterten Version der Rateaufgabe wurde wie in der Vergleichsaufgabe ein Reiz durch Wiederholung der Reaktion gegeben. In der erweiterten Version der Vergleichsaufgabe wurde eine weitere Reaktion nach dem ersten Reiz gefordert. Als zweites Ereignis erschien in allen vier Aufgabenversionen der zweite Reiz. Nach dem zweiten Ereignis wurde in allen Aufgabenversionen mittels Tastendruckes eine externe Reaktion gefordert. Während die Probanden die Aufgaben bearbeiteten, wurde ein EEG abgeleitet und

anschließend analysiert. Um signifikante Unterschiede durch die Faktoren Aufgabentyp, Aufgabenversion, Häufigkeiten des ersten und zweiten Ereignisses bei der Amplituden-Größe der P3, der Fehlerrate und der Antwortzeit zu ermitteln, wurden Varianzanalysen durchgeführt. Wie erwartet zeigte die Häufigkeit des ersten und des zweiten Ereignisses ähnliche Effekte auf die P3-Amplitude in beiden Aufgabentypen. Dies unterstützt die Hypothese, dass die P3 auch in Rateaufgaben die Reaktivierung einer Reiz-Reaktions-Verbindung widerspiegelt. Anders als erwartet waren die P3-Amplituden in den Rateaufgaben größer als in den Vergleichsaufgaben. Über eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen lässt sich spekulieren. Eine wahrscheinliche Vermutung wäre, dass die Zielreize in Rateaufgaben einen größeren motivierenden Wert haben, dadurch dass Übereinstimmung durch die eigene Vorhersage und nicht durch einen computergenerierten Reiz erreicht wurde. Allerdings steht diese Theorie zwar nicht im direkten Widerspruch zur Reiz-Reaktions-Hypothese, hat aber auch keinen direkten Bezug zu ihr.

Nach seltenen Zielstimuli traten deutlich mehr Fehler auf als nach häufigen Zielreizen. Auch die Reaktionszeiten wurden deutlich durch die Auftretenswahrscheinlichkeit des ersten Ereignisses beeinflusst. Insgesamt scheinen die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Reiz und Reaktion einen größeren Einfluss auf die Reaktionszeiten und Fehlerraten zu haben als die Erwartungen darauf, welcher Reiz auftreten wird. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass in Rateaufgaben für die Ausprägung der P3-Amplitude die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Reizen und Reaktionen bedeutender ist als der Erfolg beziehungsweise Misserfolg der Vorhersage. Insgesamt scheint die Ausprägungen der P3-Amplitude in Rateaufgaben wesentlich von der Auftretenswahrscheinlichkeit der Ergebniskombinationen abzuhängen.

6 Literaturverzeichnis

Begleiter, H., Porjesz, B., Chou, C. L., Aunon, J.I. (1983) P3 and Stimulus Incentive Value, Psychophysiology, 20, 95-101

Bellebaum, C., Polezzi, D., Daum, I. (2010) It is less than you expected: The feedback-related negativity reflects violations of reward magnitude expectations, Neuropsychologia, 48, 3343–3350

Berger, H. (1929) Über das Elektroencephalogramm des Menschen. Archiv für Psychiatrie Nervenkrankheiten, 87, 527-570

Beste, C., Dziobek, I., Hielschier, D., Willemssen, R., Falkenstein, M. (2009) Effects of stimulus-response compatibility an inhibitory processes in Parkinson´s disease, European Journal of Neuroscience, 29, 855-860

Birbaumer, N. und Schmidt, R. F. (2010) Synaptische Erregung und Hemmung: In Biologische Psychologie, Springer Medizin, Heidelberg/ Berlin, 2. Aufl, 217-241

Birbaumer, N. und Schmidt, R. F. (2010) Methoden der biologischen Psychologie In: Biologische Psychologie, Springer Medizin, Heidelberg/ Berlin, 2. Aufl, 459-483

