

Aus der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie
der Universität Würzburg

Direktor: Professor Dr. med. J. Deckert

Hirnphysiologische Korrelate der Verarbeitung interner und externer Fehler bei gesunden
Versuchspersonen unter Berücksichtigung der ERN/Ne

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg
vorgelegt von
Achim Bernhard
aus
Aschaffenburg

Würzburg, September 2008

Referent: Herr Prof. Dr. med. A. J. Fallgatter

Koreferent: Herr Prof. Dr. med. K. Reiners

Dekan: Herr Prof. Dr. med. M. Frosch

Tag der mündlichen Prüfung:

19. Oktober 2009

Der Promovend ist Arzt

Inhaltsverzeichnis	Seite
Abkürzungsverzeichnis	
1. Einleitung	1
1.1 Die ERN/Ne und Pe als ereigniskorrelierte Potentiale	1
1.2 Der Einfluss äußerer Faktoren auf die ERN/Ne und Pe	3
1.2.1 Einfluss von Reaktionsverhalten und Reaktionsergebnis	3
1.2.2 Einfluss unterschiedlicher Reizarten	5
1.2.3 Einfluss des Lebensalters	6
1.3. Hypothesen zur Entstehung der ERN/Ne und Pe	7
1.3.1 Die Theorie der Fehlererkennung	7
1.3.2 Die Theorie der Konflikterkennung	8
1.3.3 Die Theorie des Verstärkungslernens	10
1.3.4 Die funktionelle Bedeutung der Pe	14
1.3.5 Die Bedeutung der Reaktionsverlangsamung nach Falschantworten für die Fehlererkennungs- und Konflikterkennungstheorie	15
1.4 Einfluss verschiedener Erkrankungen auf die ERN/Ne und Pe	17
1.4.1 Verletzungen des präfrontalen Cortex	17
1.4.2 Zwangserkrankungen	17
1.4.3 Morbus Parkinson	18
1.4.4 Schizophrenie	20
1.4.5 Angsterkrankungen	21
1.5. Das Auftreten einer ERN/Ne nach Fehlerbeobachtung	22

	Seite
1.6 Die Vorstellung von einer „generellen“ ERN/Ne	24
1.7 Die Zielsetzung meiner Arbeit	26
2. Material und Methoden	27
2.1. Versuchspersonen	27
2.2. Versuchsparadigma	27
2.3. EEG-Aufzeichnung	29
2.4. EEG-Auswertung	29
2.5. Statistische Analysen	32
3. Ergebnisse	35
3.1. Leistungsdaten	35
3.2. ERP-Daten	36
4. Diskussion	42
5. Zusammenfassung	54
6. Literaturverzeichnis	55

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Anteriorer cingulärer Cortex
CRN	Correct response negativity (Negativer Peak im Zeitbereich der ERN/Ne nach Richtigantworten)
ERN/Ne	Error-related negativity / Error negativity (Negativer Peak um 80 ms nach Falschantworten)
EKP	Ereigniskorreliertes Potential
FMRI	Funktionelle Magnetresonanztomographie
GAS	Generalisierte Angststörung
MDS	Mesenzephales dopaminerges System
OCD	Zwangserkrankung
Pe	Error positivity (Positiver Peak nach Falschantworten)
PFC	Präfrontaler Cortex
PI	Late positivity (Später positiver Peak nach externen Fehlern)
MW	Mittelwert
SE	Standardfehler

1. Einleitung

1.1 Die ERN/Ne und Pe als ereigniskorrelierte Potentiale

Ein interessantes Teilgebiet der Elektrophysiologie beschäftigt sich mit ereigniskorrelierten Potentialen, welche abhängig von einer äußeren Einflussgröße in den Hirnströmen zu detektieren sind. Eine spezielle Variante hiervon ist die sogenannte ERN/Ne („error related negativity“, „error negativity“), eine Negativierung, die innerhalb der ersten 100 Millisekunden nach einer Falschantwort auftritt und vor allem über fronto-zentralen Bereichen des Kopfes zu finden ist. Dieser Negativierung folgt gewöhnlich ein positiver Peak („error positivity“, Pe), der vor allem zentro-parietal verteilt ist und ungefähr 250 Millisekunden nach der fehlerhaften Antwort erscheint. Verschiedene Studien zeigten, dass an der Generierung der ERN/Ne sowohl der laterale präfrontale Kortex (Gehring und Knight 2000; Kiehl et al. 2000) als auch die Basalganglien (Falkenstein et al., 2001b) beteiligt sind, da Gehirnläsionen in diesen Bereichen das Fehlerverarbeitungssystem signifikant verändern (Gehring and Knight 2000; Kiehl et al. 2000; Falkenstein et al. 2001b). Eine fMRI-Studie, die von Ullsperger und von Cramon 2001 durchgeführt wurde, konnte mehrere ERN/Ne-Foci im Frontallappen zeigen. Weiterhin konnten ERN/Ne-Potentiale ausgehend vom anterioren cingulären Cortex (ACC) identifiziert werden. Die ERN/Ne-Latenz war dabei im Parietalbereich am kürzesten, temporal etwas länger und im Frontalbereich am längsten. Insgesamt beschreiben ungefähr 95 Prozent aller bisher publizierten Arbeiten den Ursprung der ERN/Ne im ACC.

Die Pe scheint zumindest teilweise von der ERN/Ne unabhängig zu sein. Es konnte gezeigt werden, dass sie keine verzögerte stimulus-evozierte parietale P3 darstellt, sondern eher eine zweite P3, die nach einem Fehler auftritt (Falkenstein et al. 1996; Leuthold und Sommer 1999), weshalb sie möglicherweise auf bewusste Fehlerverarbeitung (Nieuwenhuis et al. 2001) oder eine Nachverarbeitung des Fehlers wie beispielsweise eine Aktualisierung von Fehlerzusammenhängen hinweisen könnte (Leuthold und Sommer 1999). Zu diesem Schluss kam man, nachdem in Strukturen außerhalb des Kortex zwar P3-Aktivität, allerdings keine Pe-Hirnströme auftraten, weshalb beide Potentiale wohl unterschiedlichen Ursprungs sind. Die Pe-Latenz war im

Parietallappen am kürzesten und im Temporallappen am längsten, worin sie sich von der ERN/Ne unterscheiden. Andererseits lässt das regelhaft gemeinsame Auftreten von ERN/Ne und Pe wiederum auf einen gemeinsamen Ursprung schließen. Bei Falschantworten war dieser Zusammenhang immer zu beobachten, während bei anderen Antwortmöglichkeiten ERN/Ne und Pe gelegentlich auch getrennt auftraten. Den Ursprung der Pe glauben die meisten Autoren, analog zur ERN/Ne, im ACC detektiert zu haben (z.B. Van Veen & Carter, 2002), was wiederum eine Gemeinsamkeit beider Komponenten aufzeigt.

