

Aus der Klinik für Neurologie

der Universität zu Lübeck

Direktor: Professor Dr. med. Thomas F. Münte

---

**Evozierte Potentiale im EEG: Der Einfluss der Vorhersage auf die P3-  
Potentialkomponente, untersucht in einem Glücksspielexperiment**

INAUGURALDISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde der

**Universität zu Lübeck**

- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von

Lucas Werner

aus Halle (Saale)

Lübeck 2015

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

2. Berichterstatter/Berichterstatterin: Professor Dr. med. Jürgen Sperner

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2017

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 19.07.2017

Promotionskommission der Sektion Medizin

## Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis .....	1
2	Einleitung .....	3
3	Experiment 1 .....	12
3.1	Vorbemerkung.....	12
3.2	Material und Methoden .....	12
3.2.1	Versuchsaufbau .....	12
3.2.2	Probanden.....	13
3.2.3	EEG-Ableitung .....	13
3.2.4	Versuchsdurchführung .....	14
3.2.5	Datenauswertung .....	16
3.3	Ergebnisse .....	18
3.3.1	Verhalten der Versuchspersonen bei der Vorhersage .....	18
3.3.2	Reaktionszeiten.....	19
3.3.3	Ereigniskorrelierte Potentiale .....	19
3.3.4	P3-Amplituden.....	21
3.3.5	Korrelation zwischen Lösungshäufigkeit und P3-Amplituden .....	25
3.4	Diskussion Experiment 1.....	25
4	Experiment 2.....	27
4.1	Vorbemerkung.....	27
4.2	Material und Methoden .....	27
4.2.1	Probanden.....	27
4.2.2	Versuchsdurchführung .....	28
4.2.3	Datenauswertung .....	28
4.3	Ergebnisse .....	28
4.3.1	Verhalten der Versuchspersonen bei der Vorhersage .....	28
4.3.2	Reaktionszeiten.....	29
4.3.3	Ereigniskorrelierte Potentiale .....	30
4.3.4	P3-Amplituden.....	32
4.3.5	Korrelation zwischen Lösungshäufigkeit und P3-Amplituden .....	34
4.4	Diskussion.....	34
5	Diskussion beider Experimente.....	35
6	Zusammenfassung.....	43

7	Literaturverzeichnis.....	44
8	Abbildungsverzeichnis .....	49
9	Ethikantrag.....	50
10	Danksagung.....	51
11	Lebenslauf .....	52

## 1 Abkürzungsverzeichnis

ADHS *Aufmerksamkeitsdefizit- und Hyperaktivitätssyndrom*

ANOVA *Analysefaktoren für die Varianzanalyse*

cm *Centimeter (Einheit)*

EEG *Elektroenzephalogramm*

EKP *ereigniskorrelierte Potentiale*

EOG *Elektrookulogramm*

h *häufiger Buchstabe als Vorhersage*

H *häufiger Buchstabe als Ergebnis*

fMRT *funktionelle Magnetresonanztomographie*

FRN *feedback-related negativity = Feedback assoziierte Negativität*

LC *Locus coeruleus*

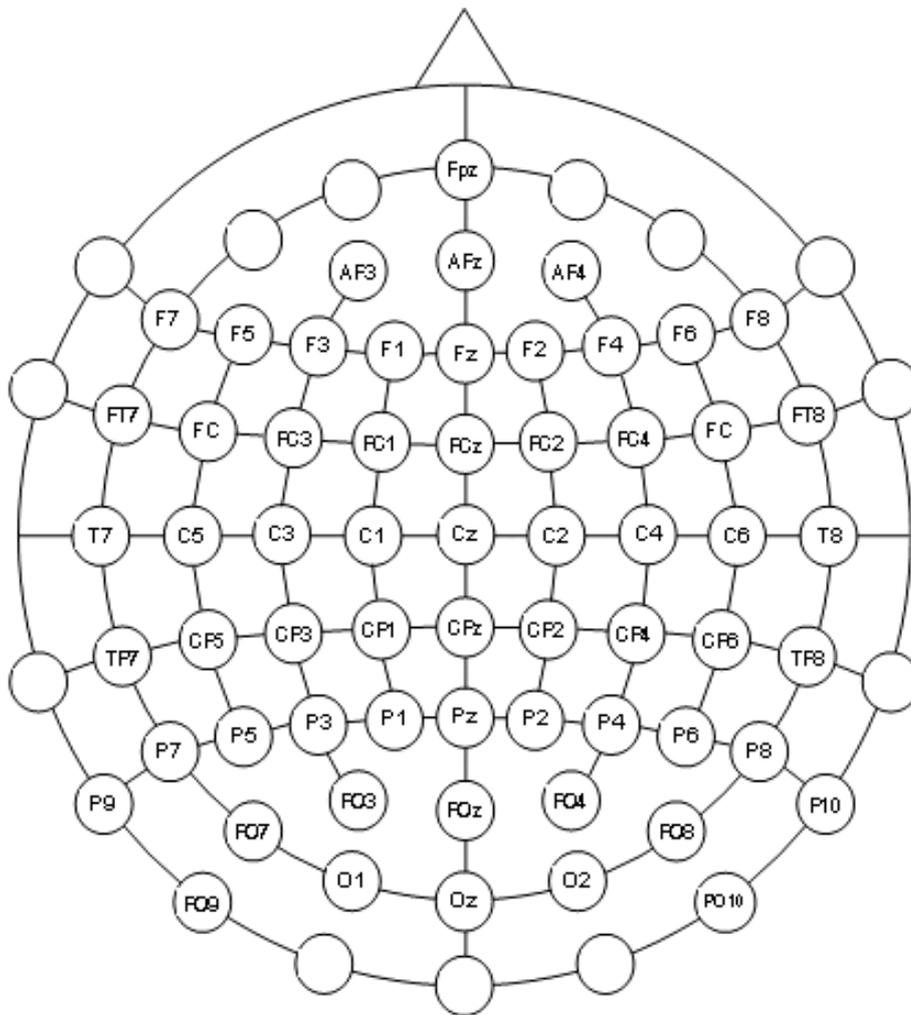
ms *Millisekunde (Einheit)*

s *seltener Buchstabe als Vorhersage*

S *Siehe seltener Buchstabe als Ergebnis*

SOA *Stimulus onset asynchronies = asynchrones Erscheinen von Stimuli*

SPN *Stimulus preceding negativity = Negativität vor dem Erscheinen eines Stimulus*



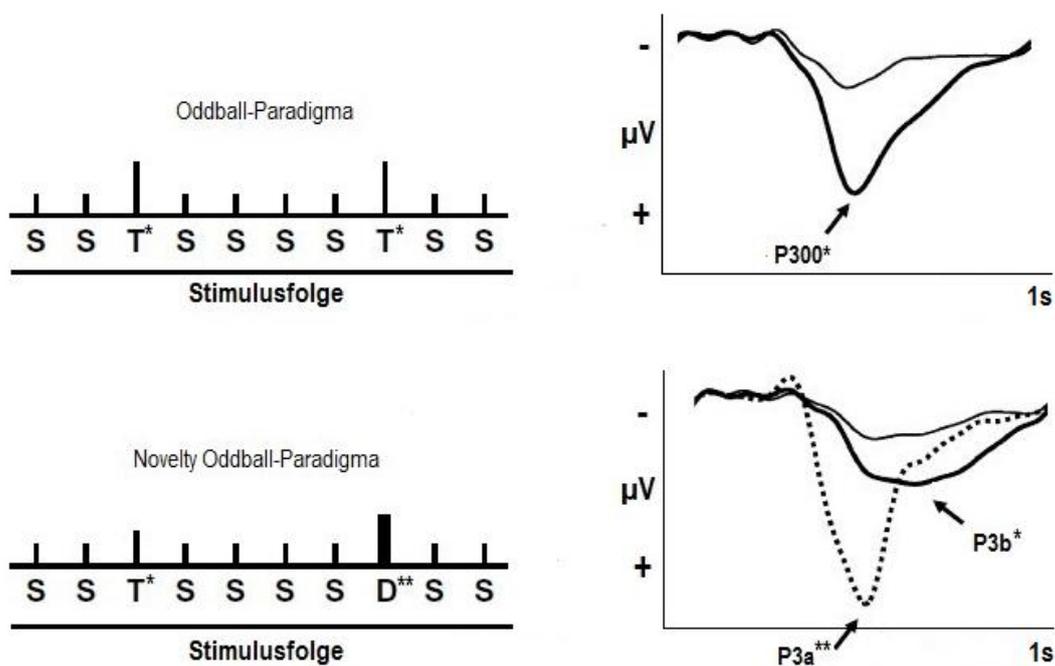
*Elektrodenpositionen und deren Bezeichnungen  
(modifizierte Abbildung von [www.easycap.de](http://www.easycap.de))*

## 2 Einleitung

Bis zu dem Zeitpunkt, als es der Mensch verstand, sich die Elektrophysiologie zu Nutze zu machen, galt es als nicht möglich, das Gehirn am Lebendigen zu studieren und über die inneren Prozesse Erkenntnisse zu gewinnen. Erst im Jahre 1929 konnte der Psychiater und Neurologe Hans Berger von der erfolgreichen Ableitung eines Elektroenzephalogramms (EEG) am Menschen berichten (Stone, Hughes, 2013). Das EEG ist die Darstellung eines elektrischen Spannungsverlaufes in der Zeit und bildet dabei spontane und ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) ab (Seifert, 2005). Vor allem die ereigniskorrelierten Potentiale werden in der neurokognitiven Forschung verwendet, um Fragen nach Wahrnehmung und Aufmerksamkeit zu studieren (Woodman, 2010). EKP können vor, während oder nach bestimmten Stimuli gemessen werden. Sie repräsentieren mehrheitlich postsynaptische Potentiale, die durch die Summierung der Dipole einer Vielzahl von Zellen an der Kopfhaut gemessen werden können (Luck, 2005). Die EKP sind dabei durch ihre Polarität (negativer oder positiver Ausschlag) und ihre Amplitude, ihr zeitliches Auftreten (Latenz) und ihre Topographie charakterisiert (Woodman, 2010). Ein viel studiertes und vor allem diskutiertes EKP ist die P3, erstbeschrieben durch Sutton (Sutton u. a., 1965), deren Verständnis theoretischer Überbau der vorliegenden Arbeit ist.

Die P3 ist die dritte positive Welle eines ereigniskorrelierten Potentials (Hruby, Marsalek, 2002), die mit einer Latenz von 280 bis 600 ms auftritt (Seifert, 2005) und ein Amplitudenmaximum über Pz (Paehge, 2006) aufweist. Das klassische Experiment zur Erzeugung der P3 ist das Oddball-Paradigma. Hierbei wird einer Versuchsperson eine Serie von gleichen Reizen dargeboten. In den gängigen Versuchsaufbauten ist der Reiz akustisch, visuell oder somatosensorisch. Die Abfolge dieser gleichen Reize wird durch einen gelegentlichen, also seltenen, Zielreiz (target) unterbrochen. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es, beispielsweise durch gedankliches Mitzählen oder das Drücken eines Knopfes den Zielreiz zu erfassen (Hruby, Marsalek, 2002). Nach dem Zielreiz tritt dann reproduzierbar die P3 auf. So gut man die Eigenschaften der P3 beschreiben kann, desto schwerer tut sich die Wissenschaft mit ihrer Bedeutung. Zum Verständnis der Diskussion ist das Wissen um die Unterteilung der P3 in zwei Subkomponenten wichtig. Unter einer Komponente versteht man in diesem Kontext das elektrophysiologische Korrelat eines psychischen Vorgangs (Seifert, 2005), in der EEG-Kurve durch einen lokalen Extremwert dargestellt. Die P3 wird in zwei Subkomponenten unterteilt, die P3a und P3b genannt werden und die voneinander verschiedene physikalische Eigenschaften aufweisen. So unterscheiden sie sich in ihrer Topographie und hinsichtlich ihrer Latenz. Das Amplitudenmaximum der P3a findet sich frontozentral, das der P3b kann parietal abgeleitet werden.

Die P3a, die synonym „Novelty P3“ genannt wird, tritt mit einer Latenz von 250 bis 400 ms nach einem Reiz auf, die P3b etwas später nach ungefähr 300 bis 600 ms (Debener u. a., 2005). Außerdem gab es Versuche mit einem modifizierten Oddball-Paradigma, bei dem neben dem Standardreiz und dem Zielreiz ein dritter, unangekündigter Reiz als Distraktor hinzugefügt wurde. Durch Variation dieses „Novelty Oddball-Paradigmas“ ließ sich belegen, dass sich die P3a, anders als die P3b, durch die Reizcharakteristik beeinflussen lässt und habituieren kann, die P3b aber vor allem durch die Aufgabenrelevanz (in Form des Zielreizes) beeinflusst wird (Gaeta u. a., 2003).



*Modifizierte Abbildung aus Polich, 2007: Einer Versuchsperson wird eine Serie von Stimuli, z. B. eine Abfolge von Tönen oder Bildern, präsentiert. Die Zeit zwischen den Stimuli beträgt für gewöhnlich 1 – 2 Sekunden. In dieser Abfolge erscheint ein Stimulus häufig (S = Standardreiz) und ein Stimulus selten (T\* = target = Zielreiz). Dieser Versuchsaufbau heißt Oddball-Paradigma (linke obere Abbildung). Die Versuchsperson ist angehalten, auf den Zielreiz zu reagieren (z. B. durch einen Knopfdruck). Währenddessen wird ein EEG abgeleitet. Erscheint ein Zielreiz, folgt daraufhin regelhaft mit einer Latenz von 280 bis 600 ms eine große P3-Amplitude (rechte obere Abbildung). Erscheint in der Reizabfolge zusätzlich ein dritter unbekannter Reiz (D\*\* = Distraktor), nennt sich der Versuchsaufbau Novelty Oddball-Paradigma (linke untere Abbildung). Der Distraktorstimulus löst eine P3a aus, der Zielreiz löst eine P3b aus (rechte untere Abbildung).*

Hinzu kommt, dass mit Hilfe von Untersuchungen an Patienten mit Hirnläsionen (Friedman u. a., 2001) und mittels Kombination von EEG und fMRT (Bledowski, 2004) gezeigt werden konnte, dass die P3a und die P3b durch unterschiedliche neuronale Zentren generiert werden.

All diese Unterscheidungsmerkmale lassen die Schlussfolgerung zu, dass den beiden Subkomponenten unterschiedliche neurokognitive Funktionen zukommen (Gaeta u. a., 2003). Die P3a wird übereinstimmend als Ausdruck der Aufmerksamkeit gegenüber einem neuen Reiz verstanden (Polich u. a., 2007; Verleger u. a., 2008; Wronka u. a., 2013). Über die Funktion der P3b hingegen ist man sich uneins.

Bevor näher auf die unterschiedlichen Positionen zur Bedeutung der P3b eingegangen wird, soll noch in einem kurzen Exkurs veranschaulicht werden, warum es lohnenswert ist, das Verständnis dieses EKP zu vervollständigen. So gibt es einige vielversprechende Ansätze, die die Nutzung der P3 für einen klinischen Kontext erproben, von denen einige im Folgenden exemplarisch erläutert werden.

Es werden unter anderem Therapieansätze für das Aufmerksamkeitsdefizit- und Hyperaktivitätssyndrom (ADHS) untersucht, einer, laut Bundesärztekammer, Gruppe von Störungsbildern mit verschiedenen Grundmerkmalen. Dazu zählt das Unvermögen, eine Beschäftigung ausdauernd durchzuführen und die Tendenz, Tätigkeiten zu wechseln, bevor sie zu Ende gebracht wurden. Die betroffenen Personen, vornehmlich pädiatrische Patienten, werden in ihrem Verhalten als unruhig und impulsiv beschrieben, was sich durch abrupte motorische und verbale Aktionen äußert, die nicht in den sozialen Kontext passen. Bekanntlich stellt die Kombination aus psychoedukativer und pharmakologischer Therapie mit Methylphenidat den Grundpfeiler der Behandlung dar (Bundesärztekammer, 2006: Stellungnahme „ADHS“ Langfassung). Wünschenswert ist besonders im Hinblick auf das Patientengut eine Reduktion des Medikamenteneinsatzes. Eine Idee ist die Nutzung sogenannter „Brain-Computer-Interfaces“, bei denen Personen während einer EEG-Aufzeichnung beispielsweise in einem virtuellen Klassenraum Aufgaben erledigen (Rohani u. a., 2014). Da die P3a wie erwähnt Parameter der Aufmerksamkeit ist (Polich, 2007), ließe sich so im Sinne eines Biofeedbacks neben der Erfüllung der Aufgaben auch die P3 in einem solchem Szenario belohnen, womit durch Training eines der Kerndefizite des ADHS verringert werden könnte.

Die P3 wird auch im Rahmen der Autismusforschung eingesetzt, da sie eine objektive Messgröße unter vielen, eher deskriptiven, Verhaltensdaten ist. Präsentiert man sich altersgerecht entwickelnden Kindern Fotografien von bekannten und unbekannt Personen, so ist die P3-Amplitude während der Betrachtung der vertrauten Gesichter größer. Dieser Effekt zeigt sich bei autistischen Kindern nicht, obwohl auch sie zwischen bekannten und nicht bekannten Personen unterscheiden können. Dahinter wird eine im Vergleich zum nicht autistischen Kind veränderte Ressourcenallokation der Aufmerksamkeit vermutet. Im Zuge einer Gesichtserkennung werden

verschiedene Informationen integriert. Zu diesen zählen persönliche Informationen, Emotionen und der Bekanntheitsgrad des Gegenüber. Unterzieht man die Autismuspatienten verschiedenen Übungen zur Verbesserung ihrer sozialen Fähigkeiten, kann man die P3 als nichtinvasive Messgröße nutzen, um den Effekt der Übungen zu evaluieren (Gunji u. a., 2013). Auch wurde die P3b als Parameter eingesetzt, um den Erfolg von transkranieller Magnetstimulation bei autistischen Patienten zu untersuchen. Diese Stimulation soll die kortikale Inhibition verbessern, die bei Autisten für defizitär gehalten wird. Die Latenz der P3b verkürzt sich in der betreffenden Untersuchung, was als effektiveres Verarbeiten von irrelevanten Stimuli gewertet wird (Casanova u. a., 2012).

Bei beiden vorangegangenen psychiatrischen Krankheitsbildern, Störungen aus dem Autismusspektrum und ADHS, gibt es Überlagerungen der Symptome. Deshalb gibt es Vergleichsstudien, die die P3 einsetzen, um Aufschluss über die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Entitäten zu bekommen und um klinische Tests zu entwickeln (Sokhadze u. a., 2012; Tye u. a., 2014).