Brunia, C.H.M. (2003) CNV and SPN: Indices of anticipatory behavior. In: Jahanshahi M, Hallett M, (Hrsg): The Bereitschaftspotential. Movement-Related Cortical Potentials, 207-227, Kluwer, Dordrecht

Brunia, C.H.M., van Boxtel, G. J. M., Böcker, K. B. E. (2012) Negative slow waves an indices of anticipation: The Bereitschaftspotential, the contingent negative variation, and the stimulus preceding negativity. In: The Oxford Handbook of ERP Components, 189-207, Oxford University Press, New York

De Jong, R. (1993) Multiple bottlenecks in overlapping task performance. Journal of Experimental Psychology.Human Perception and Performance,19, 965-980

Devrim-Üçok, M., Keskin-Ergen Y., Üçok A. (2006) Novelty P3 and P3b in first-episode schizophrenia and chronic schizophrenia, Progress Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry, 30, 1426-1434

Dien, J., Spencer, M., Donchin, E. (2004) Parsing the late positive complex: mental chronometry and the ERP components that inhabit the neighborhood of the P300. Psychophysiology, 41, 665-678

Donchin, E. (1981) Surprise!...Surprise? Psychophysiology, 18, 493-513

Donchin, E. und Coles, M. G. H. (1988) Is the P300 component a manifestation of context updating?. Behavioral and Brain Sciences, 11, 357-374

Donchin, E., Spencer, K., Dien, J. (1997) The varieties of deviant experience: ERP manifestations of deviance processors. In: Van Boxtel, G. und Böcker K.: Brain and Behavior: Past, Present, and Future. 1. Auf., 67-91, Tilburg University Press, Tilburg

Duncan-Johnson, C.C. und Donchin, E. (1977) On quantifying surprise: The variation of event-related potentials with subjective probability. Psychophysiology,14, 456-467

Flores, A., Münte, T.F., Doñamayor, N. (2015) Event-related EEG responses to anticipation and delivery of monetary and social reward. Biological Psychology, 109, 10-19

Gaeta, H., Friedman D., Hunt G. (2003) Stimulus characteristics and task category dissociate the anterior and posterior aspects of the novelty P3. Psychophysiology, 40, S. 198-208

Hoth, M. und Rettig, J. (2016) Grundlagen der Neurophysiologie.In:
Behrends, J., Bischofberger, J., Deutzmann, R., Heimo, E., Frings,M., Grissmer, S., Kurtz, A., Leipziger, J., Müller, F., Pedain, C., Wagner, C., Wischmeyer, E.: Duale Reihe Pysiologie, 3. Aufl., 33-64, Thieme, Stuttgart

Kamp, S.M., Brumback, T., Donchin, E. (2013) The component structure of ERP subsequent memory effects in the Von Restorff paradigm and the word frequency effect in recall. Psychophysiology, 50,1079-1093

Kok, A. (2001) On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. Psychophysiology, 38, 557-577

Krozovska, M. (2014) EEG und evozierte Potenziale. In : Neurologie Basics. 4.Aufl., 42-43,Elsevier Urban und Fischer, München

Luck, S. J. und Kappenman, E. (2012), ERP components and selective attention. In: The Oxford Handbook of ERP Components, 295-327, Oxford University Press, New York

Luck, S. J. (2014) A Broad Overview of the Event-Related Potential Technique In: Event - Related Potential Technique,2 Aufl., 3-34, A Bradford Book, The MIT Press, Massachusetts

Luck, S. J. (2014) Event-Related Potential Technique, Overview of Common ERP Components In: Event - Related Potential Technique, 2 Aufl., 71-118, A Bradford Book, The MIT Press, Massachusetts

Mathalon D., Ford J., Rosenbloom M., Pfefferbaum A. (2000) P300 Reduction and Prolongation with Illness Duration in Schizophrenia, Biol Psychiatry 2000,47: 413-427

Nieuwenhuis, S., Aston-Jones, G., Cohen, J.D. (2005) Decision making, the P3, and the locus coeruleus norepinephrine system. Psychological Bulletin, 131, 510-532