1.2 Der Einfluss äußerer Faktoren auf die ERN/Ne und Pe

1.2.1 Einfluss von Reaktionsverhalten und Reaktionsergebnis

Dehaene et al. (1994) erkannten, dass die Amplitude der ERN/Ne größer ist, wenn sich die Probanden um eine möglichst genaue Antwort bemühten als wenn sie versuchten, möglichst schnell zu reagieren. Außerdem war die ERN/Ne umso größer, je kleiner die Kraft war, mit welcher die falsche Taste gedrückt wurde, je höher daher die Wahrscheinlichkeit war, den falschen Tastendruck anschließend zu korrigieren und je langsamer die Reaktionsgeschwindigkeit beim nächsten Versuch war. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass das neuronale System, das die ERN/Ne widerspiegelt, in die aktive Hemmung und Korrektur von Fehlern involviert ist, sobald diese bemerkt werden.

Experimente der gleichen Autoren ergaben eine hohe ERN/Ne nach Falschantworten, die allerdings nach richtigen Antworten nicht zu finden war. Die ERN/Ne war bei antwortbezogener Mittelung größer als bei reizbezogener Mittelung, woraus man schließen kann, dass die ERN/Ne mit relativ konstanter Verzögerung nach einer Falschantwort auftritt. Die Latenz lag hierbei, je nach Versuchsaufbau, zwischen 64 und 72 Millisekunden. Die ERN/Ne tritt damit zu früh auf, um ein sensorisches oder propriozeptives Feedback zu repräsentieren und muss daher eine interne Bewertung des Verhaltens widerspiegeln.

Das Erscheinen der ERN/Ne scheint weiterhin von einem gewissen Zeitdruck des Probanden abhängig zu sein. Dehaene et al. (1994) führten einen Versuch durch, bei welchem die Probanden sich bis zu zwei Sekunden mit der Antwort Zeit lassen konnten. In diesen Fällen trat keine ERN/Ne auf, weder unmittelbar nach dem fehlerhaften Tastendruck, noch später, wenn die Rückmeldung den Probanden über die falsche Reaktion informierte. Stattdessen führte die negative Rückmeldung zu einer breiten, vor allem frontal verteilten Positivierung (P300), die darauf schließen lässt, dass die Probanden über die vorangehende fehlerhafte Reaktion überrascht waren. Daraus kann man folgern, dass weder das Begehen eines Fehlers an sich noch das Erkennen des Fehlers ausreicht, das Erscheinen der ERN/Ne zu erklären. Die bei langsamen Reaktionen auftretende Aktivierung des anterioren cingulären Cortex,

welche man auch bei der Generierung einer ERN/Ne findet, scheint einem System zu entsprechen, welches das Reaktionsverhalten überwacht. Die Autoren gehen davon aus, dass es nur dann eingesetzt wird, wenn ein Fehler erkannt wird und genügend Zeit bleibt, ihn zu korrigieren.

ERN/Ne und Pe scheinen nicht auf eine Fehlerkorrektur falsch gegebener Antworten zurückzugehen. Dies geht z.B. aus den Ergebnissen von Falkenstein et al. (2000) hervor, die ein Paradigma mit zwei unterschiedlichen Reaktionsmöglichkeiten mit einem Go/Nogo-Paradigma verglichen. ERN/Ne und Pe traten beim Go/Nogo-Paradigma nach falschen Antworten, die ja bei „Fehlalarm“ nicht korrigiert werden können, gleichermaßen auf wie beim 2-CR (two choice reaction)-Paradigma. Zudem traten keine Amplitudenunterschiede zwischen korrigierter und nicht korrigierter Antwort auf.

Falkenstein et al. (1990, 1994) fanden außerdem eine verringerte Amplitude der ERN/Ne, wenn der Zeitdruck der Probanden zunahm. So zeigte sich bei einem Reaktionszeitlimit von 550 ms eine deutlich größere ERN/Ne als bei einem Limit von 350 ms. Gehring et al. (1990, 1993) fanden ein ähnliches Resultat: Die ERN/Ne war größer, wenn der Proband mehr auf Genauigkeit als auf Geschwindigkeit achten sollte. Unter höherem Zeitdruck scheint die Repräsentation der richtigen Antwort und so auch die Fehlererkennung abgeschwächt zu sein.

Verschiedene Arten von Fehlern scheinen ebenso das Auftreten der ERN/Ne zu beeinflussen. So erkannten Falkenstein et al., dass bei „Fehlalarm“ im Rahmen eines Go/Nogo-Paradigmas die ERN/Ne früher begann und ihr Maximum eher erreichte als beim 2-CR-Paradigma. Die Pe zeigte dagegen bei beiden Paradigmen keine Latenzunterschiede, war allerdings bei „Fehlalarm“ größer als bei einer Falschantwort des 2-CR-Paradigmas.

Weiterhin scheint der Grad der Abweichung der gegebenen Antwort von der erforderlichen Antwort die Amplitude der ERN/Ne mitzubestimmen. So führt bei einem Paradigma mit vier Antwortmöglichkeiten eine Fehlreaktion mit dem falschen Finger der richtigen Hand zu einer kleineren ERN/Ne als eine Reaktion des falschen Fingers der falschen Hand. Wenn man davon ausgeht, dass der erstgenannte Fehler kleiner ist als der letztgenannte und damit die Diskrepanz zwischen tatsächlicher und gewünschter Antwort kleiner ist, wird eine kleinere ERN/Ne verständlich (Falkenstein

et al., 1996). Die Pe zeigte dagegen keine Amplitudenveränderungen. Außerdem konnten Bernstein et al. (1995) zeigen, dass bei „Doppelfehlern“, in welche sowohl Hand als auch Fuß involviert sind, die ERN/Ne größer ist als bei Fehlern, die entweder durch Hand oder Fuß ausgelöst sind. Nach diesen Erkenntnissen ist die ERN/Ne klein, wenn der Unterschied zwischen erforderlicher und tatsächlicher Antwort gering ist, was die Fehlererkennungshypothese, die noch genauer erläutert wird, unterstützen würde.