Einen weiteren möglichen Einsatzbereich stellen die Schizophrenien dar. Diese Denk- und Wahrnehmungsstörungen gehen mit inadäquaten oder verflachten Affekten und wahnhaften und halluzinatorischen Elementen einher (Deutsches Institut für Dokumentation, 2015). Wie bereits mehrfach publiziert, ist die Minderung der P3b-Amplitude eine der physiologischen Abnormitäten der Schizophrenie (z. B. Bramon u. a., 2008). Daher kann die P3 als Biomarker dienen. Konkreter kann sie den Übergang von einem Prodromal- oder Frühstadium in eine psychotische Schizophreniephase mit relativ hoher Sensitivität vorhersagen. Weiter noch scheint es möglich, anhand des Grades der Minderung der Amplitude die relative Nähe des Krankheitsschubes zu prognostizieren. So könnten mittels der P3 gefährdete Patienten besser beurteilt werden (Turetsky u. a., 2015).

Es lässt sich feststellen, dass die EKP im Allgemeinen und die P3 im Speziellen das Potential haben, neurologische und kognitive Defizite zu detektieren (Hruby, Marsalek, 2002). Das umfassende Verständnis des funktionalen Hintergrundes der P3 ist also ein sinnvolles Ziel, weil es als Werkzeug im Rahmen der Forschung so weitverbreitet ist und dementsprechend vollständig verstanden werden sollte und weil es verschiedene klinische Einsatzfelder gibt.

Offen bleibt, welche neurokognitive Funktion der zweiten Subkomponente, der P3b, zukommt. Der über lange Jahre am meisten etablierte Ansatz ist unter dem Namen „Context Updating Hypothesis“ bekannt geworden. Diese Hypothese wurde maßgeblich durch Donchin und Polich

geprägt und sieht die P3b als Korrelat für einen strategischen Prozess, der abhängig ist von der subjektiven, also wahrgenommenen, Häufigkeit eines Reizes auf der einen Seite und von der Relevanz der Aufgabe für ein Individuum auf der anderen Seite (Donchin, 1981). Ist der Reiz (subjektiv) selten und die Relevanz hoch, entsteht eine große P3. Nach dieser Vorstellung stellt die P3 eine Überarbeitung des bisher im Arbeitsgedächtnis vorhandenen Schemas für die Reizumgebung dar. Dieses „Schema“, auch Repräsentation oder neuronales Modell genannt, ist als Information zu verstehen, welche im Kopf einer Person über die Reizumgebung existiert. Wird nun ein Reiz wahrgenommen, findet ein Evaluationsprozess statt, der bewertet, ob das Schema überarbeitet werden muss (beispielsweise ein neuer oder seltener Ton in einer Reihe von gleichen Tönen) oder nicht (beispielsweise wenn ein Ton dem Vorherigen gleicht) (Kamp u. a., 2013). Die P3 wird also entscheidend von dem Grad beeinflusst, wie sehr ein vorhandenes Schema einer Revision bedarf (Polich, 2007). Damit ist die Abhängigkeit der P3-Ausprägung vom Reiz oder Stimulus ein zentrales Element der Theorie.

Ein anderer, erweiterter Ansatz wurde von Verleger entwickelt, nach dem neben dem Reiz auch die Antwort auf oder die Entscheidung nach einem Reiz einen integralen Teil der P3b darstellt. Die P3b funktioniert als eine Brücke zwischen der Reizverarbeitung und der Antwortprozessierung (Verleger u. a., 2005). Wie aktiv diese Verbindung oder Brücke zwischen Reiz und Reaktion ist, entscheidet nach diesem Ansatz, wie die P3b ausfällt. Ist die Verbindung bereits aktiv, wie im Oddball-Paradigma die Verbindung zwischen dem häufigen Reiz und der Reizantwort, fällt die P3b klein aus. Erscheint der seltene Reiz, dessen Verbindung zur Antwort reaktiviert werden muss, folgt eine große P3b-Amplitude als Ausdruck der Reaktivierung. Die Theorie für diese Bedeutung der P3b wurde Stimulus-Response Link Hypothese genannt (S-R Link Hypothese).

Für die S-R Link Hypothese wird unter anderem mit der nicht exklusiven Abhängigkeit der P3b vom Stimulus argumentiert. Tatsächlich ergaben sich vergleichbar große Werte bei der Errechnung von reizgebundenen und von antwortgebundenen P3b-Amplituden (Verleger u. a., 2005). Diese Ergebnisse wurden bereits reproduziert (Saville u. a., 2011). In den letzten Jahren wurden durch Verleger und Kollegen verschiedene weitere Experimente durchgeführt, die Annahmen für die Stimulus-Response Link Hypothese untersuchen. So wurden sogenannte Stimulus onset asynchronies (SOA) eingesetzt. Das bedeutet, man verzögert in einem klassischen Oddballexperiment die Antwort der Probanden dadurch, dass sie auf ein „Go“-Signal warten müssen. Dadurch wird die Verbindung zwischen dem Zielreiz (stimulus) und der Antwort (response) zeitlich voneinander getrennt. Würde die P3b nun allein durch den seltenen

Reiz beeinflusst, wie es die Context Updating Hypothese voraussagt, bliebe die P3b-Amplitude für verschiedene SOAs gleich groß, da die Antwort keinen Einfluss auf die P3b nimmt. Spiegelt die P3b aber eine Brücke zwischen Reiz und Antwort wieder, wie es die S-R Link Hypothese vorschlägt und wie es die zitierte Arbeit zeigt, wird die Amplitude der P3b mit steigender SOA kleiner im Vergleich zur direkten Antwort ohne zeitliche Verzögerung (Verleger u. a., 2014a). Der Einfluss der Verbindung zwischen Stimulus und Antwort (S-R Link) wurde auch in einer weiteren Studie untersucht. Der klassische Oddballversuch wurde in dieser durch eine zusätzliche Reizdimension in Form von zwei verschiedenen Rahmenfarben um die Buchstaben erweitert und Kombinationsaufgabe genannt. Je nach Buchstabe und Farbe gab es so vier Reizkombinationen, also statt einem zwei Reize für jede der beiden Antworttasten, zum Beispiel X in Blau → links, X in Gelb → rechts, U in Blau → rechts, U in Gelb → links. So wurde eine, im Vergleich zum klassischen Oddballversuch, schwächere Verbindung zwischen Reiz und Antwort erzeugt, was sich in einer kleineren P3b Amplitude niederschlug (Verleger u. a., 2014b) und damit den Einfluss der Antwort auf die P3b untermauert. Die letzten Ergebnisse vor der hier vorgestellten Arbeit untersuchten, welche Stellgröße für die Amplitudenreduktion bei Verleger u. a., 2014b verantwortlich war. Die Relevanz der Reize für die Antwort stellte sich dabei als ein entscheidender Faktor heraus. Dies ließ sich aus einem Experiment ermitteln, welches das Oddball-Paradigma um farbige Rahmen als „Go“- und „No Go“-Signale erweiterte. Die Rahmen, die kurz nach den Buchstaben um diese erschienen, hatten keinen direkten Einfluss auf die Antwortauswahl, jedoch eine Relevanz, ob zu antworten war oder nicht. So ließ sich eine intermediäre P3b-Amplitude erzeugen, die kleiner war als im klassischen Oddball-Paradigma und größer war als in der Kombinationsaufgabe der vorherigen Studie. Interpretiert man diese Ergebnisse nach den Annahmen der S-R Link Hypothese, entspricht die intermediäre P3b-Amplitude einer Voraktivierung, die nicht so stark wie im Oddball-Paradigma ist, aber stärker als in der Kombinationsaufgabe (Verleger u. a., 2015a).

All diese Versuchsdesigns arbeiten mit Antworten auf Reize, um die P3 zu messen. Ursprünglich wurde die P3 jedoch in einem Experiment von Sutton entdeckt, in dem es keine Reaktion in Form eines Tastendruckes oder Ähnlichem gab, sondern ein Reiz vorherzusagen war. Genauer folgte auf einen Stichwortreiz immer ein Testreiz, der zwei unterschiedliche sensorische Modalitäten aufweisen konnte. Dabei gab es zwei voneinander verschiedene Versuchsbedingungen. In einer „certain condition“ wusste die Versuchsperson, welcher Reiz folgen würde. In der anderen „uncertain condition“ war dies nicht der Fall. Die Versuchspersonen mussten damals angeben, ob ein Licht oder ein Klick folgen würde, und es zeigte sich in der unsicheren Situation bei abnehmender Wahrscheinlichkeit für den vorherzusagenden Reiz eine zunehmende P3-

Amplitude (Sutton u. a., 1965). Es ist nun eine Herausforderung und logische Konsequenz aus den bisherigen Ergebnissen, die S-R Link Hypothese auch auf dieses Vorhersageparadigma zu testen, da hier keine Reiz-Reaktions-Schemata im herkömmlichen Sinne ablaufen und dennoch große P3-Amplituden messbar sind. Wie kann die S-R Link Hypothese die Ergebnisse interpretieren, die Versuche mit dem Ablauf „Vorhersage-Reiz-Vorhersage-Reiz“ hervorbringen und in denen es keine direkte Reaktion zu verknüpfen gibt?

Bereits in den Siebzigerjahren des letzten Jahrhunderts wurde eine Studie durchgeführt, die die Vorhersage und deren Einfluss auf die P3 aufgriff (Tueting u. a., 1970). Für die hier nachstehend vorgestellten Experimente wurde dieses Konzept überarbeitet und angewendet. Allerdings nahmen am damaligen Versuch nur 4 Versuchspersonen teil, deren EEG an lediglich 4 Ableitorten aufgezeichnet worden ist. Die Vorhersage erfolgte verbal anstelle einer Tasteneingabe, und es wurden akustische statt visuelle Reize benutzt. Es gab noch weitere methodische Unterschiede, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Wichtig ist noch zu erwähnen, dass im aktuellen Experiment ein Bezahlungssystem eingeführt worden ist, welches im Verlauf erläutert wird. Aufgrund der teils erheblichen konzeptionellen Unterschiede wurde also mit den hier vorgestellten Experimenten die Frage nach dem Einfluss der Vorhersage auf die P3 erneut gestellt und die Anwendbarkeit der S-R Link Hypothese überprüft.

Im verwendeten Versuchsaufbau sind die Probanden angehalten, in jedem Durchgang vorherzusagen, ob ein seltener oder häufiger Reiz erscheinen wird. Die Versuchsperson kennt die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der beiden möglichen Ereignisse, da sie vor den Durchgängen mündlich und schriftlich informiert worden ist. Der häufige Reiz erscheint in 80,0% der Fälle, der seltene Reiz erscheint in 20,0% der Fälle. Aus dieser Konstellation ergeben sich vier mögliche Vorhersage-Lösungs-Kombinationen. Es kann der häufige Reiz vorhergesagt werden und der häufige Reiz als richtige Lösung erscheinen, der seltene Reiz kann vorhergesagt werden und der seltene Reiz als richtige Lösung erscheinen und es kann der häufige und der seltene Reiz falsch vorhergesagt werden, wenn die gegenteilige Lösung erscheint. Der richtig geratene seltene Reiz wird in Form eines Geldbetrages belohnt, der richtig geratene häufige Reiz wird etwas niedriger belohnt, falsches Vorhersagen hat keinerlei Konsequenz. Im Folgenden wird der Einfachheit halber die Vorhersage des häufigen Reizes „h“ (häufig) genannt, die Vorhersage des seltenen Reizes sei „s“ (selten). Zusammengefasst sind sie die Vorhersagehäufigkeit. Die Lösung wird in Analogie zur Vorhersage mit den Großbuchstaben „H“ und „S“ bezeichnet.

Folgte man der Annahme, dass die Vorhersage keinen Einfluss auf die P3-Amplitude hat, träte lediglich der bekannte Oddballeffekt ein. Der häufige Reiz würde eine kleine und der seltene Reiz

eine große P3-Amplitude generieren, unabhängig von der durch die Probanden gemachten Vorhersagen ( $s \rightarrow S = h \rightarrow S$ ,  $s \rightarrow H = h \rightarrow H$  und  $s \rightarrow S$  bzw.  $h \rightarrow S > s \rightarrow H$  bzw.  $h \rightarrow H$ ).

Die Hypothese für die beiden Experimente lautete jedoch, dass die Vorhersage die P3b beeinflusst. Es wurde angenommen, dass neben dem Oddballeffekt ( $S > H$ ), eine *Verbindung* oder *Brücke* zwischen der Vorhersage und dem Reiz besteht. Der Reiz stellt ein Feedback dar, das entweder impliziert „ich habe richtig geraten“ oder „ich habe falsch geraten“. Da sich das Rateverhalten der Testpersonen idealerweise an den objektiven Wahrscheinlichkeiten orientiert, konnte davon ausgegangen werden, dass der häufige Reiz von den Probanden in 80,0% der Fälle geraten wird. Bei einer tatsächlichen Wahrscheinlichkeit des Erscheinens des häufigen Reizes von 80,0% ergibt sich für  $h \rightarrow H$  eine Häufigkeit von 64% ( $0,8 * 0,8$ ) für diese Vorhersage-Lösungskombination. Die Versuchsperson rät in 20,0% der Fälle den seltenen Reiz, der in 20,0% der Fälle erscheint. Damit ergibt sich in 4,0% ( $0,2 * 0,2$ ) der Fälle ein richtig geratener seltener Reiz  $s \rightarrow S$ . Für die falsch vorhergesagten Kombinationen,  $s \rightarrow H$  und  $h \rightarrow S$ , ergeben sich jeweils 16,0% ( $0,2 * 0,8$  bzw.  $0,8 * 0,2$ ). Wenn also der häufige Reiz mittels des entsprechenden Knopfdrucks realisiert wird und das darauf folgende Feedback „häufiger Reiz“ erscheint, ist diese Verbindung gemäß der S-R Link Hypothese schon aktiv und bedarf keiner erneuten Aktivierung, da es in den Versuchen die am häufigsten benutzte Verbindung ist. Es folgt eine kleine P3b. Wird der seltene Reiz vorhergesagt und erscheint, ist eine starke Reaktivierung dieser Verbindung notwendig, und es wird eine große P3b erzeugt, da dies die seltenste Vorhersage-Lösungskombination ist. Kommt es zu einer Diskrepanz zwischen Vorhersage und Lösung ( $s \rightarrow H$ ,  $h \rightarrow S$ ), sollte dies zu intermediären P3-Amplitudengrößen führen, da diese häufigere S-R Links darstellen als die Verbindung  $s \rightarrow S$ , aber seltenere als  $h \rightarrow H$ . Integriert man die Annahmen des Oddballeffektes ( $S > H$ ) und die Annahmen aus der S-R Link Hypothese, wäre folgende Reihenfolge der P3-Amplitudengröße zu erwarten:  $s \rightarrow S > h \rightarrow S > s \rightarrow H > h \rightarrow H$ .

Die P3-Amplituden wären demnach invers zu den Häufigkeiten der Ereigniskombinationen. Treffen diese Hypothesen zu, gälte als Konsequenz ein gegensätzlicher Effekt von „falsch“ und „richtig“ für häufige und seltene Reize. Für den häufigen Reiz wäre die P3-Amplitude bei der falschen Vorhersage  $s \rightarrow H$  größer als die richtige Vorhersage  $h \rightarrow H$ . Für den seltenen Reiz wäre die P3-Amplitude für die richtige Vorhersage  $s \rightarrow S$  größer als die falsche Vorhersage  $h \rightarrow S$ .

Es wurden zwei Experimente konzipiert, die den Einfluss der Vorhersage auf die P3-Amplitude untersuchen sollen. In Experiment 1 wird für falsche und richtige Vorhersagen die Lösung in einer bestimmten Farbe angezeigt (gelb oder blau), um die Aufmerksamkeit und das Interesse am Experiment zu erhöhen und rein mechanisches Drücken der Vorhersagetasten möglichst zu

vermeiden. Um auszuschließen, dass Effekte auf die P3 durch das farbliche Feedback erzeugt werden, gibt es ein zweites Experiment mit einem impliziten Feedbackteil ohne farbige Buchstaben. Lösungen erscheinen dort in Schwarz.

Zusätzlich wurden unterschiedliche Tastenbelegungen eingeführt. Es gab im ersten Experiment Versuchsblöcke mit konstanter Tastenbelegung und Blöcke, in denen die Tastenbelegung zur Eingabe der Vorhersage alternierte. Durch Vergleich der beiden Versuchsbedingungen sollte getestet werden können, ob die bloße motorische Aktion während der konstanten Tastenbelegung einen Effekt auf die P3b hat oder ob die abstrakte Vorhersage, herauskristallisiert durch die wechselnde Tastenbelegung, einen Einfluss auf die P3b ausübt. Es wurde von einem Effekt der abstrakten Vorhersage ausgegangen. Die Vorhersage wird nach dieser Vorstellung bewusster in der alternierenden Form gemacht, da dort zu überlegen ist, welche Taste für die Wunscheingabe gewählt werden muss im Gegensatz zur monotonen konstanten Bedingung, in der die häufigste Eingabe des häufigen Buchstabens schneller und unbewusster geschehen kann. Dies schwächt die Verbindung der Vorhersage-Lösungs-Kombination mit dem inneren Ergebnisabgleich. Daher wird angenommen, dass sich für die konstante Bedingung kleinere P3-Amplituden als für die alternierende Bedingung ergeben. Darüber hinaus sollen Unterschiede der P3-Amplituden zwischen den Vorhersage-Lösungs-Kombinationen innerhalb der alternierenden Bedingung stärker zu Tage treten, da dort durch die bewusster Vorhersage und die damit verbundene bewusster Wahrnehmung die häufig benutzten S-R Verbindungen besser etabliert werden als die Seltenen.

### 3 Experiment 1

#### 3.1 Vorbemerkung

Eine Gefahr in diesem Versuchsprinzip lag, wie bereits angedeutet, darin, dass Teilnehmer statt bewusst zu raten, lediglich mechanisch die Eingaben machen würden, um den Versuch schnell hinter sich zu bringen. Um dies zu verhindern, wurde eindrücklich instruiert, wirklich zu raten und nicht durchgängig nur einen Buchstaben zu wählen. Andererseits sollte die wechselnde Tastenbelegung in den Versuchsblöcken auch als Schutz vor der rein mechanischen Eingabe dienen. Ein weitere Sicherheit vor der gedankenlosen Eingabe war die Bezahlung an sich und die Zwischenanzeige über das erspielte Geld nach jeweils 20 Durchgängen, die das Interesse am Ratespiel aufrechterhalten sollte.