O'Connell, R. G., Dockree, P. M. , Kelly, S. P. (2012) A supramodal accumulation-to-bound signal that determines perceptual decisions in humans. Nature Neuroscience, 12,1729-1737

Pfefferbaum, A., Ford, J.M., Weller, B.J., Kopell, B.S. (1985) ERPs to response production and inhibition. Electoencephalography an Clinical Neurophysiology, 60, 423-434

Polich, J. (2007) Updating P300: An integrative theory of P3a an P3B. Clinical Neuropyhsiology, 118, 2128-2148

Ritter W., Vaughan H. und Costa L. (1968) Orienting and habituation to auditory stimuli: a study of short term changes in average evoked responses. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 25, 550-556

Silbernagel, S. und Despopoulos, A. (2007) Zentralnervensystem und Sinne. In: Taschenatlas Physiologie, 7. Aufl, 312-376,Georg Thieme Verlag,Stuttgart

Squires, K.C., Hillyard, S.A., Lindsay, P.H. (1973) Vertex potentials evoked during auditory signal detection: Relation to decision criteria. Perception & Psychophysics 14, 265-272

Sutton, S., Baren, M., Zubin, J., John, E.R. (1965) Evoked potentials correlates of stimulus uncertainty. Science,150, 1187-1188

Tueting, P., Sutton, S., Zubin, J. (1970) Quantitative evoked potential correlates of the probability of events. Psychophysiology, 7, 385-394

Verleger, R. (2008) P3b: Towards some decision about memory. Clinical Neurophysiology 119, 968-970

Verleger, R. (2020) Effects of relevance and response frequency on P3b amplitudes: Review of findings and comparison of hypotheses about the process reflected by P3b. Psychophysiology, 57, 1-22

Verleger, R., Asanowicz, D., Werner, L. und Śmigasiewicz, K. (2015a) Biased odds for head or tail: Outcome-evoked P3 depends on frequencies of guesses. Psychophysiology, 52, 1048-1058

Verleger, R., Baur, N., Metzner, M. F., Śmigasiewicz, K. (2014) The hard oddball: Effects of difficult response selection on stimulus-related P3 and on response-related negative potentials. Psychophysiology, 51, 1089-1100

Verleger, R., Grauhan, N., Śmigasiewicz, K. (2016b) Effects of response delays and of unknown stimulus-response mappings on the oddball effect on P3. Psychophysiological, 53, 1858-1869

Verleger, R., Hamann, L. M., Asanowicz, D., Śmigasiewicz, K. (2015b) Testing the S-R link hypothesis of P3b: The oddball effect on S1-evoked P3 gets reduced by increased task relevance of S2. Biological Psychology, 108, 25-35

Verleger, R., Jaśkowski und P., Wascher, E. (2005) Evidence for an integrative role of P3b in linking reaction to perception. Journal of Psychophysiology, 19, 165-181

Verleger, R. und Śmigasiewicz, K. (2016a) Do Rare Stimuli Evoke Large P3s by Being Unexpected? A Comparison of Oddball Effects Between Standard-Oddball and Prediction-Oddball Tasks. Advances in cognitive Psychology, 12, 88-104

Verleger, R., Siller, B., Ouyang, G., Śmigasiewicz, K. (2017) Effects on P3 of spreading targets and response prompts apart. Biological Psychology, 126, 1-11

Walter, W.G., Cooper, R., Aldrige, 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

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Proband sitzt auf einem Sessel 1,3 m von einem 17- Zoll Röhren Bildschirm entfernt..... 12
Abbildung 2: Elektroden verbunden mit dem Verstärker..... 12
Abbildung 3: Anbringung der Elektroden im Gesicht..... 13
Abbildung 4: Anbringen der Elektrodenpaste..... 13
Abbildung 5: Schema für Rateaufgaben 15
Abbildung 6: Schema für Vergleichsaufgaben 16
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Aufgabenstruktur..... 18
Abbildung 9: Prozentuale Häufigkeit der verschiedenen Ereigniskombinationen . 22
Abbildung 10: Reaktionszeit der verschiedenen Ereigniskombinationen..... 25
Abbildung 11: Prozentualer Anteil der Fehler bei den unterschiedlichen Ereigniskombinationen. 28
Abbildung 12: h-H (H - passt)..... 31
Abbildung 13: h-S (S - passt nicht)..... 31
Abbildung 14: s-H (H - passt nicht) 32
Abbildung 15: s-S (S - passt) 32
Abbildung 16: Durchschnittliche P3-Amplituden für die verschiedenen Ereigniskombinationen 33
Abbildung 17: Ereigniskorrelierte Potentiale vor dem zweiten Ereignis 35