1.2.2 Einfluss unterschiedlicher Reizarten

Falkenstein et al. (2000) verwendeten in ihren Experimenten sowohl visuelle als auch akustische Reize, konnten allerdings bezüglich der Amplitude von ERN/Ne und Pe keinerlei Unterschiede feststellen. Man konnte allerdings Differenzen sehen, wenn man visuelle und akustische Reize innerhalb einer Versuchseinheit miteinander kombinierte und durch einen Zufallsgenerator entscheiden ließ, welche Reizart jeweils erschien. Hier fand man, dass nach akustischen Reizen die Latenz der ERN/Ne gegenüber den visuellen Reizen signifikant verlängert und die Korrekturrate von Fehlern deutlich vermindert war. Verwendeten die Autoren dagegen Versuchseinheiten, die nur jeweils entweder visuelle oder akustische Reize beinhalteten, so war die Latenz der ERN/Ne zwischen den beiden Reizarten jeweils gleich, und auch die Korrekturrate falscher Antworten war in etwa vergleichbar.

1.2.3 Einfluss des Lebensalters

Weiterhin wurde auch der Einfluss des Lebensalters auf die Reaktionszeiten und die ERPs untersucht. Ältere Menschen scheinen, wenn man Alltagsbeobachtungen glauben darf, genauigkeitsorientierter zu sein als junge Menschen, und sie versuchen verstärkt, Fehler zu vermeiden. Dies könnte auf einen veränderten Fehlerverarbeitungsprozess hinweisen. Wie zuvor erwartet waren die Reaktionszeiten der älteren Probanden im Vergleich zu einer jüngeren Versuchsgruppe verlängert, während die Fehlerrate der Anzahl nach niedriger war, allerdings nicht signifikant geringer (Falkenstein et al., 2000). Die Verlangsamung der Älteren nach einer Falschantwort (post-error slowing) war deutlich größer als bei den Jungen und doppelt so groß nach akustischen im Vergleich zu visuellen Reizen. Außerdem waren die Amplituden von ERN/Ne und Pe in beiden Fällen bei den älteren Versuchspersonen deutlich vermindert. Die ERN/Ne war dann am geringsten, wenn die Korrekturrate nach Falschantworten am niedrigsten war, d.h. bei älteren Versuchspersonen und nach akustischen Reizen.

1.3. Hypothesen zur Entstehung der ERN/Ne und Pe

1.3.1 Die Theorie der Fehlererkennung

Falkenstein et al. (2000) gingen ursprünglich davon aus, dass die ERN/Ne ein Korrelat der Fehlererkennung sei, das immer dann auftritt, wenn eine erforderliche und eine tatsächlich gegebene Antwort nicht deckungsgleich sind. Demnach ist die ERN/Ne umso größer, je weniger sich die gegebene Antwort und die gesuchte Antwort ähneln, wenn der Proband fehlerhaft reagiert. In späteren Studien ergab sich jedoch auch nach korrekten Antworten eine kleine Negativierung, die der ERN/Ne sehr ähnlich war (Correct response negativity, CRN). Da jedoch auch hier ein Vergleichsprozess zwischen erforderlicher und tatsächlicher Antwort stattfindet, ist es vorstellbar, dass die ERN/Ne mehr den Vergleichsprozess an sich und weniger das resultierende Ergebnis wiedergibt. Die Pe dagegen halten die Autoren für eine weitere fehlerspezifische Komponente, die von der ERN/Ne unabhängig ist und mit später stattfindenden Aspekten der Fehlerverarbeitung assoziiert ist.

Die Fehlererkennung könnte beim Probanden jedoch den Versuch auslösen, den gerade ablaufenden Fehler zu verhindern, so dass die ERN/Ne eventuell eine mehr oder weniger erfolgreiche Fehlerhemmung widerspiegeln könnte. So wird beispielsweise bei visuellen Go/Nogo-Aufgaben in der Nogo-Bedingung gewöhnlich eine negative Komponente im Zeitbereich um 200 ms nach Reizdarbietung gesehen (N2), die wahrscheinlich einen Hemmprozess widerspiegelt. Falkenstein et al. (1999) konnten jedoch zeigen, dass die ERN/Ne und die Nogo-N2 mit der Reizart und dem Verhalten der Probanden unterschiedlich variieren, so dass man beide Komponenten definitiv voneinander unterscheiden muss. Dieser Sachverhalt widerspricht somit der Hemmungshypothese.

Das Auftreten einer kleinen ERN/Ne-ähnlichen Aktivität nach Richtigantworten widerspricht allerdings auch der Fehlererkennungstheorie. Möglicherweise war in manchen Fällen die Repräsentation der richtigen Antwort nicht vorhanden oder wurde falsch verarbeitet, oder die richtige Antwort wurde nur durch glückliches Raten erreicht. In solchen Fällen sollte eine ERN/Ne auftreten, weil eine Diskrepanz zwischen der richtigen und falschen Antwort oder eine fehlende Antwortentschlossenheit besteht.

Wenn man alle Richtigantworten mittelt, so sollte daraus eine ERN/Ne mit einer kleinen Amplitude resultieren.

Eine Alternativhypothese besteht darin, dass die ERN/Ne nicht das Ergebnis eines Vergleichsprozesses zwischen tatsächlicher und erforderlicher Antwort widerspiegelt, sondern den dabei ablaufenden Prozess selbst, da die gegebene Antwort ja in jedem Fall auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden muss. Gegen diese Hypothese spricht allerdings, dass es keinen offensichtlichen Grund gibt, warum dieser Prozess bei Falschantworten stärker sein soll als bei Richtigantworten und im ersteren Fall eine größere ERN/Ne entsteht. Eine weitere Hypothese wäre, dass die ERN/Ne-ähnliche Aktivität nach Richtigantworten tatsächlich den Vergleichsprozess an sich wiedergibt, während die ERN/Ne nach Falschantworten diesen Vergleichsprozess und zusätzlich ein überlagertes Fehlersignal beinhaltet.

1.3.2 Die Theorie der Konflikterkennung

Dagegen bevorzugen zum Beispiel Gehring et al. (2001) die Konflikterkennungstheorie (Carter et al., 1998), die davon ausgeht, dass die ERN/Ne einen Antwortkonflikt widerspiegelt. Dieser entsteht durch die gleichzeitige Repräsentanz der gegebenen Falschantwort sowie der erforderlichen Richtigantwort für kurze Zeit nach der jeweiligen Reaktion. Der Theorie zufolge vergleicht das Gehirn diese beiden Repräsentanzen miteinander. Sollten sie sich deutlich ähneln, so entsteht ein großer Antwortkonflikt, der zur Generierung einer ERN/Ne mit großer Amplitude führt. Bei geringerer Ähnlichkeit und damit geringerem Antwortkonflikt ist die Amplitude der ERN/Ne dagegen geringer ausgeprägt. Aus dieser Theorie folgt, dass die Aktivität im ACC und damit die ERN/Ne umso größer ist, je stärker sich Richtig- und Falschantwort ähneln.