#### 3.2 Material und Methoden

##### 3.2.1 Versuchsaufbau

Das Experiment fand im EEG-Labor der Klinik für Neurologie des UKSH Lübeck im Haus 25 statt. Vor der Studienteilnahme erfolgte eine schriftliche und mündliche Aufklärung über das Experiment, es handele sich um ein Glücksspiel mit Geldgewinn, bei dem in mehrfachen Durchgängen an einem PC zu raten sei, ob ein häufiger oder seltener Buchstabe (X oder U) erscheine. Während der Zeit des Versuchs würde ein EEG aufgezeichnet werden. Es war eine Einverständniserklärung zu unterschreiben, und die Zahlungsmodalitäten mit nachfolgenden Konditionen wurden erklärt. Je mehr richtig geraten wurde, umso höher war der Erlös, und die zu erspielende Summe belief sich im Mittel auf 16 €. Ein richtig geratener häufiger Buchstabe (je nach Durchgang X oder U) erzielte dabei 2 Cent und ein richtig geratener seltener Buchstabe (je nach Durchgang vice versa) 8 Cent. Geldverlust bei falschem Raten war nicht möglich. Die 16 € ergaben sich aus der Summe der beiden Produkte für die Wahrscheinlichkeiten des häufigen und des seltenen Buchstabens, multipliziert mit dem Gewinn in Cent, der Anzahl an Durchgängen und den im Experiment ermittelten, gerundeten Anteilen an richtig vorhergesagten Lösungen:  $(0,2 * 8 \text{ Cent} * 1000 * 0,25) + (0,8 * 2 \text{ Cent} * 1000 * 0,75) = 16 \text{ €}$ .

Während des Versuchs saßen die Probanden in einem abgedunkelten Raum auf einem Stuhl mit Lehne und einer Fußablage und blickten mit etwa 110 cm Abstand auf einen 17" Monitor. Zur Eingabe des geratenen Buchstabens bekamen die Probanden eine Standardtastatur auf den Schoß. Dabei waren die linke und die rechte [STRG]-Taste mit lockeraufliegenden Zeigefingern zum Raten des Buchstabens zu verwenden. Die linke Windowstaste wurde entfernt, um nicht

durch versehentliches Drücken einen Absturz des Programms hervorzurufen. Während des Experiments waren die Probanden allein im Testraum.

Als Software für die Testdurchführung wurde Presentation® ([www.neurobs.com](http://www.neurobs.com)) in der Version 14.0 benutzt, die die Stimuli visuell auf dem Monitor präsentierte, die Eingaben registrierte und an einen Computer im Nebenraum sendete, wo sie mit dem aufgezeichneten EEG gespeichert wurden.

### 3.2.2 Probanden

An Experiment 1 nahmen 16 rechtshändige Personen teil. Diese bestanden zu gleichen Teilen aus Frauen und Männern. Das Altersspektrum der Versuchspersonen bewegte sich zwischen 21 und 29 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug 24 Jahre mit einer Standardabweichung von 2,2 Jahren. Mit Ausnahme einer Person handelte es sich um Studenten. Die letzte Versuchsperson hatte ihr Studium bereits abgeschlossen und war als Lehrerin tätig. Alle Probanden waren normalsichtig oder trugen bei Fehlsichtigkeit die entsprechende Korrekturhilfe. Alle Probanden verneinten auf Nachfrage neurologische Krankheiten und Medikamente, die Einfluss auf das Experiment haben könnten.

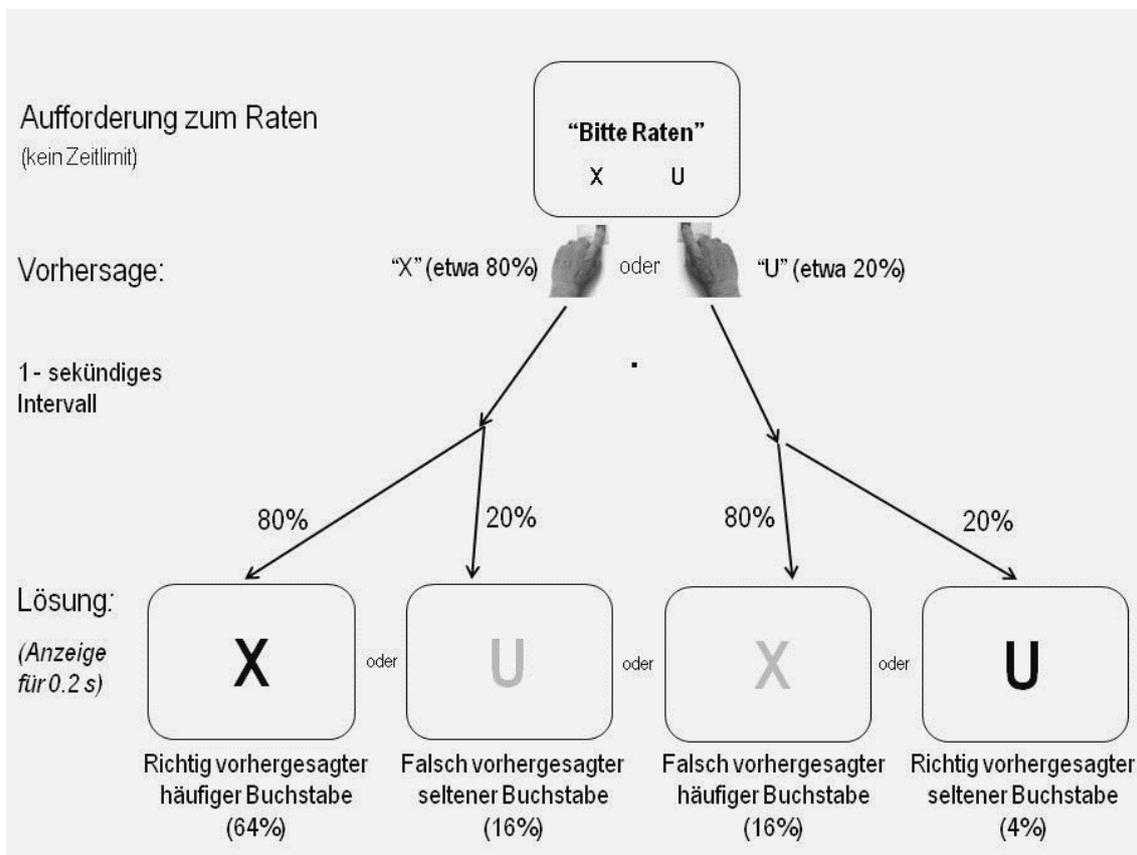
### 3.2.3 EEG-Ableitung

Zum Einsatz kamen Elektroden mit gesinterter Silber/Silberchloridbeschichtung von easycap ([www.easycap.de](http://www.easycap.de)), die auf einer EEG-Kappe befestigt wurden. Für die EEG-Aufzeichnung wurden 60 Elektrodenpositionen nach dem erweiterten 10-20 System verwendet (siehe modifizierte Abbildung vor der Einleitung). Die Ableitelektroden waren folgendermaßen verteilt: 8 in Mittellinienpositionen von Nasion zu Inion und 26 symmetrische Paare über beiden Hemisphären. Als Onlinereferenz diente die frontal an der Mittellinie positionierte Elektrode (Fz). Eine Elektrode an der Nasenspitze wurde als Offlinereferenz eingesetzt und eine präfrontale Elektrode (FPz) als Erdungselektrode. Zur Artefaktkontrolle wurde ein Elektrookulogramm (EOG) aufgezeichnet. Dafür befanden sich zwei Elektroden über und unter dem rechten Auge in einer vertikalen Achse (vEOG) und zwei Elektroden jeweils lateral des rechten und lateral des linken Auges in einer horizontalen Achse (hEOG).

Die Messungen wurden mit dem BrainAmp MR plus für Frequenzen bis zu 250 Hz verstärkt und mit der Software Brain Vision Analyser (Vers. 2.03) mit einer Abtastrate von 500 Hz gespeichert.

### 3.2.4 Versuchsdurchführung

Nachdem die Versuchsperson signalisierte, startbereit zu sein, erschien ein Startbildschirm mit einer Spielanweisung. Jedwede Schrift wurde in schwarzer Farbe auf hellgrauem Grund in der Schriftart Helvetica abgebildet.



*Abbildung 1: Darstellung des Ablaufs eines Ratedurchgangs. Während der Aufforderung zur Eingabe der Vorhersage wurde die aktuelle Belegung der Tasten (hier „U“ rechts und „X“ links) angezeigt. Die Lösung wurde 1 Sekunde nach der Vorhersage angezeigt. Ein Buchstabe war häufig (hier „X“) und ein Buchstabe war selten (hier „U“). Es wurde erwartet, dass sich die Häufigkeit der Buchstaben (80,0% und 20,0%) im Rateverhalten der Versuchsteilnehmer widerspiegelt. Dann träten die vier möglichen Kombinationen mit folgenden Häufigkeiten auf: 64%, 16%, 16% und 4%.*

Das Experiment bestand aus insgesamt tausend Ratevorgängen pro Teilnehmer, die in vier Blöcke geteilt waren. Wie in Abbildung 1 gezeigt, startete jeder Durchgang mit einer Aufforderung zum Beginnen („Bitte Raten“ Schriftgröße 20 pt). Zeitgleich wird zur Erinnerung die Tastenbelegung im unteren Bildschirmrand angezeigt.

Die Tastenbelegung war dabei konzeptionell unterschiedlich. Es gab innerhalb der vier Blöcke zwei, in denen die Tastenbelegung konstant blieb (1 Block, in dem X immer durch die linke und U immer durch die rechte Taste repräsentiert wurde und vice versa) und zwei Blöcke, in denen die Tastenbelegung in jedem Durchgang alternierte. Es gab vier verschiedene Blockreihenfolgen. Die Blöcke mit der konstanten Tastenbelegung waren entweder Block #1 und #3 oder Block #2 und #4, und entweder war dabei der erste Block mit dem häufigen Buchstaben links oder der mit dem häufigen Buchstaben rechts. Die Permutation wurde eingesetzt, um systematische Fehler durch eventuelle Reihenfolgeeffekte zu vermeiden.

Der richtig zu ratende Buchstabe wurde durch das Programm Presentation® mit einer Häufigkeitsverteilung von 80 zu 20 zufällig gewürfelt. Zusätzlich wurde eine Sperre eingebaut, die verhinderte, dass die Software zwei Mal nacheinander den seltenen Buchstaben würfelte. Stattdessen erschien dann erneut der häufige Buchstabe und der seltene Buchstabe wurde auf den nächsten Durchgang verschoben. Für diesen zweiten Durchgang nach dem Würfeln eines seltenen Buchstabens betrug dann die Wahrscheinlichkeit für den seltenen Buchstaben 36% ( $0,2+0,2-0,2*0,2=36\%$ ). Durch das Verbot zweier seltener Buchstaben in Folge senkte sich die Gesamtwahrscheinlichkeit für den seltenen Buchstaben von 20% auf 19,2% und stieg somit für den häufigen Buchstaben 80,8%. Die Versuchspersonen waren über diese Sperre nicht informiert.

Wurde zu früh gedrückt, also vor der Aufforderung zum Raten, erschien für 4 Sekunden ein Hinweis mit dem Text „zu früh gedrückt“ in roter Schrift (30 pt). Auf eine zeitlich korrekte Eingabe folgte für eine Sekunde ein weißer Bildschirm, dann erschien die Lösung (X oder U in Schriftgröße 35 pt), die für 200 Millisekunden in der Bildschirmmitte eingeblendet wurde. Der richtige Buchstabe wurde farblich dargestellt, sodass die Versuchspersonen ein Feedback bekamen, ob richtig oder falsch geraten wurde. Für die Hälfte der Teilnehmer bedeutete der blaue Buchstabe richtig geraten, der Buchstabe in Gelb falsch geraten, für die andere Hälfte vice versa. Für die Hälfte der Versuchspersonen war X der häufige Buchstabe und U der seltene, für die andere Hälfte vice versa. Der nächste Ratedurchgang wurde 1 Sekunde nach dem vorherigen Ergebnis präsentiert. Es gab kein Abfließen der Zeit während des Experiments, d. h., der Versuch wurde nicht fortgesetzt, wenn keine Taste gedrückt wurde. Nach jeweils 20 Durchgängen und am Ende eines jeden Blocks wurde den Teilnehmern ein Zwischenstand angezeigt, der sie über die erspielte Summe informierte, aufgeschlüsselt in verdientes Geld mit richtigem Raten des seltenen und des häufigen Buchstabens. Vor Beginn jedes neuen Blocks erschien erneut ein Text, mit einem Hinweis auf die folgende Tastenbelegung.

### 3.2.5 Datenauswertung

Die Verarbeitung der Messdaten erfolgte durch die Software Brain Vision Analyser (Brain Products GmbH) und das Statistikprogramm SPSS. Die Daten wurden nach dem Ende des Experiments gegen die Offlinereferenzelektrode an der Nase referenziert. Es folgte eine Tiefpassfilterung für Frequenzen über 25 Hz, um Störsignale zu entfernen. Im nächsten Schritt wurden 2,1 Sekunden lange Intervalle gebildet von 100 ms vor der Tasteneingabe bis 1000 ms nach dem Erscheinen der Lösung. So wurden die EEG-Verläufe in die einzelnen Durchgänge zerlegt. Es folgte eine erste Grundlinienkorrektur, für die der Mittelwert aus den 100 ms vor der Tasteneingabe gebildet wurde. Die Intervalle wurden auf Artefakte untersucht. Sobald sich innerhalb dieser Intervalle zwei Messpunkte hintereinander fanden, die mehr als 50  $\mu\text{V}$  voneinander differierten, wurde der jeweilige Abschnitt als Artefakt erkannt und entfernt. Eine Ausnahme von diesem Schritt bildeten die Daten der EOG-Ableitungen, da Augenbewegungen durch lineare Regression im nächsten Schritt durch den Brain Analyser korrigiert wurden, um großen Datenverlust zu vermeiden. Es wurde daraufhin eine erneut korrigierte Grundlinie definiert, die aus der gemittelten Amplitude der ersten 100 ms vor dem Ergebnis eines Ratedurchgangs in jedem Kanal ermittelt wurde. Diese wurde erneut auf Null gesetzt. Wenn die Spannung um mehr als 150  $\mu\text{V}$  um diese Grundlinie schwankte, wurde der Durchgang von der Auswertung aufgrund grober Artefakte ausgeschlossen.

Die Anzahl der verbleibenden Durchgänge betrug im Mittel über die Versuchspersonen nach diesen Korrekturschritten für feste und wechselnde Tastenbelegung 291 bzw. 286 für die h→H Kombination (minima 242 und 191), 90 und 96 für s→H (minima 40 und 49), 62 und 64 für h→S (minima 45 und 45) und 26 und 26 für s→S (minima 9 und 13).

Für beide Durchführungsbedingungen, feste und wechselnde Tastenkombination, wurden die Potentiale der vier möglichen Vorhersage-Lösungs-Kombinationen getrennt gemittelt und grafisch dargestellt. Anhand dieser Verläufe wurde das zeitliche Fenster für die Suche nach dem P3-Maximum der sieben Ableitungen der Mittellinie (Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz) für den Zeitraum von 250 bis 650 ms nach dem Erscheinen der Lösung festgelegt. Von diesen sieben wurden in einer ersten Analyse die höchsten P3-Amplituden bei FCz, Cz, CPz und Pz gefunden. In der folgenden Analyse wurden deshalb die Aufzeichnungen dieser 4 Elektroden benutzt. Analysefaktoren für die Varianzanalyse (ANOVA) waren Aufzeichnungsort (4 Orte), Reizhäufigkeit (häufig, selten), Häufigkeit des geratenen Buchstabens (häufig, selten) und Tastenbelegung (fest, wechselnd).

In den gemittelten EEG-Verläufen für alle Versuche, gleich welcher Tastenkombination oder Vorhersage-Lösungs-Kombination, zeigte sich ein negativ ansteigendes Potential vor dem Erscheinen der Lösung. Dieses Potential wird Stimulus Preceding Negativity (SPN) genannt. Amplituden dieser SPN wurden einer Varianzanalyse mittels SPSS mit den Faktoren Aufnahmeorte (7), Häufigkeit des geratenen Buchstabens (häufig, selten) und Tastenbelegung (fest, wechselnd) unterzogen. Eine zweite ANOVA wurde für die Messungen der Ableitungen PO3, POz und der PO4 (mit denselben Faktoren, 3 Aufnahmeorte) durchgeführt, da dort die SPN am größten war.

Freiheitsgrade des Faktors Aufnahmeort wurden mit der Greenhouse-Geisser-Methode korrigiert, um potentielle Verletzungen der Prämissen für die Varianzanalyse zu kompensieren. Zu dem wurden Varianzanalysen für einzelne Stufen jedes der interagierenden Faktoren durchgeführt, um Interaktionen zu verstehen.

Der zentrale Messparameter im Verhalten war die Häufigkeit der vier Kombinationen aus geratenem und gewürfeltem Buchstaben ( $h \rightarrow H$ ,  $h \rightarrow S$ ,  $s \rightarrow S$  und  $s \rightarrow H$ ), die durch das Rateverhalten der Versuchspersonen und die objektiven Wahrscheinlichkeiten (80/20) der Stimuli zu Stande kam. Um die Verteilung der Lösungen des Ratevorgangs zu analysieren, wurden die Prozentzahlen der richtig und falsch geratenen häufigen und seltenen Buchstaben nach experimenteller Anordnung eingeteilt (konstante Tastenbelegung, alternierende Tastenbelegung) und in einer Varianzanalyse miteinander bezüglich der Verteilung der vier Kombinationen verglichen. Der Anteil der geratenen seltenen Buchstaben wurde mit den tatsächlichen Anteilen verglichen und in einer Varianzanalyse mit den Faktoren Tastenbelegung und subjektive gegen objektive Rateereignisse verglichen.

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen der Häufigkeit der Ereigniskombinationen und der P3-Amplitude wurde über die Teilnehmer aus der Differenz der Ereignisse  $h \rightarrow H$  minus  $s \rightarrow H$ ,  $s \rightarrow H$  minus  $h \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S$  minus  $s \rightarrow S$  berechnet, um herauszufinden, ob individuelle Variationen im P3 Anstieg mit individuellen Variationen der Häufigkeit der Rate-Ergebnis-Kombinationen zusammenhängen.

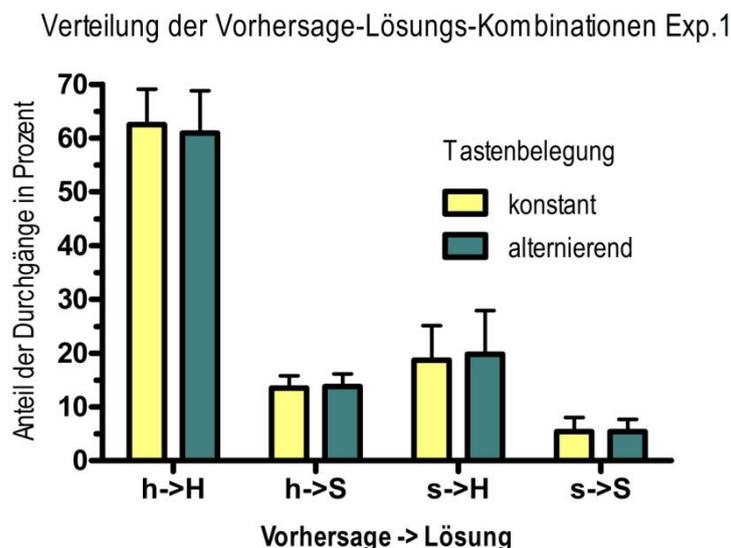
Zusätzlich wurde die Zeit zwischen Aufforderung zum Raten („Bitte Raten“) und dem Drücken der Tasten gemessen. Die gemittelten Reaktionszeiten wurden ebenfalls in einer Varianzanalyse nach Häufigkeit des geratenen Buchstabens (häufig, selten) und Tastenbelegung (konstant, alternierend) analysiert.