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Häufigkeiten der unterschiedlichen Ereigniskombinationen in den Rate- und in den Vergleichsaufgaben. 22
Tabelle 2: Reaktionszeiten auf S2 Ergebnisse der Varianzanalyse 24
Tabelle 3: Arkussinus transformierte Fehler, durch Gebrauch des falschen Fingers bei der Antwort auf S2 27
Tabelle 4: Amplitude der gemittelten Wellenform der P3 (Position CPz,Cz,Pz,CP1 und CP2) 33

9 Ethikantrag

Universität zu Lübeck

Medizinische Fakultät - Der Vorsitzende der Ethikkommission

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

Herrn
Prof. Dr. med. Verleger
Klinik für Neurologie

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 [redacted] 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

We

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)

10 Danksagung

An dieser Stelle würde ich mich gerne bei einigen Personen bedanken. Zunächst möchte ich mich gerne bei Herrn Professor Thomas Münte bedanken, für die Bereitstellung der Räumlichkeiten und Geräte zur Durchführung der Experimente und die Möglichkeit die Dissertation am Institut für Neurologie durchzuführen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Rolf Verleger für die Bereitstellung des Themas die große Unterstützung bei der Auswertung und Interpretation der Daten, sowie für die zahlreichen Hilfestellungen und Korrekturen beim Verfassen der Dissertation.

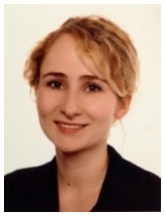
Sehr dankbar bin ich zudem Frau PD Dr. Anna Cirkel für die kurzfristige Übernahme der Betreuung der Dissertation.

Weiterhin möchte ich mich bei Frau Dr. Kamila Śmigasiewicz bedanken, für die Einarbeitung im EEG Labor und die Unterstützung bei der Literaturrecherche.

Weiterer Dank gebührt Leoni Baumung und Ulrike Grave für die Hilfe bei der Vorbereitung und Aufzeichnung der Experimente, sowie allen Probanden, die an dem Experiment teilgenommen haben.

Dankbar bin ich außerdem meiner Familie für die Unterstützung und das Verständnis bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit.

11 Lebenslauf



Name: Stephanie Cäsar

Publikationen:

Verleger R., Cäsar S., Siller B., Śmigasiewicz K., (10/2017) On why targets evoke P3 components in prediction tasks: Drawing an analogy between prediction and matching tasks, Frontiers in Human Neuroscience, 11, Artikel 497.

Seit 2020	Assistenzärztin für Gynäkologie und Geburtshilfe im Marienhospital, Aachen
2018 - 2019	Assistenzärztin für Gynäkologie und Geburtshilfe im St. Antonius Hospital, Eschweiler
07/2018	Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
05/2017 - 04/2018	Praktisches Jahr Aarhus University in Dänemark, (Erasmus Plus Stipendium), RWTH Aachen und Sana Klinik Lübeck
02/ 2015 - 07/ 2015	Auslandssemester an der Universität Parma, Italien (Erasmus Stipendium)
2014 - 2018	Studium der Humanmedizin an der Universität zu Lübeck
03/2014	Physikum der Humanmedizin an der Georg August Universität Göttingen
2013 - 2014	Studium der Humanmedizin an der Georg August Universität Göttingen

Zeitraum der Dissertation:

11/2020	Fertigstellung der Dissertation
November 2015 - März 2016	Experimentelle Untersuchungen für die Dissertation