Die Autoren stellen das 4-CR-Antwortverfahren infrage, mit welchem zuvor bei Bernstein et al. (1995) und Falkenstein et al. (1996) die Fehlererkennungshypothese unterstützt wurde. Sie sind der Meinung, dass zueinander angrenzende Finger wie der Zeige- und Mittelfinger, welche im 4-CR-Verfahren verwendet wurden, auf neuronaler,

muskulärer und biochemischer Ebene miteinander interagieren und damit nur eine begrenzte Aussagekraft erlauben. Daher verwendeten Gehring et al. ein Hand-Fuß-Antwortverfahren, bei welchem solche Interaktionen ausgeschlossen werden konnten. Wenn die Konflikterkennungstheorie stimmt, dann sollte die ERN/Ne groß sein, wenn sich Richtig- und Falschantwort ähneln. Dabei wurden die Falschantworten in drei verschiedene Fehlerkategorien aufgeteilt, die sich in ihrer Ähnlichkeit zur Richtigantwort unterschieden, nämlich ipsilaterale, kontralaterale und gegensätzliche Fehler. In diesem Fall wurde ein ipsilateraler Fehler auf der richtigen Körperseite ausgeführt, allerdings mit der falschen Extremität, ein kontralateraler Fehler dagegen mit der richtigen Extremität, allerdings auf der falschen Körperseite und ein gegensätzlicher Fehler sowohl auf der falschen Körperseite als auch mit der falschen Extremität. Man ging von zwei Kategorien aus, deren Antworten jeweils sehr ähnlich und in etwa gleichwertig seien, nämlich der ipsilateralen Fehler einerseits und der kontralateralen Fehler andererseits. Verglichen damit seien gegensätzliche Fehler der Richtigantwort deutlich unähnlicher. Es zeigte sich, dass bei den ipsilateralen und kontralateralen Fehlern eine deutlich größere ERN/Ne auftrat als bei gegensätzlichen Fehlern, wobei die ipsilateralen Fehler mit einer noch größeren ERN/Ne assoziiert waren als die kontralateralen Fehler. Dabei korrelierte eine veränderte ERN/Ne-Amplitude eindeutig mit einer veränderten Aktivität des ACC, wodurch deren dortiger Ursprung erneut bestätigt wird.

Die Daten von Falkenstein et al. (2000) zeigen ERN/Ne-ähnliche Aktivität auch nach richtigen Antworten. Dabei wurde nach Fehlreaktionen eine große ERN/Ne mit Maximum im Fcz-Bereich beobachtet. Auch nach Richtigantworten trat eine kleine Negativierung auf (CRN; s.o.), die ähnlich begann, jedoch einen verzögerten Peak aufwies. Diese Komponente hatte ebenfalls ein frontozentrales Maximum und wurde sowohl bei Verwendung einer Mastoidreferenz als auch bei einer Durchschnittsreferenzelektrode gesehen. Dabei hatte die ERN/Ne nach Falkenstein et al. fast die gleiche Amplitude in Aufgaben, die einen starken Antwortkonflikt beinhalteten, also beispielsweise dem Eriksen-Flanker-Task, wie bei Aufgaben ohne solchen Konflikt, beispielsweise beim 4-CR (4-choice-reaction-task). Diese Ergebnisse widersprechen damit der Konflikterkennungstheorie, welche besagt, dass die

Amplitude der ERN/Ne dann besonders groß ist, wenn die erforderliche und die tatsächlich gegebene Antwort sehr ähnlich sind.

Die Konflikterkennungstheorie wird auch durch eine Studie von Ruchow et al. (2002) infrage gestellt. Die Probanden sollten erraten, welches der vier Asse eines französischen Kartenspiels auf dem Bildschirm erscheinen wird. Das Programm gab dabei in der Hälfte der Fälle eine positive und in der Hälfte eine negative Rückmeldung, unabhängig davon, für welche Karte sich der Proband jeweils entschied. Das Paradigma beinhaltete also keinerlei Antwortkonflikt, da die Probanden sich völlig unvoreingenommen für jeweils eine bestimmte Karte entscheiden konnten. Dennoch konnte bei negativem Feedback eine ERN/Ne detektiert werden, die bei positiver Rückmeldung nicht zu finden war. Dieses Ergebnis widerspricht damit ebenfalls der Konflikterkennungstheorie.

1.3.3 Die Theorie des Verstärkungslernens

Eine dritte Theorie, die sich ebenfalls mit der Generierung der ERN/Ne beschäftigt, ist die Theorie des Verstärkungslernens. Danach geht man von zwei verschiedenen Arten der ERN/Ne aus, nämlich einer Antwort-ERN/Ne und einer Rückmeldungs-ERN/Ne (Holroyd et al., 2003). Die Antwort-ERN/Ne entsteht bei sehr schnellen Reaktionen des Probanden und tritt ungefähr 100 ms nach einem Reaktionsfehler auf. Die Rückmeldungs-ERN/Ne sei dagegen ca. 250 ms nach einem Reiz, der eine zuvor gegebene Falschantwort anzeigt, zu beobachten. Beide ERN/Ne-Komponenten scheinen von einem Fehlerverarbeitungssystem generiert zu werden, das unter anderem den ACC beinhaltet. Die Autoren gehen davon aus, dass im dopaminergen System des Mesenzephalons (MDS) ein Signal des Verstärkungslernens erzeugt wird, welches wiederum den ACC entweder enthemmt oder blockiert. Im ersten Fall würde dieser eine ERN/Ne generieren, im zweiten dagegen nicht. Die Signale des Verstärkungslernens im Mesenzephalon zeigen an, ob die gerade ablaufenden Ereignisse besser oder schlechter ausgehen werden als aufgrund bisheriger