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 Verhalten der Versuchspersonen bei der Vorhersage

Die Software Presentation erzeugte häufige Buchstaben mit einem Anteil von  $80,9\% \pm 1,1\%$  ( $h \rightarrow H$  und  $s \rightarrow H$ ) und seltene Buchstaben mit einem Anteil von  $19,1\% \pm 1,1\%$  ( $s \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S$ ), was nahezu den im Methodikteil berechneten Anteilen entspricht.

Die prozentuale Verteilung der vier möglichen Kombinationen aus Vorhersage und Lösung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die vier Kombinationen ergaben sich mit der Verteilung: 62%  $h \rightarrow H$ , 19%  $s \rightarrow H$ , 14%  $h \rightarrow S$ , 5%  $s \rightarrow S$  (gemittelt über konstante und alternierende Tastenbelegung). Der Unterschied in der Häufigkeitsverteilung der vier Kombinationen war hoch signifikant:  $F_{3,45} = 275,6$ ,  $p < ,001$ . Auch in Paaranalysen von Vorhersage-Lösungs-Kombinationen galt für alle  $p < ,001$ . Eine Ausnahme war das Paar  $s \rightarrow H$  gegen  $h \rightarrow S$ , für das ein  $p < ,02$  errechnet wurde. Anhand der Verteilung lässt sich zusammenfassen, dass der häufige Buchstabe häufiger korrekt als falsch geraten wurde (62% gegen 19%), wohingegen der seltene Buchstabe häufiger falsch als richtig geraten wurde (14% gegen 5%). Die Verteilung unterschied sich nicht zwischen den beiden Arten der Tastenbelegung: Die Wechselwirkung der beiden Faktoren Lösung x Tastenbelegung war nicht signifikant,  $F_{3,45} = 2,1$ ;  $p = ,14$ .



*Abbildung 2: Gemittelte Häufigkeiten (in Prozent) für die Kombinationen aus vorhergesagtem und gewürfeltem Buchstaben. Auf der x-Achse stehen die Kleinbuchstaben „h“ und „s“ für die Vorhersage des häufigen (h) und seltenen Buchstaben (s). Die Großbuchstaben stehen für die durch die Software zufällig gewürfelte Lösung. Auf der y-Achse sind die für die Teilnehmer gemittelten Durchgänge in Prozent skaliert.*

Die Versuchspersonen entschieden sich im Mittel in 75,3% der Durchgänge für die Vorhersage des häufigen Buchstaben ( $h \rightarrow S$  und  $h \rightarrow H$ ) und in 24,7% der Durchgänge für den seltenen Buchstaben ( $s \rightarrow H$  und  $s \rightarrow S$ ). Demnach wurden seltene Buchstaben häufiger geraten und häufige Buchstaben seltener, als sie tatsächlich gewürfelt wurden,  $F_{1,15} = 6,3$ ,  $p = ,02$ .

Die häufigen Buchstaben wurden in 76,2% ( $\pm 8,7\%$ ) der Fälle erfolgreich vorhergesagt ( $h \rightarrow H$  / ( $h \rightarrow H + s \rightarrow H$ )). Eine erfolgreiches Raten der seltenen Buchstaben erfolgte in 28,1% ( $\pm 10,8\%$ ) der Fälle ( $s \rightarrow S$  / ( $s \rightarrow S + h \rightarrow S$ )).

Die Häufigkeit, mit der sich für den seltenen Buchstaben entschieden wurde, unterschied sich zwischen den Versuchspersonen und schwankte zwischen 12% und 42%. Diesen Unterschied führten wir auf die individuellen Ratestrategien zurück, denn die Personen, die seltener den seltenen Buchstaben vorher sagten, taten das stabil in beiden Versuchsbedingungen, konstante und alternierende Tastenbelegung, ebenso wie diejenigen, die sich häufiger für den seltenen Buchstaben entschieden ( $r = 0,93$ ;  $p < ,001$ ).

### 3.3.2 Reaktionszeiten

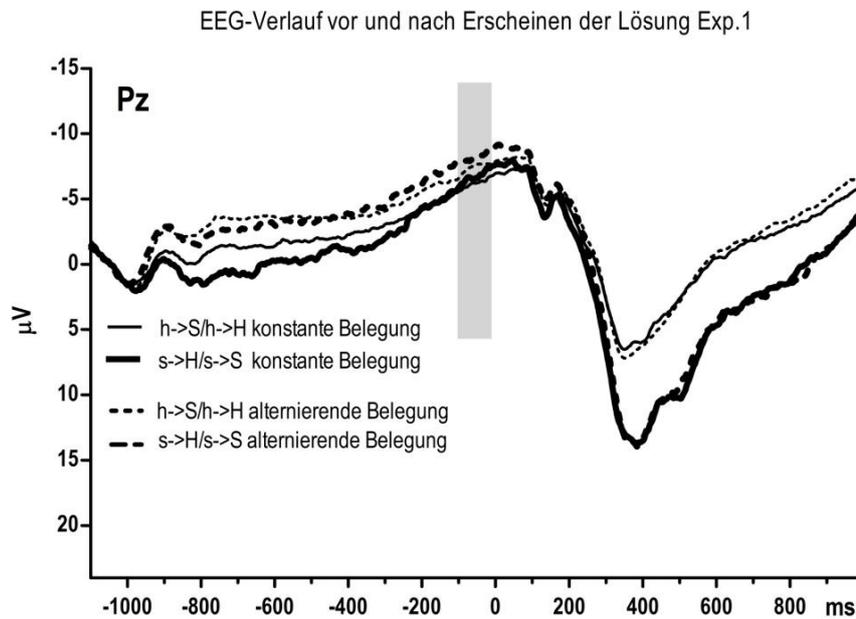
Es zeigten sich zwei Effekte bei den Reaktionszeiten. Bei der alternierenden Tastenbelegung wurde, im Vergleich zur konstanten Tastenbelegung, mehr Zeit benötigt, um eine Vorhersage zu machen: 717 ms gegen 565 ms,  $F_{1,15} = 25,1$ ;  $p < ,001$ .

Darüber hinaus gab es einen Zusammenhang zwischen der Tastenbelegung und der Vorhersagehäufigkeit. Die ANOVA ergab für die beiden Faktoren eine signifikante Wechselwirkung:  $F_{1,15} = 6,5$ ,  $p = ,02$ , und es ließ sich zeigen, dass bei alternierender Tastenbelegung tendentiell mehr Zeit für die Vorhersage für einen seltenen Buchstaben benötigt wurde als für einen häufigen: alternierende Tastenbelegung und Vorhersagehäufigkeit:  $F_{1,15} = 3,1$ ,  $p = ,10$ . Bei konstanter Tastenbelegung ließ sich dieser Zusammenhang mit der Vorhersagehäufigkeit nicht herstellen:  $F_{1,15} = 0,0$ , n.s.

### 3.3.3 Ereigniskorrelierte Potentiale

Abbildung 3 zeigt die EEG-Verläufe für die häufige und seltene Vorhersage 100 ms vor der Vorhersage über die Lösung bei 0 ms bis 1000 ms danach. Zwischen der Vorhersage und dem Erscheinen der Lösung wurde ein negativ ansteigendes Potential für alle Kurven (Vorhersage vom seltenen und häufigen Buchstaben und konstante und alternierende Tastenbelegung) gemessen. Am größten war dieses Potential am Hinterkopf. Speziell über Pz und POz zeigte sich

ein hochsignifikant größeres Potential als über den anderen Mittellinienelektroden:  $F_{6,90} = 12,3$ ,  $p < ,001$ . An den seitlichen Ableitungen, besonders über PO3 und PO4, war die SPN darüber hinaus noch signifikant höher als über den anderen Mittellinienpositionen. Die Varianzanalyse für den Faktor Aufnahmeort (PO3, POz und PO4) ergab hierzu  $F_{2,30} = 4,7$ ,  $p = ,03$ .



*Abbildung 3: EEG-Verläufe über Pz für die häufigen und seltenen Vorhersagen mit jeweils gemittelten seltenen und häufigen Lösungen. Die dicken Linien entsprechen seltenen Vorhersagen, die dünnen Linien entsprechen häufigen Vorhersagen. Die durchgezogenen Linien entsprechen konstanter Tastenbelegung, die gestrichelten Linien entsprechen alternierender Tastenbelegung. Auf der x-Achse ist die Zeit in Millisekunden (ms) aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Spannung in Mikrovolt ( $\mu\text{V}$ ) aufgetragen. Die Abbildung fokussiert die SPN zwischen der Vorhersage bei -1000 ms und der Lösung bei 0 ms. Der graue Balken markiert den Zeitabschnitt, für den die topographische Verteilung der Amplituden dargestellt wurde.*



$h \rightarrow S/h \rightarrow H$  altern.



$h \rightarrow S/h \rightarrow H$  konst.



$s \rightarrow S/s \rightarrow H$  altern.



$s \rightarrow S/s \rightarrow H$  konst.

Topographische Verteilung der negativen Maxima zwischen 100 ms vor bis zum Erscheinen der Lösung: Blick von oberhalb des Kopfes auf die Elektrodenverteilung. Jede Übersicht ist skaliert vom negativen Maximum in Schwarz zu Null in Weiß.

Da die Grundlinie in dem Intervall 100 ms bis zur Lösung für die P3-Messung benutzt wurde, galt es auszuschließen, dass die Kurvenverläufe im festgelegten Intervall nicht auf die Stimulus Preceding Negativity (SPN) zurückzuführen sind. Daher wurden die Amplituden der SPN jeweils für die häufigen und seltenen Vorhersagedurchgänge gemittelt und miteinander verglichen. Es ist in Abbildung 3 erkennbar, dass sich die SPN, im Gegensatz zur P3-Amplitude, nach der Vorhersage von häufigen und seltenen Reizen im untersuchten Intervall nicht unterscheidet. Die ANOVA ergab dazu für die Vorhersagehäufigkeit bei der Analyse der Mittellinie:  $F_{1,15} = 1,2$ , n.s. und bei den drei PO-Ableitungen:  $F_{1,15} = 1,2$ , n.s.

Es ließ sich eine dreifache Interaktion mit Auswirkung auf die SPN zwischen der Vorhersagehäufigkeit, dem Aufnahmeort und der Tastenbelegung feststellen:  $F_{6,90} = 4,0$ ;  $p = ,02$ . Dies erklärt sich durch einen Effekt zwischen Tastenbelegung und Vorhersagehäufigkeit über Fz und FCz (für beide galt  $F_{1,15} = 6,5$ ;  $p = ,02$ ), da die schwächsten negativen Werte über diesen beiden Ableitorten gemessen wurden, wenn der seltene Buchstabe bei konstanter Tastenbelegung vorhergesagt wurde.

Ein letzter Effekt war eine Interaktion zwischen dem Aufnahmeort und der Tastenbelegung:  $F_{6,90} = 2,7$ ,  $p = ,046$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass die SPN ihr Mittellinienmaximum bei alternierender Tastenbelegung etwas weiter anterior (Pz und POz) hatte als bei konstanter Tastenbelegung (POz und Oz). Die Amplituden für die verschiedenen Tastenbelegungen unterschieden sich jedoch an keinem der Aufzeichnungsorte der Mittellinie ( $p = ,08$ ).

Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass sich die gemittelten Amplituden der SPN für die seltenen und häufigen Vorhersagen nicht signifikant unterschieden, sondern etwa gleich waren und damit die im weiteren Verlauf untersuchten Effekte der Vorhersage auf die P3-Amplituden nicht durch die SPN verursacht worden sind.

#### 3.3.4 P3-Amplituden

Abbildung 3 lässt bereits erkennen, dass die Vorhersage eines seltenen Buchstabens ein größeres P3-Signal erzeugt, als die Vorhersage eines häufigen.

Abbildung 4 zeigt die Daten für CPz und fokussiert dabei den Abschnitt zwischen dem Erscheinen der Lösung bis 1000 ms danach. Es sind die EEG-Kurven der vier verschiedenen Vorhersage-Ereignis-Kombinationen zu sehen.

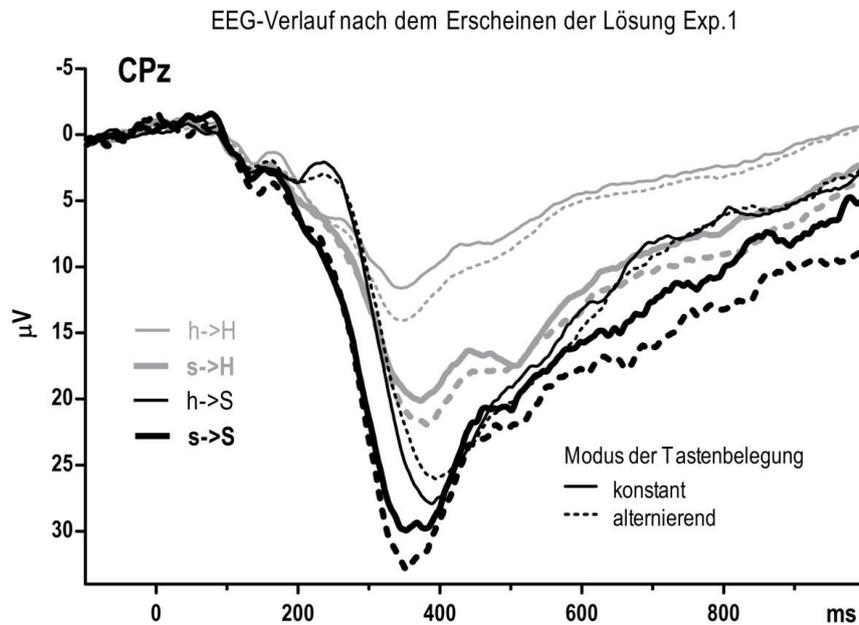
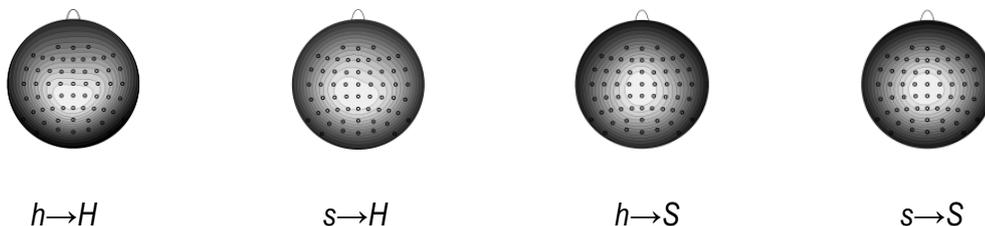
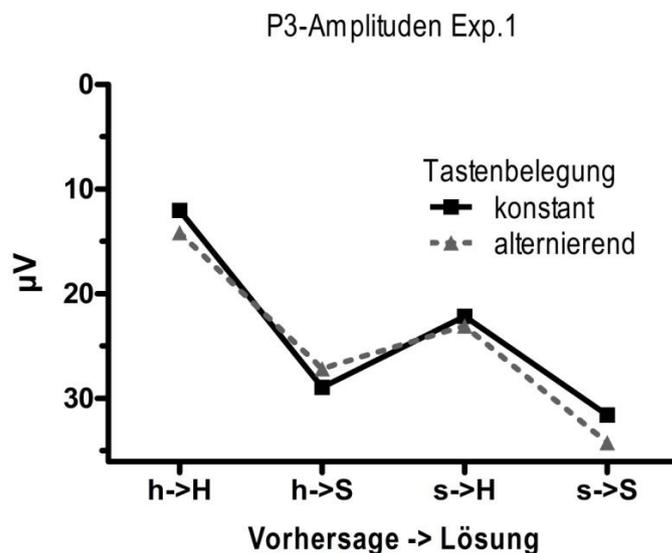


Abbildung 4: EEG-Verläufe über CPz für die vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen aufgeschlüsselt nach der Art der Tastenbelegung. Die dicken Linien entsprechen seltenen Vorhersagen, die dünnen Linien entsprechen häufigen Vorhersagen. Die durchgezogenen Linien entsprechen konstanter Tastenbelegung, die gestrichelten Linien entsprechen alternierender Tastenbelegung. Auf der x-Achse ist die Zeit in Millisekunden (ms) aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Spannung in Mikrovolt ( $\mu\text{V}$ ) aufgetragen. Zeitpunkt des Erscheinens der Lösung bei 0 ms.



Topographische Verteilung der P3-Amplituden: Blick von oberhalb des Kopfes auf die Elektrodenverteilung. Dargestellt ist die Topographie der P3-Amplitudenmaxima bei 340 ms, 390 ms, 400 ms und 350 ms für  $h \rightarrow H$ ,  $s \rightarrow H$ ,  $h \rightarrow S$  und  $s \rightarrow S$ . Die Werte sind für beide Tastenbelegungen gemittelt. Jede Übersicht ist skaliert vom Minimum in Schwarz zum Maximum in Weiß.

Für die Untersuchung der P3 wurden die Messungen der Elektroden FCz, Cz, CPz und Pz herangezogen, da die Amplituden dort am größten waren. Wie in der Hypothese für die Experimente formuliert, reichten sich die Kombinationen s→H und h→S prima vista zwischen die große Amplitude durch s→S und die kleinste der vier Amplituden h→H ein. Die gemittelten P3-Amplitudenwerte sind in Abbildung 5 dargestellt. Man kann konstatieren, dass einerseits der Lösungsbuchstabe einen Effekt auf die P3 hatte, größere Amplituden wurden bei Erscheinen des seltenen Buchstabens erzeugt:  $F_{1,15} = 98,3$ ,  $p < ,001$ . Andererseits hatte die Vorhersage des Buchstabens einen Einfluss auf die P3:  $F_{1,15} = 30,1$ ,  $p < ,001$ . Konkreter erzeugte die Vorhersage des seltenen Buchstabens eine größere P3-Amplitude als die Vorhersage des häufigen Buchstabens. Die Interaktion von Vorhersage und Lösung ( $F_{1,15} = 8,8$ ;  $p = ,01$ ) zeigt, dass sich dieser Effekt der Vorhersage stärker auf den häufigen Lösungsbuchstaben auswirkte, veranschaulicht an dem größeren Abstand zwischen h→H zu s→H als h→S zu s→S in Abbildung 4. In der ANOVA zeigte sich dementsprechend für die Vorhersagehäufigkeit bei Analyse des häufigen Buchstaben als Lösung  $F_{1,15} = 45,2$ ,  $p < ,001$  und für die Vorhersagehäufigkeit bei Analyse des seltenen Buchstaben als Lösung  $F_{1,15} = 8,8$ ,  $p = ,009$ . Jedoch wurde dieser Effekt durch die Tastenbelegung modifiziert.