Lernerfahrungen zu erwarten ist. Hierzu existiert in den Basalganglien ein Bewertungssystem, das die externe Information der Umgebung und das interne Verhalten des Probanden miteinander vergleicht. Aus dieser Information sagt das System voraus, ob die gerade ablaufenden Vorgänge erfolgreich oder erfolglos enden werden. Wenn das System seine Vorhersage zum Positiven hin korrigieren muss, induziert es eine erhöhte Aktivität des mesenzephalen dopaminergen Systems (MDS). Wird die Vorhersage dagegen zum Negativen hin korrigiert, vermindert sich die Aktivität des MDS. Diese positiven und negativen Signale werden vom MDS zu verschiedenen Gehirnarealen weitergeleitet, wo sie dazu verwendet werden, die Leistungsfähigkeit bezüglich der gestellten Reaktionsaufgaben zu verbessern. Außerdem werden die Fehlersignale von den Basalganglien dazu verwendet, den künftigen Ausgang des Verhaltens vorherzusagen, so dass Ereignisse, die gewöhnlich Belohnungen vorausgingen, dazu dienen, künftig Belohnungen vorherzusagen und Ereignisse, welche bisher nicht zur Belohnung führten, künftig eine fehlende Belohnung erwarten lassen. Nach der Theorie des Verstärkungslernens wird eine ERN/Ne erzeugt, wenn die Aktivität im MDS abnimmt und damit anzeigt, dass ein gerade ablaufendes Ereignis schlechter ausgeht als aufgrund der bisherigen Erfahrung zu erwarten war, was beispielsweise heißen könnte, dass nach einer bestimmten Reaktion eine negative Rückmeldung auftrat, obwohl eine positive erwartet wurde. Dies wiederum führt zur Enthemmung der Neurone des ACC im medialen präfrontalen Cortex und damit zu einer ERN/Ne. Umgekehrt hemmt eine gesteigerte Aktivität des MDS, die anzeigt, dass die ablaufenden Ereignisse besser ausgehen als erwartet, die Neurone im ACC und führt damit zu einer verminderten oder gar keiner ERN/Ne. Dies könnte der Fall sein, wenn nach einer Reaktion eine positive Rückmeldung auftritt, obwohl eigentlich eine negative erwartet wurde. Holroyd et al. (2003) versuchten in ihrer Studie, diesen Sachverhalt zu bestätigen. Dabei verwendeten sie zwei Versuchsreihen, wobei in einer hauptsächlich eine positive Rückmeldung gegeben wurde und in der anderen die Rückmeldung meist negativ ausfiel, unabhängig davon, wie der Proband tatsächlich reagierte. Sie erwarteten daher in der ersten Versuchsreihe eine große ERN/Ne, wenn die Rückmeldung negativ war, da dies den Erwartungen des MDS an eine positive Rückmeldung widerspricht. Umgekehrt sollte in der zweiten Versuchsreihe die ERN/Ne klein sein, weil sich das System hier an die negative

Rückmeldung gewöhnt haben sollte. Die Studie konnte diesen Sachverhalt bestätigen, wodurch die Theorie des Verstärkungslernens unterstützt wird.

Holroyd und Coles (2002) verwendeten ein Paradigma, das aus insgesamt sechs verschiedenen Stimuli bestand, die zu einer jeweils unterschiedlichen Rückmeldung führten. Ein Reiz hiervon führte stets zu einer positiven Rückmeldung, wenn die linke Computertaste gedrückt wurde, während bei dem zweiten Reiz hierzu die rechte Taste betätigt werden musste. Ansonsten wurde eine Falschantwort vorgegeben. Zwei weitere Reize führten, unabhängig vom Tastendruck, jeweils in der Hälfte der Fälle zu einer positiven und in der anderen Hälfte zu einer negativen Rückmeldung. Bei einem fünften Stimulus zeigte die Rückmeldung immer eine richtige Reaktion an, während beim sechsten Reiz immer eine Falschreaktion zurückgemeldet wurde. Die Autoren gingen davon aus, dass zunächst bei allen Varianten eine ERN/Ne gleichermaßen induziert wird, die sich jedoch im weiteren Verlauf individuell verändern sollte, je nachdem welcher Lernprozess jeweils möglich ist. Diese Hypothese konnte weitestgehend bestätigt werden. Bei Stimuli, welche in 50 Prozent der Fälle unabhängig vom Tastendruck zu einer positiven Rückmeldung führten, war kein wirklicher Lernprozess möglich, so dass das System jeweils auf eine Rückmeldung wartete, um die vorangegangene Reaktion zu bewerten. Daher zeigte sich eine große Feedback-ERN/Ne, während die antwortbezogene ERN/Ne klein war. Weiterhin war hier die feedbackbezogene ERN/Ne größer, wenn der Proband unmittelbar zuvor bei gleichem Reiz und gleicher Reaktion die jeweils entgegengesetzte Rückmeldung erhalten hatte als wenn die Rückmeldung mit der zuvor gegebenen identisch war. Dieser Befund zeigt, dass das neuronale System versucht, anhand der zuvor gegebenen Rückmeldung vorherzusagen, welche Reaktionsweise künftig unter gleichen Bedingungen erfolgreich sein wird.

Wenn die Rückmeldung dagegen an den Druck der linken oder rechten Computertaste gekoppelt war, so konnte das System nach einigen Versuchen die gegebene Antwort unmittelbar bewerten. Daher erschien hier eine große antwortbezogene ERN/Ne, wenn die Reaktion schlechter als erwartet ausfiel, während das Feedback absehbar war und daher nur zu einer kleinen ERN/Ne führte. Bei Reizen, welche immer zu einer positiven oder negativen Rückmeldung führten, war die ERN/Ne erwartungsgemäß sowohl antwort- als auch feedbackbezogen sehr klein, da hier beide Antwortalternativen zum

Erfolg führten und das Feedback vorausszusehen war. Da hier allerdings die ERN/Ne nicht, wie erwartet, im Laufe der Versuchsreihen auf Null zurückging, sondern konstant blieb, gehen die Autoren davon aus, dass es einen weiteren kognitiven Prozess geben muss, der darüber hinaus nach einer angemessenen Antwortstrategie sucht.

In einem weiteren Paradigma verwendeten die Autoren einen modifizierten Eriksen Flanker Task, bei welchem jeweils eine Reihe von fünf Buchstaben auf dem Bildschirm erschien. Diese bestand entweder aus fünf „H“, fünf „S“, einem „H“, das beidseits von zwei „S“ flankiert wurde, oder einem „S“, das jeweils von zwei „H“ umgeben war. Der Proband wurde dazu aufgefordert, jeweils den mittleren Buchstaben zu beachten und darauf mit einem entsprechenden Tastendruck zu reagieren. Dabei wurden die Reize, bei denen der zentrale Buchstabe mit den seitlichen identisch war, als kompatibel bezeichnet, die Reize mit nicht identischen Buchstaben als inkompatibel. Auch die Häufigkeit der Reize wurde variiert, so dass letztendlich zwischen häufigen kompatiblen, häufigen inkompatiblen, seltenen kompatiblen und seltenen inkompatiblen Reizen unterschieden werden konnte. Aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen und der Versuchsergebnisse konnte man davon ausgehen, dass die meisten Reaktionen auf die häufigen kompatiblen Reize hin richtig sein werden, da hier der Anforderungsgrad an den Probanden am geringsten ist. Das neuronale System erwartet daher unter diesen Umständen eine richtige Antwort der Versuchsperson. Auch hier war die Amplitude der ERN/Ne größer, wenn der Proband entgegen der Erwartungen des Systems falsch reagierte. Diese Tatsache bestätigt wiederum die Theorie des Verstärkungslernens. Dagegen war sich das System bei seltenen kompatiblen und seltenen inkompatiblen Reizen nicht sicher, ob die Reaktionsweise des Probanden erwünscht sein wird. Daher konnten Fehler auch nicht deutlich schlechter ausfallen als erwartet, weshalb nur eine kleine ERN/Ne generiert wurde. Insgesamt gesehen gibt es also einige Versuchsergebnisse, welche die Theorie des Verstärkungslernens bestätigen.

1.3.4 Die funktionelle Bedeutung der Pe

Neben der ERN/Ne wurde von verschiedenen Autoren die Funktion der Pe genauer untersucht. Ihre genaue Bedeutung ist jedoch weiterhin unklar. Zum einen ist sie offenbar kein Korrelat einer Korrektur zuvor begangener Fehler, da sie auch bei nichtkorrigierten Falschantworten sowie in Situationen, in denen fälschlicherweise eine Taste betätigt wurde (statt nicht zu reagieren), erschien. Auch scheint die Pe keine verzögerte stimulus-bezogene P3 zu sein, wie einige Daten belegen (Falkenstein et al., 2000). Die Pe scheint auch keine Inaktivierung oder ein Wiedererscheinen der ERN/Ne darzustellen, da ERN/Ne und Pe in vielen Beispielen unterschiedlich variierten. So war die Pe bei einigen Probanden nahezu verschwunden, während die ERN/Ne deutlich ausgeprägt war. Außerdem war die ERN/Ne bei hohem Zeitdruck der Versuchspersonen kleiner, während die Pe ihre Amplitude beibehielt. Den größten Unterschied zwischen ERN/Ne und Pe fand man, wenn man Probanden mit hoher und niedriger Fehlerrate verglich. Während die ERN/Ne keinen Amplitudenunterschied zwischen diesen Versuchspersonen zeigte, war die Pe bei Personen mit hoher Fehlerrate viel kleiner als bei solchen, denen weniger Fehler unterliefen. Eine weitere Hypothese sieht in der Pe eine zusätzliche Fehlerverarbeitung nach Fehlern, welche sich funktionell von der Fehlererkennung und Antwortüberprüfung unterscheidet, die wiederum von der ERN/Ne repräsentiert werden. Solche zusätzlichen Verarbeitungsprozesse könnten beispielsweise die bewusste Fehlererkennung sein, die Anpassung der Antwortstrategien nach einem Fehler oder die subjektive oder emotionale Bewertung des Fehlers. Da die Pe allerdings bei einigen Probanden gänzlich fehlte, scheint sie nicht auf eine bewusste Fehlererkennung zurückzugehen, da es unwahrscheinlich ist, dass diese Probanden ihre eigenen Fehler nicht bemerkten. Auch eine Anpassung der Antwortstrategie scheint nicht durch die Pe repräsentiert zu werden, da gerade ältere Probanden, die nach einem begangenen Fehler ihre Antwortstrategien sehr genau überdachten, nur eine sehr kleine Pe aufwiesen. Eine weitere Hypothese betrachtet die Pe als eine emotionale oder subjektive Fehlerbewertung. Für diese Hypothese spricht, dass Versuchspersonen, die oft Fehler machten und für welche damit ein Fehler weniger subjektiv oder emotional bedeutsam war, eine kleinere Pe zeigten als Probanden, die nur selten falsch reagierten. Auch

zeigten Probanden, die lange übten und damit stärker an auftretende Fehlreaktionen gewöhnt waren, eine kleinere Pe. Andererseits zeigt die besonders ausgeprägte Verlangsamung, die bei älteren Versuchspersonen nach einem Fehler zu beobachten war, dass gerade diese von auftretenden Fehlern stärker beeinflusst werden, was sich in einer vergrößerten Pe ausdrücken sollte. Da dies jedoch nicht der Fall war, kann zumindest dieser Alterseffekt die Hypothese nicht überzeugend bestätigen. Falkenstein et al. (2000) glauben, dass die Pe wahrscheinlich eine Fehlerbewertung darstellt, obwohl auch diese Hypothese nicht gänzlich überzeugt.

1.3.5 Die Bedeutung der Reaktionsverlangsamung nach Falschantworten (post-error slowing) für die Fehlererkennungstheorie und Konflikterkennungstheorie

Befürworter der Fehlererkennungstheorie und Konflikterkennungstheorie glauben, dass der Grad der Reaktionsverlangsamung unmittelbar nach einer Falschantwort in direktem Zusammenhang zur ERN/Ne-Aktivität der unmittelbar vorangehenden Fehlreaktion stehe (Coles et al, 1995; Botvinick et al, 2001). Gehring et al. (2001) erkannten, dass die gegebenen Richtigantworten der Probanden zunehmend schneller wurden, bis schließlich eine Falschantwort auftrat. Die Richtigantwort nach einem Fehler war dann deutlich langsamer als die sonstigen Falsch- und Richtigantworten. Um zu erkennen, ob die ERN/Ne mit dieser Verlangsamung assoziiert war, verglichen Gehring et al. Sequenzen, in denen die Verlangsamung klar zu erkennen war mit solchen, in denen sie nur gering ausgeprägt war oder gar nicht auftrat. Dieses Vorgehen führte zu zwei verschiedenen Segmentgruppen, von denen die eine eine deutliche Verlangsamung nach einem Fehler aufwies, während sich bei der anderen keine oder nur eine sehr geringe Verlangsamung zeigte. Dabei war zu erkennen, dass die ERN/Ne, die schnellen korrekten Antworten vorausging, der ERN/Ne vor langsamen richtigen Antworten praktisch vollständig gleich. Somit konnte davon ausgegangen werden, dass

die Reaktionsverlangsamung nach einer Falschantwort nicht mit deren ERN/Ne-Amplitude assoziiert ist. Diese Feststellung widerspricht somit sowohl der Fehlererkennungs- als auch der Konflikterkennungstheorie. Allerdings werden die Theorien dadurch auch nicht widerlegt, da die Verlangsamung nach einer Falschantwort vielleicht gar keine strategische Reaktion auf einen Fehler ist, wie einige Autoren behaupten (Rabbitt and Rodgers, 1977; Botvinick et al., 2001). Beispielsweise könnten einige unmittelbar der Falschantwort folgende Reaktionen eine Fortsetzung der zusammengebrochenen Verarbeitung darstellen, die den Fehler verursachte. Weiterhin könnten bei kurzen Intervallen zwischen den Reaktionen des Probanden Kapazitätsgrenzen bei der Fehlerverarbeitung auftreten, die mit der Verarbeitung der unmittelbar folgenden Reaktion interferieren.