*Abbildung 5: Über die Probanden gemittelten Amplituden (in  $\mu\text{V}$ ) der P3-Amplitudenmaxima für die vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen auf der x-Achse. Die durchgezogene Linie entspricht den Durchgängen mit konstanter Tastenbelegung. Die gestrichelte Linie entspricht den Durchgängen mit alternierender Tastenbelegung. Die y-Achse ist in Analogie zu den vorherigen Abbildungen invertiert.*

Die P3-Amplituden waren über CPz und Cz signifikant größer als über Pz und FCz:  $F_{3,45} = 5,7$ ,  $p = ,02$ . Das kleinere P3-Maximum des häufigen Lösungsbuchstabens hatte einen posterioren Fokus über CPz und Pz. Das Maximum der P3, das durch den seltenen Lösungsbuchstaben erzeugt wurde, fand sich zentral bzw. weiter anterior über Cz und CPz. Dadurch kam es zu einer Interaktion zwischen Ableitungsort und Häufigkeit des Lösungsbuchstabens  $F_{3,45} = 6,9$ ;  $p = ,01$ .

Es gab weiterhin eine Interaktion zwischen der Tastenbelegung, der Häufigkeit des Lösungsbuchstabens und der Häufigkeit des vorhergesagten Buchstabens,  $F_{1,15} = 7,0$ ,  $p = ,02$ . Diese Wechselwirkung lässt sich einerseits in den Effekt von konstanter versus alternierender Tastenbelegung bei den vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen auflösen. Dabei zeigte sich, dass die P3-Amplituden in der alternierenden Versuchsbedingung bei drei der vier möglichen Kombinationen aus Vorhersage und Lösung größer waren als in der Bedingung mit konstanter Tastenbelegung. Nämlich bei dem häufigen Lösungsbuchstaben ( $F_{1,15} = 3,8$ ,  $p = ,07$ ) in beiden Varianten,  $h \rightarrow H$  und  $s \rightarrow H$ , und auch bei dem seltenen Lösungsbuchstaben bei Vorhersage des seltenen Buchstabens ( $s \rightarrow S$ ). Für die Vorhersage des häufigen Ereignisses mit der Lösung des seltenen Buchstabens ( $h \rightarrow S$ ) zeigte sich jedoch für die konstante Tastenbelegung die größere P3-Amplitude im Vergleich zur alternierenden Variante ( $F_{1,15} = 6,4$ ,  $p = ,02$ ).

Andererseits lässt sich diese Wechselwirkung auflösen in den Effekt von häufiger versus seltene Vorhersage bei den beiden Lösungen unter den beiden Tastenbelegungen. Dabei zeigten sich größere P3-Amplituden nach der seltenen Vorhersage als nach der häufigen Vorhersage bei der häufigen Lösung unter beiden Tastenbelegungen (konstant:  $F_{1,15} = 2,1$ ,  $p = ,17$ ; alternierend:  $F_{1,15} = 53,0$ ,  $p < ,001$ ) und bei seltenen Lösungen unter alternierender Tastenbelegung ( $F_{1,15} = 14,4$ ,  $p = ,002$ ), aber nicht unter konstanter Tastenbelegung ( $F_{1,15} = 2,1$ ,  $p = ,17$ ).

Die Tastenbelegung zeigte die Tendenz zur Interaktion mit der Vorhersagehäufigkeit und dem Ableitort ( $F_{3,45} = 3,0$ ,  $p = ,06$ ), da bei seltenem Lösungsbuchstaben und alternierender Tastenbelegung das P3-Signal bei Cz und CPz etwa gleich groß war, und bei konstanter Tastenbelegung bei Cz etwas größer als bei CPz.

### 3.3.5 Korrelation zwischen Lösungshäufigkeit und P3-Amplituden

Um zu zeigen, dass die P3-Amplituden sich gemäß den individuellen Vorhersagemustern der Versuchspersonen verhielten, wurden Korrelationskoeffizienten berechnet. Für die Berechnungen wurden die Messungen der CPz Elektrode verwendet und dabei die Werte für beide Varianten der Tastenbelegungen zusammengefasst. Es zeigte sich, dass mit abnehmender Häufigkeit der Lösung die Stärke des P3-Signals zunahm. Für den einseitigen p-Wert ergab sich zwischen  $h \rightarrow H$  zu  $s \rightarrow H$   $r(14) = -0,56$ ,  $p = ,01$ ; von  $s \rightarrow H$  zu  $h \rightarrow S$   $r(14) = -0,50$ ,  $p = ,02$ ; von  $h \rightarrow S$  zu  $s \rightarrow S$   $r(14) = -0,42$ ,  $p = ,06$ .

### 3.4 Diskussion Experiment 1

Die Art der Tastenbelegung, konstant oder alternierend, spielte keine wesentliche Rolle. Die Ergebnisse der P3-Messungen waren in den beiden Versuchsmodi extrem ähnlich, ebenso die Anteile der vorhergesagten seltenen und häufigen Buchstaben. Es zeigten sich in 3 der 4 Kombinationen wie angenommen größere P3-Amplituden in der alternierenden Bedingung, was für eine bessere Etablierung von Reiz und Antwort Verbindungen durch bewusstere Tasteneingabe spricht. Möglicherweise kann deshalb auch die Vorhersage während der alternierenden Tasteneingabe einen stärkeren Einfluss auf die P3 nehmen. Dadurch bedürfen die zu vergleichenden Kombinationen weniger ( $h \rightarrow S$ , häufigere Verbindung) bzw. mehr ( $s \rightarrow S$ , seltener aktive Verbindung) Reaktivierung, was sich im Amplitudenunterschied zwischen beiden während der alternierenden Tastenbelegung zeigt.

Die gleiche Tendenz in beiden Tastenbelegungsmodi spricht gegen einen wesentlichen Effekt der rein motorischen Eingabe auf die P3. Dies deckt sich mit Ergebnissen einer anderen Arbeit (O'Connell u. a., 2012), in der unter anderem eine passive mit einer aktiven Reizdetektionsaufgabe verglichen wurde. Dort zeigte sich ebenso, dass das Verhalten der P3b-Amplitude nicht von der motorischen Aktion abhängig ist. Die motorische Aktion wurde dort durch die Aktivität des motorischen Kortex im Beta-Band nachverfolgt. Bei Aufgaben mit Eingaben mittels Fingerdruck wuchs die P3 und sank das Beta-Band kontinuierlich und hatten ihr positives respektive negatives Maximum zum Zeitpunkt der Tasteneingabe. In gleichem Aufgabendesign aber gedanklichem Mitzählen von Zielreizen zeigte sich für die P3 das gleiche Verhalten wie in der aktiven Aufgabe, das Beta-Band zeigte kein mit dem Zählen korrespondierendes Maximum, sondern seine Spannung fiel über die Zeit eines Durchgangs kontinuierlich ab.

Die Reaktionszeiten zwischen Aufforderung zum Raten und der Tasteneingabe für die Vorhersage hatten ebenfalls keine Bedeutung für die Messung. Obwohl die Reaktionszeit im Mittel bei der alternierenden Tastenbelegung länger war als bei konstanter Belegung und bei der alternierenden Variante die Reaktionszeiten für die Vorhersage von häufigen und seltenen Buchstaben unterschiedlich war, hatte dies keinen entscheidenden Effekt auf die P3-Amplituden.

Die ansteigende SPN zwischen der Vorhersage und dem Erscheinen der Lösung war nicht für die P3-Amplitude verantwortlich. Es gab nur eine Einflussnahme der Vorhersagehäufigkeit auf die SPN bei der seltenen Vorhersage in der konstanten Versuchsdurchführungsbedingung. Da sich dieser Effekt über den anterioren Ableitorten über dem Motorkortex und nur in der konstanten Bedingung bemerkbar machte, ist eine mögliche Erklärung, dass eine Hand selten und die andere Hand häufig benutzt wurde im Gegensatz zu der alternierenden Versuchsbedingung, in der beide Zeigefinger gleich häufig zum Einsatz kamen. Ansonsten hatte die SPN ihren Fokus über den posterior-lateralen Ableitorten (PO3, PO4). Dies erscheint sinnvoll, interpretiert man dies als die „Erwartungshaltung“ der Testperson, die auf einen visuellen Stimulus (in Form des Ergebnisses) wartet, um die eigene Leistung (in Form des Ratens) zu überprüfen (Brunia, Van Boxtel, 2001).

Es zeigte sich als maßgeblichstes Ergebnis, dass die während der Durchgänge des ersten Experiments gemessenen P3-Amplituden nicht nur durch die Häufigkeit des Reizes im Sinne des Oddball-Paradigmas bestimmt wurden, da sich wie angenommen die P3-Amplituden anhand der Vorhersage-Lösungs-Kombinationen aufspalteten. Bevor geschlossen werden kann, dass auch die Häufigkeit der Vorhersage einen Einfluss auf die P3 ausübt und damit die Annahme gestützt wird, dass in der P3 Spuren der Vorhersage enthalten sind, soll im zweiten Experiment durch Verwendung von einfarbigen Ergebnisanzeigen sicher gestellt werden, dass nicht die unterschiedlichen Farben im ersten Experiment für die Unterschiede in den P3-Amplituden verantwortlich gemacht werden können.

## 4 Experiment 2

### 4.1 Vorbemerkung

Im zweiten Experiment gab es zwei Veränderungen im Versuchsaufbau. War im vorherigen Experiment der Ergebnisbuchstabe in allen Durchgängen farblich hervorgehoben, galt dies hier nur in zwei von vier Blöcken (expliziter Teil). In den anderen beiden Versuchsblöcken erschienen die Lösungen lediglich in Schwarz. Die Probanden mussten während der Durchgänge nun ihre Vorhersage mit der Lösung gedanklich abgleichen (impliziter Teil). Damit sollte untersucht werden, ob die P3-Amplitude durch die Verbindung der Vorhersage und der Lösung zustande kam, oder lediglich durch die unterschiedlichen Farben bei richtigem oder falschem Vorhersagen. Die zweite Änderung betraf die Restriktion der Zufälligkeit, wie noch in Experiment 1 geschehen. Um einen systematischen Fehler zu vermeiden, war in Experiment 2 nun für das Steuerprogramm das Würfeln zweier seltener Buchstaben direkt hintereinander möglich. Damit belief sich die erwartete Verteilung der Wahrscheinlichkeiten nun exakt auf 80 zu 20. Ansonsten blieb die Spielanweisung in diesem Experiment der des ersten Experiments. Es war wieder in jedem Durchgang vorherzusagen, welcher Buchstabe, der häufige oder der seltene, erscheinen würde und auch alle anderen nicht erwähnten Versuchsbedingungen blieben unverändert.

### 4.2 Material und Methoden

#### 4.2.1 Probanden

16 rechtshändige Personen (9 Frauen und 7 Männer zwischen 19 und 29 Jahren, mittleres Alter 24 Jahre, SD = 3,1 Jahre) nahmen teil. Neben 14 Studenten nahmen eine Auszubildende und eine Übersetzerin teil. Ein Teilnehmer wurde durch einen weiteren studentischen Probanden ersetzt, da ersterer das Glücksspiel nicht laut Spielanweisung absolvierte. Stattdessen wählte dieser in ca. 75% der Ratevorgänge den seltenen Buchstaben, obwohl die Instruktion erneut mündlich und schriftlich lautete, tatsächlich zu raten und nicht nur oder fast nur den seltenen Buchstaben zu wählen.

## 4.2.2 Versuchsdurchführung

Zwei der vier Blöcke waren identisch mit denen der konstanten Tastenbelegung des ersten Experiments. Wie oben beschrieben, werden diese Blöcke der explizite Teil genannt, da die Farbe des Buchstabens anzeigte, ob richtig oder falsch geraten wurde. Im impliziten Teil gab es kein farbliches Feedback.

Jeder Teil bestand aus zwei Blöcken mit konstanter Tastenbelegung, in dem entweder die rechte oder die linke [STRG]-Taste für den häufigen Buchstaben stand und die andere [STRG]-Taste für den seltenen. Die Hälfte der Teilnehmer durchlief zuerst den expliziten Teil, und die andere Hälfte begann mit dem impliziten Teil. Innerhalb jedes Teilabschnittes galt für die Hälfte der Probanden zuerst die rechte [STRG]-Taste für den häufigen Buchstaben und für die andere Hälfte die linke.

## 4.2.3 Datenauswertung

Nach Entfernung der artefaktbehafteten Messungen belief sich die mittlere Anzahl der Durchgänge für explizite bzw. implizite Versuche auf 282 bzw. 269 für die  $h \rightarrow H$  Kombination (minima 205 und 129), 95 und 99 für  $s \rightarrow H$  (minima 47 und 59), 70 und 66 für  $h \rightarrow S$  (minima 41 und 37) und 24 und 25 für  $s \rightarrow S$  (minima 14 und 15).

In der Varianzanalyse wurde der Faktor Tastenbelegung durch die Art des Feedbacks (explizit, implizit) ersetzt.

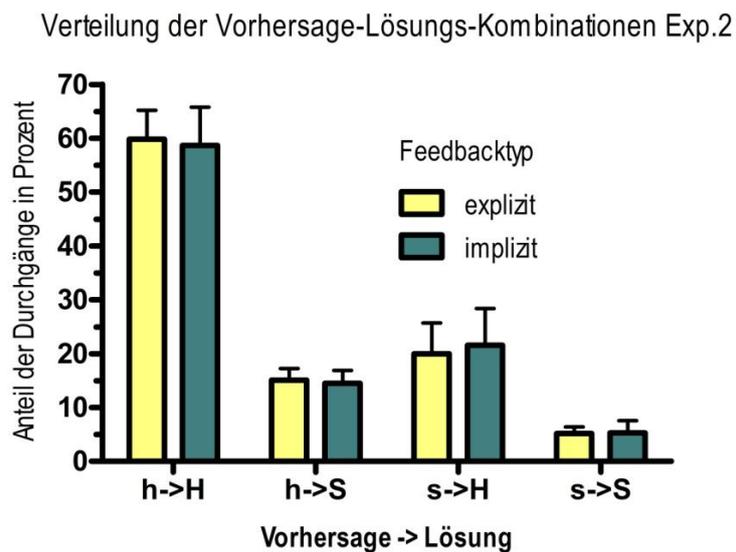
## 4.3 Ergebnisse

### 4.3.1 Verhalten der Versuchspersonen bei der Vorhersage

Die Software erzeugte wie geplant zu 80,0% die häufige Lösung ( $h \rightarrow H$  und  $s \rightarrow H$ ) und zu 20,0% die seltene Lösung ( $s \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S$ , mit einer SD  $\pm 1,1$  über die Probanden). Die Teilnehmer rieten im Mittel in 74% der Fälle den häufigen Buchstaben ( $h \rightarrow H$ ,  $h \rightarrow S$ ) und in 26% der Fälle vice versa ( $s \rightarrow S$ ,  $s \rightarrow H$ , mit einer Schwankung von  $\pm 7,2\%$ ). Der seltene Buchstabe wurde also wie in Experiment 1 häufiger vorhergesagt als er laut Statistik erschien, und der häufige Buchstabe seltener:  $F_{1,15} = 10,3$ ,  $p = ,006$ .

Abbildung 6 zeigt die vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen und deren Häufigkeiten aufgeschlüsselt nach Feedbacktyp. Es fanden sich keine Unterschiede zwischen explizitem und implizitem Feedback: Lösung x Feedbacktyp  $F_{3,45} = 1,1$ , n.s.

Für explizite und implizite Blöcke zusammengefasst ergaben sich folgende Häufigkeiten: 59%  $h \rightarrow H$ , 21%  $s \rightarrow H$ , 15%  $h \rightarrow S$  und 5%  $s \rightarrow S$ . Diese Häufigkeiten unterschieden sich global voneinander:  $F_{3,45} = 374,5$ ,  $p < ,001$  und ebenfalls in Paaranalysen:  $p = ,006$  für  $s \rightarrow H$  gegen  $h \rightarrow S$  und  $p < ,001$  für alle anderen Vergleiche.



*Abbildung 6: Gemittelte Häufigkeiten (in Prozent) für die Kombinationen aus vorhergesagtem und gewürfeltem Buchstaben. Auf der x-Achse stehen die Kleinbuchstaben „h“ und „s“ für die Vorhersage des häufigen (h) und seltenen Buchstaben (s). Die Großbuchstaben stehen für die durch die Software zufällig gewürfelte Lösung. Auf der y-Achse sind die für die Teilnehmer gemittelten Durchgänge in Prozent skaliert.*

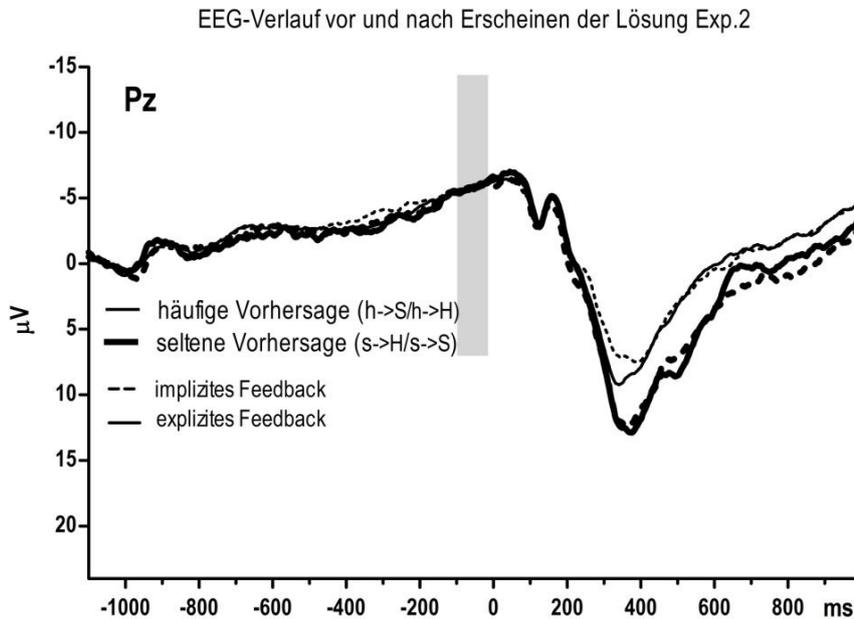
Das Erscheinen des häufigen Buchstabens wurde in 74,1 % ( $\pm 7,2\%$ ) der Fälle richtig vorhergesagt ( $h \rightarrow H$  / ( $h \rightarrow H$  &  $s \rightarrow H$ )), und das des seltenen Buchstabens in 26,2 % ( $\pm 7,8\%$ ) der Fälle ( $s \rightarrow S$  / ( $s \rightarrow S$  &  $h \rightarrow S$ )). Die Teilnehmer machten sehr unterschiedliche Vorhersagen. Der seltene Buchstabe wurde mit einer Spanne von 16% bis 45% vorhergesagt, was erneut stabile individuelle Antwortstrategien widerspiegelt: Diese korrelierten zwischen dem expliziten und dem impliziten Teil ( $r = 0,73$ ,  $p = ,001$ ).

#### 4.3.2 Reaktionszeiten

Die Reaktionszeit, die Zeit zwischen der Aufforderung zum Vorhersagen und dem Drücken der Taste, betrug im Mittel ca. 600 ms und war unabhängig vom Feedbacktyp und von der Vorhersagehäufigkeit:  $F_{1,15} \leq 0,9$ , n.s.

### 4.3.3 Ereigniskorrelierte Potentiale

In Analogie zu Abbildung 3 zeigt Abbildung 7 den Zeitverlauf zwischen der Vorhersage des Buchstabens bis 1000 ms nach Erscheinen der Lösung bei Experiment 2.



*Abbildung 7: EEG-Verläufe über Pz für die häufigen und seltenen Vorhersagen mit jeweils gemittelten seltenen und häufigen Lösungen. Die dicken Linien entsprechen seltenen Vorhersagen, die dünnen Linien entsprechen häufigen Vorhersagen. Die durchgezogenen Linien entsprechen den Durchgängen mit explizitem Feedback, die gestrichelten Linien entsprechen Durchgängen mit implizitem Feedback. Auf der x-Achse ist die Zeit in Millisekunden (ms) aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Spannung in Mikrovolt ( $\mu\text{V}$ ) aufgetragen. Die Abbildung fokussiert die Stimulus Preceding Negativity zwischen der Vorhersage bei -1000 ms und der Lösung bei 0 ms. Der graue Balken markiert den Zeitabschnitt, für den die topographische Verteilung der Amplituden dargestellt wurde.*



*h → S/h → H implizit*



*h → S/h → H explizit*



*s → S/s → H implizit*



*s → S/s → H explizit*

Topographische Verteilung der negativen Maxima zwischen 100 ms vor bis zum Erscheinen der Lösung: Blick von oberhalb des Kopfes auf die Elektrodenverteilung. Jede Übersicht ist skaliert vom negativen Maximum in Schwarz zu Null in Weiß.

Die Stimulus Preceding Negativity hatte, wie im ersten Experiment, in der Analyse der Mittellinie die größte Amplitude am Hinterkopf über POz (ANOVA für den Haupteffekt des Aufnahmeorts:  $F_{6,90} = 13,1$ ;  $p < ,001$ ). Über den seitlichen Ableitungen, PO3 und PO4, fand sich eine größere Amplitude als über POz. Die Differenz der Amplituden zwischen den Ableitorten war jedoch, im Gegensatz zu Experiment 1, nicht signifikant:  $F_{2, 30} = 2.1$ ,  $p = .14$ . Es fanden sich auch sonst keine bedeutsamen Effekte in der Analyse der PO-Ableitungen ( $F \leq 2.5$ ,  $p \geq .12$ ).

Die SPN war weder durch die Vorhersagehäufigkeit ( $F \leq 1.7$ ,  $p \geq .21$ ) noch durch den Feedbacktyp ( $F \leq 1.4$ ,  $p \geq .23$ ) beeinflusst.

#### 4.3.4 P3-Amplituden

Abbildung 8 zeigt die gemittelten EEG-Kurven vom Zeitpunkt des Aufblinkens des gewürfelten Buchstabens bis 1000 ms danach. Die gemittelten Amplituden sind zur besseren Vergleichbarkeit in Abbildung 9 dargestellt.

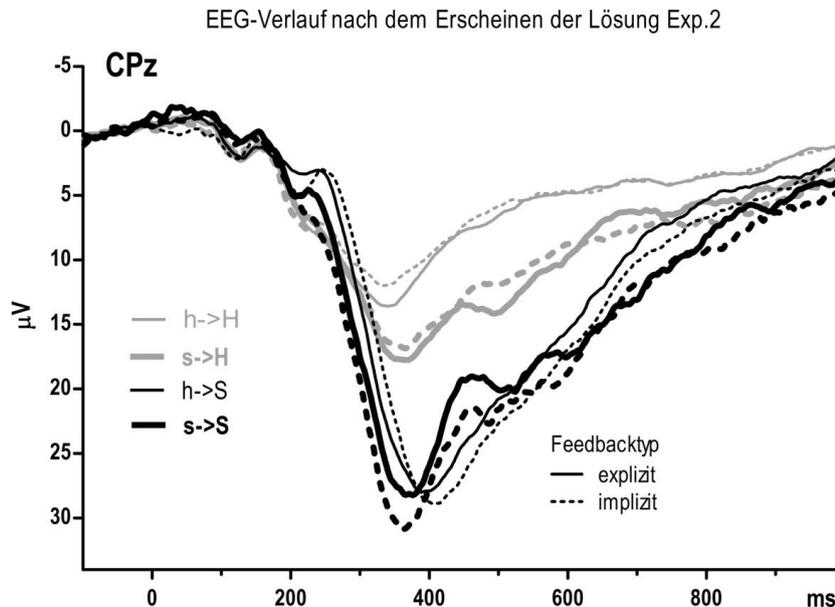
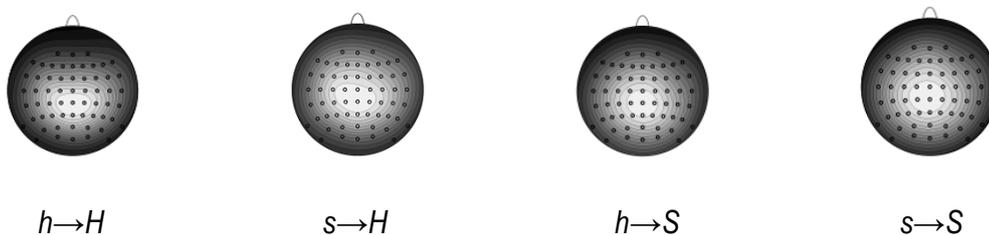


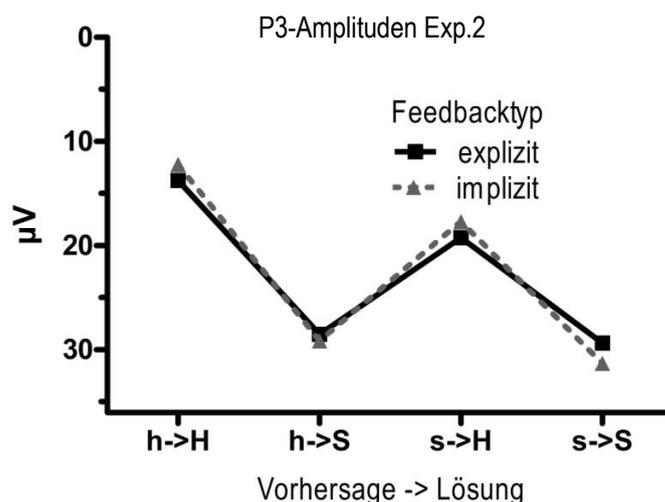
Abbildung 8: EEG Verläufe über CPz für die vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen aufgeschlüsselt nach dem Feedbacktyp. Die dicken Linien entsprechen seltenen Vorhersagen, die dünnen Linien entsprechen häufigen Vorhersagen. Die durchgezogenen Linien entsprechen Durchgängen mit explizitem Feedback, die gestrichelten Linien entsprechen Durchgängen mit implizitem Feedback. Auf der x-Achse ist die Zeit in Millisekunden (ms) aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Spannung in Mikrovolt ( $\mu\text{V}$ ) aufgetragen. Zeitpunkt des Erscheinens der Lösung bei 0 ms.



Topographische Verteilung der P3-Amplituden: Blick von oberhalb des Kopfes auf die Elektrodenverteilung. Dargestellt ist die Topographie der P3-Amplitudenmaxima bei 340 ms, 370 ms, 390 ms und 380 ms für h->H, s->H, h->S und s->S. Die Werte sind für beide Tastenbelegungen gemittelt. Jede Übersicht ist skaliert vom Minimum in Schwarz zum Maximum in Weiß.

Die P3-Amplituden waren über CPz am größten und über FCz am kleinsten:  $F_{3,45} = 5,5$ ,  $p = ,02$ . Es kam dabei mit keinem Faktor zu einer Interaktion:  $F_{3,45} \leq 1,7$ ,  $p \geq 0,21$ . Es hatte einerseits einen Einfluss auf die P3, ob der gewürfelte Buchstabe der häufige oder seltene war ( $F_{1,15} = 123,1$ ,  $p < ,001$ ). Andererseits spielte die Häufigkeit des vorhergesagten Buchstaben eine Rolle ( $F_{1,15} = 23,7$ ,  $p < ,001$ ). In beiden Fällen waren die Amplituden bei der seltenen Variante im Vergleich zu der häufigen größer. Die beiden Faktoren, Vorhersagehäufigkeit und Lösungshäufigkeit, interagierten miteinander:  $F_{1,15} = 8,9$ ,  $p = ,009$ . Hier präsentierte sich der Effekt der Vorhersage ähnlich wie im ersten Experiment. Bei der Analyse des Haupteffektes von Vorhersagehäufigkeit separat für den häufig gewürfelten Buchstabe als Lösung zeigte sich  $F_{1,15} = 43,8$ ,  $p < ,001$ . Die Vorhersage hatte also große Auswirkungen auf die P3, wenn der häufige Buchstabe als Lösung erschien. Bei separater Analyse der Vorhersagehäufigkeit für die seltene Lösung ergab sich kein signifikanter Effekt:  $F_{1,15} = 1,8$ , n.s.

Der Feedbacktyp hatte keinen Einfluss auf die Vorhersagehäufigkeit. Für die möglichen Kombinationen der potentiell interagierenden Faktoren galt:  $F \leq 1,1$ ,  $p \geq 0,36$ . Die einzige Interaktion unter Beteiligung des Feedbacktyps war mit der Lösungshäufigkeit:  $F_{1,15} = 7,2$ ,  $p = ,02$ . Die P3 war, wie in Abbildung 8 zu sehen, bei dem häufigen Buchstaben als Lösung und implizitem Feedback kleiner als beim expliziten Feedback:  $F_{1,15} = 3,2$ ,  $p = 0,10$ . Für den seltenen Buchstaben als Lösung galt dies jedoch nicht:  $F_{1,15} = 1,1$ , n.s.



*Abbildung 9: Über die Probanden gemittelten Amplituden (in µV) der P3-Amplitudenmaxima für die vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen auf der x-Achse. Die durchgezogene Linie entspricht den Durchgängen mit explizitem Feedback. Die gestrichelte Linie entspricht den Durchgängen mit implizitem Feedback. Die y-Achse ist in Analogie zu den vorherigen Abbildungen invertiert.*

#### 4.3.5 Korrelation zwischen Lösungshäufigkeit und P3-Amplituden

Für die Untersuchung der Korrelation wurden erneut die Messungen von CPz benutzt. Die Daten wurden für beide Feedbacktypen gemittelt. Die inverse Korrelation zwischen Vorhersage und P3-Amplitude war für die Differenz von  $h \rightarrow H$  and  $s \rightarrow H$  signifikant:  $r(14) = -0.55$ ,  $p = .01$  (einseitiger Test). Keine signifikante Korrelation ließ sich für die Differenzen zwischen  $s \rightarrow H$  und  $h \rightarrow S$  berechnen:  $r(14) = -0.22$ , n.s. Dasselbe galt für  $h \rightarrow S$  und  $s \rightarrow S$ ,  $r(14) = -0.20$ , n.s.

Um herauszufinden, warum sich bei den beiden letztgenannten Beziehungen keine signifikante Korrelation ergab, wurden separate Berechnungen für die Korrelation durchgeführt. Für die separate Berechnung nach Feedbacktyp war eine Korrelation zwischen der Lösungshäufigkeit und der P3-Amplitude für den expliziten Block zu finden:  $r(14) = -0.49$ ,  $p = 0.03$  für  $h \rightarrow H - s \rightarrow H$ ;  $-0.34$ ,  $p = 0.10$ , für  $s \rightarrow H - h \rightarrow S$ ;  $-0.5$ ,  $p = 0.3$ , für  $h \rightarrow S - s \rightarrow S$ . Dagegen erzeugt beim impliziten Feedback nur die erste große Differenz zwischen  $h \rightarrow H$  und  $s \rightarrow H$  diese Korrelation:  $r(14) = -0.51$ ,  $p = .02$ . Für die Differenzen  $s \rightarrow H - h \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S - s \rightarrow S$  ergab sich  $-0.10$ , n.s. bzw.  $-0.07$ , n.s.

#### 4.4 Diskussion

Die P3-Amplituden bei der Vorhersage des seltenen Buchstaben und der Lösung des häufigen Buchstabens ( $s \rightarrow H$ ) waren größer als die Kombination häufiger Buchstabe geraten und erschienen ( $h \rightarrow H$ ). Dies galt für beide Formen des Feedbacks. So lässt sich, die Diskussion von Experiment 1 aufgreifend feststellen, dass die P3 die durch die Buchstabenreize erzeugt wurde Informationen der Vorhersage enthält. Auch in Experiment 2 wurden die P3-Amplituden weder durch die SPN erzeugt, noch hatte die Reaktionszeit einen nennenswerten Einfluss.

Es ist bemerkenswert, dass ungeachtet der Vorhersage, der häufige Lösungsbuchstabe beim expliziten Feedback größere P3-Amplituden erzeugte als bei implizitem. Das explizite Feedback per se kann für diesen Effekt verantwortlich sein oder die Farbe, die so auf das Ergebnis stärker aufmerksam machte. Für die zweite Variante sprechen die Ergebnisse aus zitierten Arbeit Verleger, Baur, Metzner und Śmigasiewicz. Hier kam es zu einem größeren Oddballeffekt, wenn ein farbiger Rahmen relevant für die Antwortauswahl war im Vergleich zur Antwortauswahl ohne Relevanz der Farbe (Verleger u. a., 2014a). Für das seltene Ereignis gab es diesen signifikanten Unterschied in der P3-Amplitude der beiden Feedbackmodi nicht. Mutmaßlich war der seltene Buchstabe als Ereignis für sich so hervorspringend, dass die Farbe keinen zusätzlichen Effekt hatte.

## 5 Diskussion beider Experimente

Es lässt sich feststellen, dass nicht der Stimulus allein verantwortlich für die Größe der P3-Amplitude ist, da sich in den Experimenten sonst lediglich ein Oddballeffekt, also eine große Amplitude nach Erscheinen der seltenen Lösung und eine kleine Amplitude nach dem Erscheinen der häufigen Lösung, unabhängig von der Vorhersage ergeben hätte. Statt dessen zeigte sich die Aufteilung in die Vorhersage-Lösungs-Kombinationen, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass nicht nur der Stimulus, sondern auch die Vorhersage des Stimulus einen Einfluss auf die P3-Amplitude nahm.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der Arbeit von Tueting u.a. 1970. Die Ergebnisse von damals sind allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, da die Messungen der lediglich vier Probanden an vier verschiedenen Tagen erhoben wurden. In derselben Arbeit wurde festgestellt, dass zwar die Tendenz der Amplitudengrößen gleichbleibt, aber über die Zeit an absoluter Größe abnimmt. Wenn nun die vier Experimentierkonditionen unter den vier Probanden über vier Tage alternierten, können dadurch geringere Unterschiede verloren gehen. Ohnehin belaufen sich die Unterschiede der P3-Amplituden zwischen  $s \rightarrow H$  und  $h \rightarrow S$  in der zitierten Arbeit auf unter  $5 \mu V$  mit Messmethoden und die Registrierung geschah mit nur vier Elektroden. Die damals verwendeten Elektroden befanden sich an den Positionen Cz, Fz, eine Elektrode mittig zwischen Cz und T3 und die Referenzelektrode am linken Ohrfläppchen. Die hier verwendete Methode der Mittellinienanalyse ist die genauere, da hier vier verschiedene Elektrodenpositionen (CPz, Pz, FCz, Cz) zur Ermittlung der P3-Amplitudengröße herangezogen werden konnten, was auch der beschriebenen parietozentralen Positivität der P3 entspricht (Huang u. a., 2015). Jedoch wurden die Messungen der Cz-Elektrode im damaligen als auch im heutigen Experiment verwendet, sodass davon auszugehen ist, dass die grundsätzlichen Aussagen der Ergebnisse übereinstimmen. Dennoch lassen sich mit den genannten unterschiedlichen Bedingungen Unterschiede in den Ergebnissen erklären. Die Größe der P3-Amplituden der Kombinationen  $s \rightarrow H$  und  $h \rightarrow S$  scheinen im Vergleich zu den Ergebnissen hier vertauscht (vergleiche dazu S.389 Abbildung 3 in Tueting u. a. 1970). Entscheidend ist jedoch, dass es auch damals zu einer Aufspaltung in die verschiedenen Vorhersage-Lösungs-Kombinationen kam.

Dieses Faktum kann auch als ein Hinweis dafür gewertet werden, dass bei den jetzigen Ergebnissen die Bezahlung, die es im damaligen Versuch nicht gab, kein wesentlicher Faktor war. Dennoch gibt es nachgewiesene Effekte durch die Höhe der monetären Belohnung, die, umso größer sie ausfällt, eine größere P3-Amplitude erzeugen kann (Bellebaum u. a., 2010;

Sato u. a., 2005; Yang u. a., 2013). Das träfe in der vorliegenden Arbeit für die richtigen Vorhersagen zu, nicht jedoch für die falsch vorhergesagten Buchstaben. Dennoch ergab sich hier nach der Verteilung der Amplitudengrößen keine Reihenfolge, die sich mit der Bezahlung konsistent erklären lässt, da die Amplitude  $h \rightarrow H$  inklusive 2 Cent Gewinn kleiner war als  $s \rightarrow H$  und  $h \rightarrow S$  ohne Gewinn. Um größtmögliche wissenschaftliche Sicherheit zu erhalten, könnte man die durchgeführten Experimente in Gruppen mit und ohne Bezahlung, mit einem anderen Anreizsystem statt des Geldes oder einer ausdifferenzierteren Geldstaffelung durchführen, um Effekte der Bezahlung weiter zu untersuchen.