Andererseits gibt es Studien, in denen ein Zusammenhang zwischen der ERN/Ne-Amplitude der vorangehenden Fehlreaktion sowie dem post-error slowing der darauffolgenden Richtigreaktion beschrieben wird, so beispielsweise bei Botvinick et al. (2001) und Coles et al. (1995). In der Studie der letzteren Autoren war die Amplitude der ERN/Ne der unmittelbar vorausgehenden Falschantwort zu dem Grad der Reaktionsverlangsamung der nachfolgenden Richtigantwort proportional: Je größer die ERN/Ne-Amplitude der vorangehenden Fehlreaktion, desto länger war die Reaktionszeit der unmittelbar folgenden Richtigantwort. Das gleiche Resultat war bei einem kombinierten Choice/Go-No-go Task (Scheffers et al.) zu erkennen. Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen der ERN/Ne-Amplitude der vorangehenden Falschantwort einerseits, sowohl bei einem Auswahlparadigma als auch einem Go/No-go task, sowie der Zeit bis zum Beginn der elektromyographischen Aktivität der nachfolgenden Richtigantwort andererseits, beobachtet. Dabei war die Reaktionszeit der nachfolgenden Richtigantwort umso länger, je größer die ERN/Ne der vorangehenden Falschantwort ausgeprägt war. Somit gibt es Studien, die für und die gegen einen Zusammenhang zwischen der ERN/Ne und dem post-error slowing sprechen.

1.4 Einfluss verschiedener Erkrankungen auf die ERN/Ne und Pe

1.4.1 Verletzungen des präfrontalen Cortex

Das Fehlerverarbeitungssystem kann offenbar durch verschiedene Krankheiten und Verletzungen des Gehirns verändert werden. Wenn der präfrontale Cortex (PFC) verletzt wurde, konnte die typische ERN/Ne-Amplitudendifferenz zwischen richtigen und falschen Antworten nicht mehr detektiert werden (Gehring et al., 2000). Die ERN/Ne war hier für Richtig- und Falschantworten etwa gleich stark ausgeprägt. Dagegen war die Amplitude, welche nach Falschantworten auftrat, bei Gesunden und Patienten mit PFC-Schädigung etwa gleich groß. Daher ist davon auszugehen, dass der PFC an dem betreffenden Regelkreis, der den ERN/Ne-Unterschied zwischen Richtig- und Falschantwort verursacht, beteiligt ist. Weiterhin müssen die PFC der beiden Hemisphären miteinander kommunizieren, um die bekannte ERN/Ne zu generieren, da schon die Beschädigung des PFC einer Hirnhälfte ausreicht, um die ERN/Ne signifikant zu verändern. Patienten mit PFC-Schädigung neigen außerdem deutlich seltener dazu, Fehler zu korrigieren. Die Autoren gehen daher davon aus, dass der PFC die neuronale Verarbeitung beeinflusst, die schließlich zu einer unterschiedlichen ERN/Ne nach Richtig- und Falschantworten führt. Der ACC scheint auf einen intakten PFC angewiesen zu sein, um Informationen zu erhalten, die zur Unterscheidung der beiden Antwortalternativen nötig sind.

1.4.2 Zwangserkrankungen

Bei der Zwangserkrankung (OCD) scheinen Fehlerpotentiale, verglichen mit Gesunden, deutlich verstärkt zu sein. Verschiedene Untersuchungen zeigten eine deutliche Überaktivität im kortiko-striatal-thalamisch-kortikalen Kreislauf, welcher für die Symptome verantwortlich zu sein scheint. Pitman et al. (1987) und Schwartz et al. (1997) gehen davon aus, dass die exzessive neuronale Aktivität teilweise aus hyperaktiven Fehlersignalen besteht. Danach besitzt das Gehirn gewisse innere Standards, welche die gewünschten inneren und äußeren Zustände repräsentieren. Ein

Vergleichssystem vergleicht diese Standards mit Umweltreizen, inneren Reizen wie Gedanken und Gefühlen sowie Tätigkeiten. Sollten diese nicht übereinstimmen, so wird ein Fehlersignal erzeugt. Durch dieses werden kognitive, motorische und affektive Systeme dazu angeleitet, die bestehende Diskrepanz zu beseitigen. Diesen Prozess kann man auch bei Gesunden finden. Bei OCD-Patienten sind die Fehlerpotentiale aber größer und halten länger an, wodurch der Kranke glaubt, etwas stimme nicht und müsse verändert werden. Daher sollte eine vergrößerte ERN/Ne-Amplitude erkennbar sein, deren Größe mit der Symptomausprägung korreliert. Diese Hypothese konnte von den Autoren bestätigt werden. Die Aktivität war dabei vor allem mediofrontal ausgeprägt, was wiederum auf eine Lokalisation im ACC hinweist (Dehaene et al., 1994; Holroyd et al., 1998). Typisch für Zwangskranke wäre allerdings auch eine signifikant größere ERN/Ne nach Richtigantworten, verglichen mit gesunden Kontrollpersonen, da ja das Fehlererkennungssystem in Alltagssituationen hyperaktiv reagiert. Die ERN/Ne-Aktivität war hier allerdings nicht signifikant verändert. Möglicherweise ist die ERN/Ne-Aktivität nur in ganz spezifischen Situationen vergrößert, die für den Kranken jeweils typisch sind, wie beispielsweise dem Händewaschen.