Es folgt die Frage, wenn es denn eine Beeinflussung der P3-Amplitude durch die Vorhersage gibt, welcher Regelmäßigkeit diese dann unterliegt. Eine Möglichkeit wäre eine Gesetzmäßigkeit, die auf der Richtigkeit der Vorhersage oder auf dem Gegenteil, der falsch getroffenen Vorhersage, beruht. Dazu existiert eine widersprüchliche Studienlage. Es finden sich Arbeiten, die die „feedback-related negativity“ (FRN) untersuchen. Die FRN, eine vor allem frontozentrale Negativierung mit einem Maximum zwischen 250 ms und 350 ms (Meng, Ma, 2015), ist ebenfalls Gegenstand aktueller Diskussionen. Sie wird für die schnelle Evaluation eines Feedbacks verantwortlich gemacht (Zheng u. a., 2015). Dabei wurde bezüglich der P3 festgestellt, dass sie größer nach einer falschen Vorhersage ist (Hajcak u. a., 2005, 2007). In anderen, jüngeren Studien ebenfalls zur FRN fanden sich bei richtiger Vorhersage größere P3-Amplituden als bei falscher (Bellebaum u. a., 2010; Gentsch u. a., 2013; Yang u. a., 2013; Zheng u. a., 2015) und es finden sich Veröffentlichungen, die der P3 attestieren, sich bei richtigen oder falschen Vorhersagen nicht zu unterscheiden (Sato u. a., 2005; Yeung, 2004). Aus dieser Widersprüchlichkeit der Studienlage und den schon erläuterten Ergebnissen der hier vorgestellten Arbeit (kleinste Amplitude bei richtiger Vorhersage  $hH$ , größte Amplitude bei richtiger Vorhersage  $sS$  und bei falschen Vorhersagen intermediäre P3-Amplituden) lässt sich schlussfolgern, dass sich der Einfluss der Vorhersage nicht aus der Richtigkeit oder Fehlerhaftigkeit derselben per se erklären lässt. Es muss andere Faktoren geben, die den Zusammenhang der Vorhersage und der P3-Amplitude erklären.

In der Arbeit von Tueting, u. a. (1970) wird vermutet, dass das relative Risiko bei der Vorhersage entscheidend für den Zusammenhang mit der P3 ist. Das relative Risiko meint die Gewinnwahrscheinlichkeit der Vorhersage. Wird also mit hohem Risiko bzw. geringer Wahrscheinlichkeit des Eintretens vorhergesagt, entsteht eine große P3-Amplitude. Ist das Risiko niedrig, die Eintretenswahrscheinlichkeit groß, ist eine kleine P3-Amplitude ableitbar (Tueting u. a., 1970). Diese Erklärung lässt sich bedingt auch auf die vorliegenden Ergebnisse anwenden.

Für den häufigen Stimulus findet sich eine größere P3-Amplitude bei der risikoreicheren Vorhersage des seltenen Buchstabens ( $s \rightarrow H$ ), eine kleinere bei der wahrscheinlicheren Vorhersage des häufigen Buchstabens ( $h \rightarrow H$ ). Bei der ersten Ergebnisinterpretation schien sich bei dem seltenen Stimulus ein umgekehrter Effekt zu zeigen. Die richtige Vorhersage ( $s \rightarrow S$ ) war, wenn man nur die P3-Amplituden fokussierte, größer als die falsche Vorhersage ( $h \rightarrow S$ ), dies war aber lediglich über FCz und Fz signifikant. Es wurde jedoch ein Folgeexperiment durch Verleger und Kollegen durchgeführt, bei dem eine Standardoddballaufgabe mit einem Oddballexperiment, in dem zusätzlich mittels Tastendruck die Stimuli vorherzusagen waren, verglichen wurde (bisher nicht veröffentlichte Arbeit). Hier zeigte sich, dass eine fronto-zentral ausgeprägte, negative Komponente bei 250 ms in den Durchgängen  $h \rightarrow S$  mit konsekutiv verringerter P3-Amplitude für diesen Effekt verantwortlich war und sich demnach kein signifikanter Amplitudenunterschied zwischen  $s \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S$  ergab. Unter Einbeziehung dieser Erkenntnisse fällt diese negative Komponente auch in Experiment 1 auf, die den scheinbaren Amplitudenunterschied zwischen  $h \rightarrow S$  und  $s \rightarrow S$  erklären kann. Für die Analyse der Faktoren Vorhersagehäufigkeit und seltene Lösung der beiden Kombinationen bei konstanter Tastenbelegung im ersten Experiment, ebenso im zweiten ( $F_{1,15} = 1.8$ , n.s) fand sich kein signifikanter Unterschied. Möglicherweise handelt es sich bei der Negativierung um die bereits erwähnte „feedback-related negativity“ (FRN). Man kann schlussfolgern, dass im Falle des seltenen Stimulus der Prozess der zur großen P3-Amplitude führt, bei falscher genauso wie bei richtiger Vorhersage angestoßen wird.

Die Vorhersagehäufigkeit und die Lösungshäufigkeit hatten also keinen additiven Effekt auf die P3. Die seltene Vorhersage hatte einen großen Effekt auf die durch den häufigen Buchstaben ausgelöste P3-Amplitude, jedoch keinen signifikanten Effekt auf die große P3-Amplitude ausgelöst durch den seltenen Lösungsbuchstaben. Diese Ergebnisse ähneln den Ergebnissen der Arbeit von Munson u. a., 1984. Dort war in einer Reihe von Durchgängen zu raten, ob ein Ton zu hören sein würde oder nicht. Daraufhin folgte dann eine der beiden Möglichkeiten (Ton oder Stille). Vergleichbar mit dieser Arbeit wurde die kleine P3-Amplitude, ausgelöst durch eine Kette kontinuierlicher Stimuli, deutlich größer, wenn diese Stimuli falsch vorhergesagt wurden, entsprechend der Ereignis-Lösungs Kombination  $s \rightarrow H$  in der vorliegenden Arbeit. Änderte sich in einer kontinuierlichen Stimulusserie plötzlich der Reiz, hatte die Vorhersage (korrespondierend zum jetzigen  $s \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S$ ) auch damals keinen wesentlichen Einfluss. Es scheint so, als ob es für den seltenen Reiz eine Obergrenze für den möglichen Effekt auf die P3-Amplitude gäbe. Im Falle des häufigen Stimulus kann die Vorhersage einen verstärkenden Einfluss auf die P3 ausüben, im Falle des seltenen Stimulus wird offensichtlich der P3-initiiierende Prozess so oder so angestoßen und kann nicht zusätzlich durch die Vorhersage verstärkt werden.

Es stellt sich die Frage, welcher Prozess für das Zustandekommen der P3 verantwortlich ist. Die fundamentale Erkenntnis aus den Anfangsjahren der EKP-Forschung, dass die Häufigkeit eines aufgabenrelevanten Stimulus und die Reihenfolge aufeinanderfolgender Reize wichtige Determinanten der P3-Amplitude sind (Sutton u. a. 1965; Donchin, 1981; Munson u. a., 1984), gilt nach wie vor und ist hier erneut reproduziert worden ( $S > H$ , konkreter  $s \rightarrow S/h \rightarrow S > s \rightarrow H/h \rightarrow H$ ). Aus diesen Rahmenbedingungen entwickelte Donchin die Idee, dass ein Individuum bei Reizneuheit der Umgebung sein neuronales Modell entsprechend aktualisieren muss und sich hinter dem Prozess, der zur P3 führt, eine strategische Informationsverarbeitung der Reizumgebung steckt (Donchin, 1981). Der Beweis, dass nicht nur der Stimulus, sondern auch die Vorhersage einen Einfluss auf die P3-Amplitude hat, falsifiziert dieses Konzept nicht in toto, man kann es jedoch erweitern. In Donchins Auffassung existiert zwar ein „neuronales Modell“ über die Reizumgebung, d. h., es besteht quasi eine mentale Vorhersage über die kommenden Reizsituation. Diese „Vorhersage“ spielt aber erst eine Rolle, wenn sie von dem gebahnten neuronalen Modell abweicht, nämlich wenn sich die Reizumgebung ändert. Dazu heißt es bei Donchin: *„It is the degree to which the event requires a revision of the model, not its inherent attributes, that is the crucial determinant of P300“* (aus Donchin, 1981; S. 508). Im hier durchgeführten Versuch ließ sich jedoch ein Effekt der Vorhersage auf die P3 zeigen, ohne dass sich die Reizumgebung änderte, wenn nämlich die seltene Vorhersage gemacht wurde und der häufige Buchstabe erschien ( $s \rightarrow H$ ).

Es ließe sich vermuten, dass durch die Aufforderung, eine Vorhersage zu machen, der Reiz eine emotionale Bedeutung erhält. Ähnlich argumentierten Carrillo-de-la-Peña, Cadaveira, 2000, die neben einer Verkürzung der Reaktionszeiten eine Vergrößerung der P3-Amplitude durch motivierende Instruktionen vor der Aufgabe nachwiesen. Allerdings sollte man davon ausgehen, dass sich dieser Effekt durch die Motivation dann nicht nur partiell auf eine bestimmte Kombination ( $h \rightarrow S$ ) überträgt, sondern beispielsweise für alle seltenen Vorhersagen gelten könnte. Goyer und Kollegen hatten versucht, durch Pokerjetons bei Gewinnen in einer Spielaufgabe die Motivation der Versuchsteilnehmer zu erhöhen. Allerdings führten hier Belohnung und Niederlage zu gleichen P3-Amplituden, woraus sie ableiteten, dass es keinen *psychologischen* Effekt der Motivation auf die P3 gebe (Goyer u. a., 2008). Letztlich vermischen sich die Begrifflichkeiten Motivation und Aufgabenrelevanz, die so gesehen zur Wahrnehmung der auslösenden Stimuli beitragen und sich damit amplifizierend auf die P3 auswirken (Nieuwenhuis u. a., 2005).

Neben der prinzipiellen Feststellung, dass die Vorhersage einen Effekt auf die P3-Amplitude ausübt (da  $s \rightarrow H > h \rightarrow S$ ) und der Oddballeffekt zu Tage trat ( $S > H$ ), sollte die durch die Anwendung der Stimulus-Response Link Hypothese gemachten Annahme  $s \rightarrow S > h \rightarrow S > s \rightarrow H > h \rightarrow H$  überprüft werden. Tatsächlich ergab sich folgende Amplitudenreihenfolge:  $s \rightarrow S = h \rightarrow S$  und damit  $s \rightarrow S/h \rightarrow S > s \rightarrow H > h \rightarrow H$ . Obwohl also die Verbindung  $s \rightarrow S$  seltener gebraucht wurde als  $h \rightarrow S$ , ergab sich kein signifikanter Unterschied im Vergleich beider Verbindungen. Die Annahme gemäß der Stimulus-Response Link Hypothese, die die P3b als Ausdruck der Reaktivierung einer inaktiven Reiz-Antwort-Verbindung sieht (Verleger u. a., 2014d, 2014b, 2015b), konnte die P3-Amplituden also nicht vollständig richtig vorhersagen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass der Einfluss der Vorhersage bei der seltenen Lösung begrenzt ist und lediglich die Reaktivierung zwischen Reiz und mentaler Antwort im Vordergrund steht. Es scheint zumindest zulässig, von Reiz-Reaktions-Verbindungen zu sprechen oder einer mentalen Reaktion, in der eine Testperson nach Erscheinen des Stimulus analysiert, ob sie richtig oder falsch geraten hat. Diese interne Analyse könnte als Reaktion gesehen werden, so wie sie auch in passiven Oddballexperimenten nach Reizpräsentation stattfindet (Ferrari u. a., 2010; Wronka u. a., 2008).

Im Licht dieser Erkenntnisse kann der Einfluss der Vorhersage auf die P3 nun Verschiedenes bedeuten. Es ist vorstellbar, dass die häufige Vorhersage letztlich keine bewusste Vorhersage darstellte, sondern den statistisch gesehenen Normalzustand und von den Testpersonen eher als Fortsetzung der Aufgabe bis zum erneuten Raten des seltenen Buchstabens gesehen wurde. Sollte diese Annahme zutreffen, hätten die Maßnahmen, das Vorhersagen spannend zu halten (vor allem die alternierende Tastenbelegung) ihre Wirkung verfehlt. Man sähe also nur den Oddballeffekt ( $s \rightarrow S/h \rightarrow S > h \rightarrow H$ ). Diese Annahme bliebe eine Antwort für die intermediäre Amplitudengröße  $s \rightarrow H$  schuldig.

Mit der Anwendung eines weiteren Ansatzes, der bisher keine Erwähnung gefunden hat, könnte man diese intermediäre Amplitude interpretieren. Nieuwenhuis und Kollegen legten für die sogenannte „Decision Hypothese“ die physiologische Grundlage. Sie sehen einen Zusammenhang zwischen der P3 und dem Locus coeruleus. Der Locus coeruleus (LC) ist ein Kerngebiet im Hirnstamm, der die ausschließliche Quelle von Noradrenalin für den Hippocampus und vor allem den Neokortex darstellt, Regionen die maßgeblich an kognitiven Prozessen beteiligt sind. Die Neurone des LC haben dabei zwei verschiedene Modi. Eine tonische Aktivität mit geringer, aber sehr regelmäßiger Frequenz der Noradrenalinausschüttung und eine phasische Aktivität mit einer hohen, aber zeitlich begrenzten Frequenz der

Noradrenalinausschüttung (Berridge, Waterhouse, 2003). Nieuwenhuis und Kollegen sehen nun in der P3 das Korrelat der phasischen Aktivität der LC Neurone, die immer dann stattfindet, wenn ein aufgabenrelevanter Entscheidungsprozess stattfindet. Das Noradrenalin erhöht die Empfindlichkeit der kortikalen Neurone, es kommt zu einem veränderten Ionenabfluss im Soma der Zellen und einem Ionenstrom an den apikalen Dendriten nahe der Hirnoberfläche, was sich in einem positiven EEG-Ausschlag bemerkbar macht (Nieuwenhuis u. a., 2005). Für diese These führt Nieuwenhuis unter Analyse verschiedener Veröffentlichungen unterschiedliche Argumente ins Feld. So sind die Vorbedingungen für die Auslösung der P3 und der phasischen LC-Aktivität nahezu identisch (bevorzugte Auslösung durch unerwartete Reize mit hoher Relevanz für die Versuchsperson). Überdies lässt sich die P3-Amplitude systematisch durch Pharmaka modifizieren, die die Noradrenalinausschüttung beeinflussen, wie beispielsweise Clonidin. Anatomisch gesehen, argumentiert Nieuwenhuis des Weiteren, projiziert der LC in die Regionen, die auch als Generatoren für die P3 bestimmt worden sind (Nieuwenhuis u. a., 2011). Ausgehend von der Theorie, dass die P3 mit dem Entscheidungsprozess zusammen hängt, erdachten O'Connell und Kollegen einen Versuchsaufbau, die dieser Grundrichtung enormen Vorschub leistete. Das Novum dieser Arbeit war, dass anders als bisher Reize nicht plötzlich präsentiert wurden, sondern graduelle Veränderungen durchliefen. So wurde unter anderem ein Kreis gezeigt, dessen Kontrastveränderungen durch die Teilnehmer bemerkt werden sollte (anstatt eines neuen Symbols in einer Reihe von gleichen Symbolen) oder es galt, die Lautstärke oder Frequenzänderung eines Tones zu detektieren (anstatt eines neuen Tones in einer Reihe von gleichen Tönen). Diese Technik hatte den Vorteil, dass keine sensorisch evozierten Potentiale durch neue Stimuli die Messung der P3 erschwerten. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die P3 gleichsam mit der sensorischen Sicherheit über den Beginn des Zielreizes wuchs. Das P3-Maximum war dann zeitlich identisch mit der Entscheidung, dass der Zielreiz eingetreten ist. Daraus wurde abgeleitet, dass die P3 eine supramodale (also eine von der Art der sensorischen Information unabhängige) Entscheidungsvariable darstellt, die auch ohne offene Verhaltensreaktion messbar ist.

Dabei spiegelt sie nicht die Verarbeitung vor oder nach der Entscheidung wider, sondern bildet letztlich die Entscheidung selbst ab (O'Connell u. a., 2012). Die Ansätze und Ergebnisse wurden in Folgearbeiten bestätigt (Kelly u. a., 2013.; Twomey u. a., 2015) und stehen damit dem Standpunkt Donchins gegenüber, der schrieb: „*The P300 is not related to the actions the subject is taking in response to the stimulus eliciting the P300 [...]. I shall assume that the process manifested by the P300 is not elicited for the purpose of tactically responding [...] but rather to what I called strategic information processing. This is the information processing that will affect the manner in which we respond to future stimuli*“ (aus Donchin, 1981; S. 507).

Um die Erkenntnisse der Arbeiten von O'Connell und Kollegen und die Ideen der S-R Link Hypothese besser überprüfen zu können, wäre es möglich, die Idee der graduellen Reizpräsentation mit dem Vorhersageparadigma zu kombinieren. Daraus könnten sich andere P3-Verläufe ergeben.

Es bleibt die P3-Amplituden unter den Gesichtspunkten der S-R Link Hypothese und der Decision Hypothese zu interpretieren. Bei der intermediären Amplitude sH scheint es durch die Wahrnehmung des Ergebnisses zu einer Abschwächung der P3-Amplitude zu kommen. Eine seltene S-R Verbindung ist bei Wahl der seltenen Vorhersage im Begriff reaktiviert zu werden, die P3b-Amplitude steigt, wird dann aber durch das Erscheinen des häufigen Ergebnisses gemindert oder um mit den Begrifflichkeiten O'Connells zu sprechen, die sensorische Sicherheit für den Entscheidungsprozess hat abgenommen und die P3-Amplitude wird schwächer. Somit wären die Ergebnisse ein Resultat aus der Integration der S-R Link Hypothese und der Decision Hypothese ( $s \rightarrow S/h \rightarrow S > s \rightarrow H > h \rightarrow H$ ).

Eine andere Deutung wäre, den Prozess der Entscheidung, wie er hier stattgefunden hat, revers zu verstehen. Hier ist nicht auf einen Reiz mit einer Reaktion zu reagieren, sondern es findet eine Reaktion in Form der Vorhersage statt, und dann folgt ein Ergebnis und dennoch steht die P3 sozusagen bidirektional als Prozess zwischen beiden Enden der Entscheidungskette. Allerdings wird diese Interpretation beim Vergleich der Amplituden sH und hH unscharf. Die seltenere Vorhersage ( $s \rightarrow H$ ) ist die unsicherere Entscheidung, damit würde dann die unsichere Entscheidung zu einer größeren Amplitude führen. Laut O'Connell müsste die P3b zum Zeitpunkt der Entscheidung (im Moment der Vorhersage) aber am größten sein, und in seiner alternativen Aufgabe mit unterschiedlich schwer zu detektierenden Reizen produzierte die erschwerte Erkennung (bei dem geringsten Kontrastunterschied) die kleinste P3-Amplitude (O'Connell u. a., 2012).

Gleichgültig wie die Vermessung stattfindet, wird die Funktionszuschreibung von Spannungsverläufen zu neurokognitiven Prozessen etwas an Komplexität und damit an Wahrheitsgehalt verlieren. Dies zeigt sich auch daran, dass die P3 eine Relevanz gegenüber einer Vielzahl von kognitiven Operationen besitzt (Twomey u. a., 2015). Ein Wert der hier erzielten Ergebnisse liegt in der fortgeführten Aufdeckung der Verschiedenartigkeit der Einflussfaktoren der P3 über den reinen Stimulus hinaus und der Notwendigkeit, die Zusammenhänge um die P3 weiter zu untersuchen.

## 6 Zusammenfassung

Die P3, die dritte positive Welle eines ereigniskorrelierten Potentials im EEG, ist in ihrer Bedeutung nicht vollständig verstanden. Verschiedene Interpretationen der Rolle der P3 finden sich in verschiedenen Theorien wieder. Die hier diskutierten Theorien sind die Context Updating Hypothese, bei der vor allem eine Aktualisierung der Reizumgebung für die P3 entscheidend ist, die Stimulus-Response Link Hypothese, in der die Aktivität einer Reiz-Reaktionsverbindung für die P3 entscheidend ist und die Decision Hypothese, die die P3 als Korrelat der Entscheidung selber sieht. Im Speziellen sollte die Anwendbarkeit der S-R Link Hypothese auf ein Ratespiel mit ungleichen Chancen geprüft werden, da dort nicht auf einen Stimulus zu reagieren ist. Die Hypothese laut der S-R Link Hypothese war eine Aufspaltung der P3b-Amplituden für die vier Vorhersage-Lösungs-Kombinationen nach der Häufigkeit ihrer Benutzung, da interne Antworten („falsch geraten“ oder „richtig geraten“) mit jeder Kombination assoziiert sind. Seltene Vorhersage/seltene Lösung ( $s \rightarrow S$ ) > häufige Vorhersage/seltene Lösung ( $h \rightarrow S$ ) > seltene Vorhersage/häufige Lösung ( $s \rightarrow H$ ) > häufige Vorhersage/häufige Lösung ( $h \rightarrow H$ ).

In zwei Experimenten rieten die Versuchspersonen, ob ein häufiger (80,0%) oder ein seltener (20,0%) Buchstabe erscheinen würde. Richtiges Raten wurde mit 2 Cent für den häufigen und 8 Cent für den seltenen Buchstaben belohnt. In Experiment 1 gab es einen Modus mit konstanter und einen mit alternierender Tastenbelegung. In Experiment 2 gab es einen Modus mit farbllichem Feedback (explizit), wie auch durchgängig in Experiment 1 und einen Modus ohne farblliches Feedback (implizit).

Die Ergebnisse beider Experimente waren nahezu identisch. Es kam die P3-Amplituden betreffend zu einer Aufspaltung in verschiedene Vorhersage-Lösungs-Kombinationen, allerdings mit gleich großen Amplituden für  $s \rightarrow S$  und  $h \rightarrow S$  ( $s \rightarrow S/h \rightarrow S > s \rightarrow H > h \rightarrow H$ ). Der Prozess hinter der P3 scheint im Falle der seltenen Lösung in jedem Fall angestoßen zu werden, womit der Einfluss der Vorhersage schwindet. Die Vorhersage spielte vor allem im Falle der häufigen Lösung eine Rolle und kann mit der S-R Link Hypothese erklärt werden.

Unter zu Hilfenahme der Decision Hypothese kann man die Amplitude  $s \rightarrow H$  auch als abgeschwächt durch die Abnahme der sensorischen Sicherheit interpretieren. Allerdings bedarf es weiterer Experimente, die die Technik der graduellen Reizrepräsentation mit alten Versuchskonzepten kombinieren, um konkretere Vorhersagen für die P3 machen zu können. Die Fragen zur Bedeutung und zu den Einflussfaktoren der P3 sind nach wie vor nicht abschließend geklärt und bedürfen weiterer experimenteller Untersuchung.

## 7 Literaturverzeichnis

- Bellebaum, C.; Polezzi, D.; Daum, I. (2010):** „It is less than you expected: The feedback-related negativity reflects violations of reward magnitude expectations“. In: *Neuropsychologia*, 3343–3350
- Berridge, C. W.; Waterhouse, B. D. (2003):** „The locus coeruleus–noradrenergic system: Modulation of behavioral state and state-dependent cognitive processes“. In: *Brain Research Reviews*, 33–84
- Bledowski, C. (2004):** „Localizing P300 Generators in Visual Target and Distractor Processing: A Combined Event-Related Potential and Functional Magnetic Resonance Imaging Study“. In: *Journal of Neuroscience*, 9353–9360
- Bramon, E.; Shaikh, M.; Broome, M.; u. a. (2008):** „Abnormal P300 in people with high risk of developing psychosis“. In: *NeuroImage*, 553–560
- Brunia, C. H. M.; Van Boxtel, G. J. M. (2001):** „Wait and see“. In: *International Journal of Psychophysiology*, 59–75
- Bundesärztekammer, BÄK (2006):** Langfassung der Stellungnahme zum "Aufmerksamkeitsdefizit- / Hyperaktivitätsstörung (ADHS)". Kapitel 1 "Definition und Klassifikation", S. 5
- Carrillo-de-la-Peña, M.T.; Cadaveira, F. (2000):** „The effect of motivational instructions on P300 amplitude“. In: *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 232–239
- Casanova, M.; Baruth, J.; El-Baz, A.; u. a. (2012):** „Repetitive transcranial magnetic stimulation (RTMS) modulates Event-Related Potential (ERP) indices of attention in autism“. In: *Translational Neuroscience*, 1-19
- Debener, S.; Makeig, S.; Delorme, A.; u. a. (2005):** „What is novel in the novelty oddball paradigm? Functional significance of the novelty P3 event-related potential as revealed by independent component analysis“. In: *Cognitive Brain Research*, 309–321
- Donchin, E. (1981):** Surprise!...Surprise?. In: *Psychophysiology*, 493-513

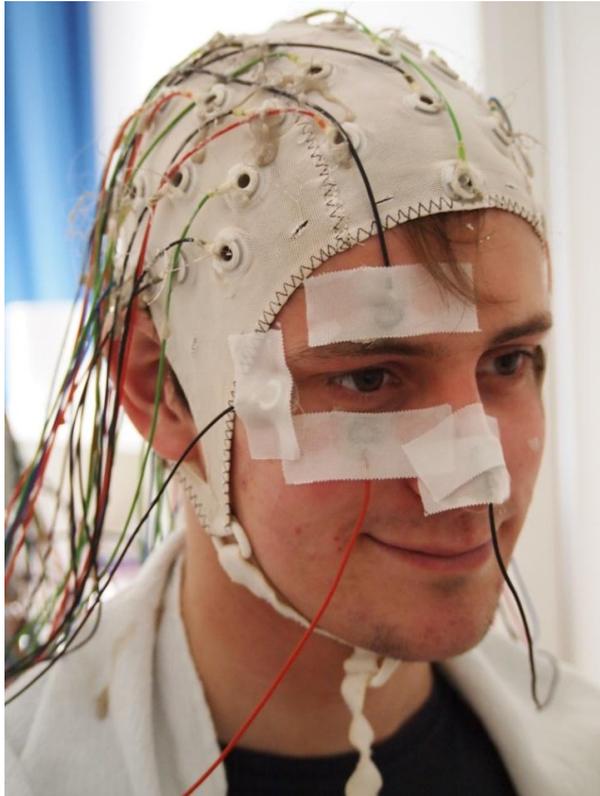
- Duncan-Johnson, C., Donchin, E. (1977):** On Quantifying Surprise: The Variation of Event-Related Potentials With Subjective Probability. In: *Psychophysiology*, 456-467
- Ferrari, V.; Bradley, M.; Codispoti, M.; u. a. (2010):** „Detecting Novelty and Significance“. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 404–411
- Friedman, D., Cycowicz, Y., Gaeta, H. (2001):** The novelty P3: an event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. In: *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 355-373
- Gaeta, H.; Friedman, D.; Hunt, G. (2003):** „Stimulus characteristics and task category dissociate the anterior and posterior aspects of the novelty P3“. In: *Psychophysiology*, 198-208
- Gentsch, K.; Grandjean, D.; Scherer, K. (2013):** „Temporal dynamics of event-related potentials related to goal conduciveness and power appraisals: Sequential processing of appraisal checks“. In: *Psychophysiology*, 1010-1022
- Goyer, J. P.; Woldorff, M. G.; Huettel, S. A. (2008):** „Rapid electrophysiological brain responses are influenced by both valence and magnitude of monetary rewards“. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2058-2069.
- Gunji, A; Goto, T.; Kita, Y. u. a. (2013):** „Facial identity recognition in children with autism spectrum disorders revealed by P300 analysis: A preliminary study“. In: *Brain and Development*, 293-298
- Hajcak, G.; Holroyd, C.; Moser, J. S.; u. a. (2005):** „Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes“. In: *Psychophysiology*, 161-170
- Hajcak, G.; Moser, J. S.; Holroyd, C. B.; u. a. (2007):** „It's worse than you thought: The feedback negativity and violations of reward prediction in gambling tasks“. In: *Psychophysiology*, 905 -912
- Hruby, T.; Marsalek, P. (2002):** „Event-related potentials-the P3 wave“. In: *Acta neurobiologiae experimentalis*, 55-63
- [https://www.dimdi.de/static/de/export\\_header.htm](https://www.dimdi.de/static/de/export_header.htm); abgerufen am 10.05.2015
- Huang, W. J.; Chen, W. W.; Zhang, X. (2015):** „The neurophysiology of P 300 – an integrated review“. In: *European review for medical and pharmacological sciences*, 1480-1488.

- Kamp, S.-M.; Brumback, Ty; Donchin, E. (2013):** „The component structure of ERP subsequent memory effects in the Von Restorff paradigm and the word frequency effect in recall: ERP components in the Von Restorff paradigm“. In: *Psychophysiology*, 1079-1093
- Kelly, S.; Redmond, G.; O'Connell, R (2013):** "Internal and External Influences on the Rate of Sensory Evidence Accumulation in the Human Brain". In: *Journal of Neuroscience*, 19434-19441
- Luck, S. J. (2005):** *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*. 2. Auflage, Cambridge, The Mit Press; ISBN: 9780262621960; Kapitel 1, Seite 28
- Meng, L; Ma, Q. (2015):** „Live as we choose: The role of autonomy support in facilitating intrinsic motivation“. In: *International Journal of Psychophysiology*
- Munson, R., Ruchkin, D., Ritter, W., Sutton, S., Squires, N. (1984):** The Relation of P3b to prior events and future behavior. In: *Biological Psychology*, 1-29
- Nieuwenhuis, S.; Aston-Jones, G.; Cohen, J. D. (2005):** „Decision making, the P3, and the locus coeruleus--norepinephrine system.“. In: *Psychological Bulletin*, 510-532
- Nieuwenhuis, S.; De Geus, E. J.; Aston-Jones, G. (2011):** „The anatomical and functional relationship between the P3 and autonomic components of the orienting response: P3 and orienting response“. In: *Psychophysiology*, 162-175
- O'Connell, R. G.; Dockree, P. M.; Kelly, S. P. (2012):** „A supramodal accumulation-to-bound signal that determines perceptual decisions in humans“. In: *Nature Neuroscience*, 1729-1735
- Paehge, T. (2006):** *Die verschiedenen P300-Komponenten und deren Topographie*. Dissertation am Institut für Neurologie am UKSH Lübeck
- Polich, J. (2007):** „Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b“. In: *Clinical Neurophysiology*, 2128-2148
- Rohani, D. A.; Sorensen, H. ; Puthusserypady, S. (2014):** „Brain-computer interface using P300 and virtual reality: A gaming approach for treating ADHD“. In: *Engineering in Medicine and Biology Society*, 3606-3609

- Sato, A.; Yasuda, A.; Ohira, H.; u. a. (2005):** „Effects of value and reward magnitude on feedback negativity and P300“. In: *Neuroreport*, 407-411
- Saville, C.W.N.; Dean, R.O.; Daley, D.; u. a. (2011):** „Electrocortical correlates of intra-subject variability in reaction times: Average and single-trial analyses“. In: *Biological Psychology*, 74-83
- Seifert, J. (2005):** *Ereigniskorrelierte EEG-Aktivität*. 1. Aufl. Lengerich: Pabst Science Publishers. ISBN: 9783899672367. Kapitel 4: "Entstehung von spontanem und ereigniskorreliertem EEG" S. 21 und Kapitel 12: "Beschreibung von Ereigniskorrelierten Potentialen" S. 98
- Sokhadze, E. M.; Baruth, J. M.; Sears, L.; u. a. (2012):** „Event-Related Potential Study of Attention Regulation During Illusory Figure Categorization Task in ADHD, Autism Spectrum Disorder, and Typical Children“. In: *Journal of Neurotherapy*, 12-31
- Stone, J. L.; Hughes, J. R. (2013):** „Early history of electroencephalography and establishment of the American Clinical Neurophysiology Society“. In: *Journal of Clinical Neurophysiology*, 28-44
- Sutton, S., Braren, M., John, E. R., Zubin, J. (1965):** Evoked-Potential Correlates of Stimulus Uncertainty. In: *Science*, 1187-1188
- Tueting, P., Sutton, S., Zubin, J. (1970):** Quantitative evoked potential correlates of the probability of events. In: *Psychophysiology*, 385-394
- Turetsky, B. I.; Dress, E. M.; Braff, D. L.; u. a. (2015):** „The utility of P300 as a schizophrenia endophenotype and predictive biomarker: Clinical and socio-demographic modulators in COGS-2“. In: *Schizophrenia Research*, 53-62
- Twomey, D. M.; Murphy, P. R.; Kelly, S. P.; u. a. (2015):** „The classic P300 encodes a build-to-threshold decision variable“. In: *European Journal of Neuroscience*. 42, 1636-1643
- Tye, C.; Asherson, P.; Ashwood, K. L.; u. a. (2014):** „Attention and inhibition in children with ASD, ADHD and co-morbid ASD + ADHD: an event-related potential study“. In: *Psychological Medicine*, 1101-1116
- Verleger, R.; Jaśkowski, P.; Wascher, E. (2005):** „Evidence for an Integrative Role of P3b in Linking Reaction to Perception“. In: *Journal of Psychophysiology*, 165-181

- Verleger, R. (2008):** „P3b: Towards some decision about memory“. In: *Clinical Neurophysiology*, 968-970
- Verleger, R.; Metzner, M. F.; Ouyang, G.; u. a. (2014a):** „Testing the stimulus-to-response bridging function of the oddball-P3 by delayed response signals and residue iteration decomposition (RIDE)“. In: *NeuroImage*, 271-280
- Verleger, R.; Baur, N.; Metzner, M. F.; u. a. (2014b):** „The hard oddball: Effects of difficult response selection on stimulus-related P3 and on response-related negative potentials: Oddball-P3 and S-R mapping“. In: *Psychophysiology*, 1089-1100
- Verleger, R.; Hamann, L. M.; Asanowicz, D.; u. a. (2015a):** „Testing the S–R link hypothesis of P3b: The oddball effect on S1-evoked P3 gets reduced by increased task relevance of S2“. In: *Biological Psychology*, 25-35
- Woodman, G. F. (2010):** „A brief introduction to the use of event-related potentials in studies of perception and attention“. In: *Attention, Perception & Psychophysics*, 2031-2046
- Wronka, E.; Kaiser, J.; Coenen, A. M. (2008):** „The auditory P3 from passive and active three-stimulus oddball paradigm“. In: *Acta neurobiologiae experimentalis*, 362-372.
- Wronka, E.; Kaiser, J.; Coenen, A. M. (2013):** „Psychometric intelligence and P3 of the event-related potentials studied with a 3-stimulus auditory oddball task“. In: *Neuroscience Letters*, 110-115
- Yang, Q.; Gu, R.; Tang, P.; u. a. (2013):** „How does cognitive reappraisal affect the response to gains and losses?: Cognitive reappraisal affects outcome evaluation“. In: *Psychophysiology*, 1094-1103
- Yeung, N. (2004):** „Independent Coding of Reward Magnitude and Valence in the Human Brain“. In: *Journal of Neuroscience*, 6258-6264
- Zheng, Y.; Li, Qi; Wang, K.; u. a. (2015):** „Contextual valence modulates the neural dynamics of risk processing: Neural dynamics of risk processing“. In: *Psychophysiology*, 895-904

## 8 Abbildungsverzeichnis



*Bild 1: Elektrodenposition im Gesicht (von rechts)*



*Bild 2: Elektrodenposition im Gesicht (von links)*

## 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 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 Studierenerweiterung von der Kommission akzeptiert. Solche Erweiterungen sind schriftlich anzuzeigen. Gibt es vom bisherigen Protokoll abweichende Interventionen oder Patienten-/Probandengruppen, ist ein neuer Ethik-Antrag zu stellen.

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

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

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

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

Ihr

Prof. Dr. med. Lucas Wessel  
Stellv. Vorsitzender

anwesende Kommissionsmitglieder:

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

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

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

## 10 Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Professor Dr. med. Thomas Münte für die Möglichkeit bedanken, dass ich die Dissertation in seiner Abteilung und die Experimente in den Räumen und mit den Gerätschaften des Instituts für Neurologie des UKSH Lübeck durchführen konnte.

Großer Dank gebührt im Besonderen meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. rer. soc. Rolf Verleger für das Bereitstellen des Themas, die Hilfe bei der Analyse und Auswertung der Daten, die immer hilfreichen und Verständnis fördernden Hinweise und Verbesserungsvorschläge beim Erstellen und Korrigieren der Arbeit und die exzellente Betreuung und ständige Erreichbarkeit.

Ebenfalls eine große Hilfe ist Frau Dr. Kamila Śmigasiewicz gewesen, die mir zusammen mit Frau Laura Heikhaus bei der Durchführung der EEG-Aufzeichnung und der Probandenbetreuung zur Seite stand und mir positive Anregungen für die Arbeit gab. Dank gilt außerdem Herrn Dr. Asanowicz bei der Interpretation der Ergebnisse.

Zuletzt gilt meine Dankbarkeit meinem Großvater, Susi, dem Rest meiner Familie und meiner Freundin Jessica, die mich immer unterstützt haben.

## 11 Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name, Vorname Werner, Lucas  
Geburtsdatum, -ort 17.04.1987, Halle (Saale)



### Schulbildung und Studium

2006 Abitur am Burggymnasium Wettin  
10/2010 Beginn Studium Humanmedizin, Universität Lübeck  
10/2011 – 08/2012 Tutor Anatomie, Universität Lübeck  
08/2012 Physikum, Universität Lübeck  
10/2012 – 10/2014 Studentische Hilfskraft in der Universitätsbibliothek Lübeck  
10/2014 – Laufend Studentische Hilfskraft in der Allgemeinchirurgie UKSH Lübeck

### Zeitraum der Dissertation

09/2013 Beginn der Arbeit an der Dissertation  
09/2013 – 07/2014 Experimentelle Untersuchungen für die Dissertation  
11/2015 Fertigstellung der Dissertationsschrift

### Publikationen

Verleger,R; Asanowicz,D; Werner,L und Śmigasiewicz (2015): Biased odds for heads or tails: Outcome-evoked P3 depends on frequencies of guesses. In: *Psychophysiology*, 52; 1048 - 1058