1.4.3 Morbus Parkinson

Veränderungen der ERN/Ne bei Parkinsonkranken lassen darauf schließen, dass die Basalganglien in das Fehlerverarbeitungssystem involviert sind. Falkenstein et al. (2000) führten hierzu ein eriksen- und simonähnliches Paradigma sowie einen Go/Nogo-Task durch. Dabei war die CRN, also eine Negativierung, die im selben Latenzbereich wie die ERN/Ne nach korrekten Antworten auftritt, zwischen Parkinsonpatienten und gesunden Kontrollen identisch. Daher ist davon auszugehen, dass es zu keinen generellen Amplituden- oder Latenzveränderungen bei den Patienten kam. Die Reaktionsverarbeitung, welche sich in der CRN widerspiegelt, ist also beim Morbus Parkinson nicht verändert. Die ERN/Ne war dagegen, verglichen mit gesunden Kontrollen, bei Parkinsonpatienten in ihrer Amplitude deutlich gemindert, was durchgehend bei allen drei Paradigmen zu beobachten war. Dieses unterschiedliche

Verhalten von ERN/Ne einerseits und CRN andererseits lässt auf jeweils unterschiedliche neuronale Mechanismen schließen. Die Verkleinerung der ERN/Ne-Amplitude ist mit geringer ausgeprägten Fehlerverarbeitungsprozessen erklärbar, welche vor allem bei anspruchsvollen Aufgaben, wie den drei hier verwendeten Paradigmen, deutlich wird. Da man bei Parkinsonpatienten auch eine verringerte Fehlerkorrekturrate beobachten konnte, erscheint diese Vorstellung plausibel. Weiterhin war die CRN-Latenz sowohl bei Gesunden als auch Parkinsonpatienten gegenüber der ERN/Ne-Latenz verkürzt. Die ERN/Ne-Latenz war bei Parkinsonpatienten wiederum kürzer als bei gesunden Kontrollpersonen. Dies entspricht den Erwartungen, da die gemessene ERN/Ne aus einer CRN mit einer Latenz von ca. 40 ms einerseits und andererseits der tatsächlichen ERN/Ne mit einer Latenz von ca. 80 ms besteht. Wenn nun die ERN/Ne-Komponente abgeschwächt ist, sollte bei gleichbleibender CRN eine kürzere Latenz auftreten, was mit den erhaltenen Ergebnissen übereinstimmt. Insgesamt gesehen kann man also davon ausgehen, dass es Parkinsonpatienten schwer fällt, ihre Fehler bei Reaktionsaufgaben zu erkennen, was sowohl durch die verminderte ERN/Ne-Amplitude als auch deren verkürzte Latenz deutlich wird. Da sonst keine Gehirnschädigung nachweisbar war, können die Veränderungen mit einer Dysfunktion der Basalganglien erklärt werden. Daher gehen die Autoren davon aus, dass die Basalganglien und der ACC interagieren und so einen integralen Bestandteil des Fehlerverarbeitungssystems bilden.

Die Pe war dagegen in einer Studie von Falkenstein et al. (2005) bei Parkinsonpatienten nicht verändert, während die bereits bekannten ERN/Ne-Unterschiede auch hier bestätigt wurden. Hierdurch wird wiederum die unterschiedliche Variation von ERN/Ne und Pe demonstriert. Die Autoren gehen daher davon aus, dass die Pe, im Gegensatz zur ERN/Ne, nicht vom dopaminergen System generiert wird.

1.4.4 Schizophrenie

Bei der Schizophrenie lassen sich ebenfalls Veränderungen der ERN/Ne finden. So ist schon länger bekannt, dass bei schizophrenen Patienten die Fähigkeit, Fehler zu korrigieren, deutlich verschlechtert ist. Leudar et al. (1994) konnten außerdem feststellen, dass interne Fehler von Gesunden doppelt so häufig erkannt werden wie von Schizophrenen. Kopp und Rist (1999) fanden bei paranoid-schizophrenen Patienten eine verminderte ERN/Ne-Amplitude verglichen mit gesunden Kontrollpersonen. Im ACC, von welchem auch die ERN/Ne generiert wird, konnten bei Schizophrenen sowohl anatomische als auch funktionelle Veränderungen gefunden werden. Somit erscheint ein Einfluss auf das Fehlererkennungssystem plausibel. Verschiedene Studien, unter anderem Barch et al. (1999), zeigten, dass das Desorganisationssyndrom mit pathologischer ACC-Aktivität einhergeht und gleichzeitig die normale Funktion dieses Bereiches beeinträchtigt ist. Folglich sollte eine verminderte ERN/Ne-Amplitude detektierbar sein, die von Bates et al. (2002) gefunden wurde.

Auch eine psychomotorische Verarmung ist mit einer verkleinerten ERN/Ne assoziiert. Man könnte argumentieren, dass dies auf das verschlechterte Reaktionsvermögen der Kranken zurückzuführen ist. Da man allerdings bei gesunden Probanden diesen Zusammenhang nicht finden konnte, ist davon auszugehen, dass sowohl die verminderte Reaktionsfähigkeit als auch die verkleinerte ERN/Ne auf die psychomotorische Verarmung zurückgehen und damit mit der schizophrenen Erkrankung zu erklären sind.

Vidal et al. (2000) hielten die ERN/Ne nicht für das Ergebnis einer Fehlererkennung an sich, sondern glaubten, sie werde durch einen begleitenden emotionalen Prozess ausgelöst. Dazu passend fanden Kiehl et al. (2000) heraus, dass Fehler gesunder Probanden, welche bei einem Go/No-go-Task begangen wurden, zu einer Aktivierung des rostralen ACC führten, welcher für die emotionale Verarbeitung zuständig ist. Nachdem es bei psychomotorisch veränderten Schizophrenen typischerweise zu einer Affektverflachung kommt, wäre somit eine verkleinerte ERN/Ne mit einer verminderten Funktion des rostralen ACC erklärbar. Somit könnte dieser an der Generierung der ERN/Ne beteiligt sein.

1.4.5 Angsterkrankungen

Nachdem bereits eine Überaktivität des ACC bei Zwangserkrankungen bekannt war, konnte diese auch bei anderen Erkrankungen, die mit Ängsten einhergehen, detektiert werden. Bystritsky et al. (2001) fanden, dass es bei Patienten mit einer Panikstörung zu einer signifikant höheren ACC-Aktivität kam, wenn diese sich den angstausslösenden Reiz vorstellten. Auch bei Kriegsveteranen, welche am posttraumatischen Stresssyndrom erkrankt waren, sowie bei Patienten, die an Phobien litten, konnte eine erhöhte ACC-Aktivität gemessen werden (Shin et al., 2001). Baleydir und Manguiere (1980) konnten durch eine Stimulation des ACC bei Versuchspersonen akut auftretende, starke Emotionen induzieren, was auf eine Rolle des ACC bei der Affektverarbeitung hinweist. Daher könnte den genannten Erkrankungen eine gemeinsame Angstverarbeitung zugrunde liegen. Um diesen Aspekt weiter zu untersuchen, bildeten Hajcak et al. (2003) drei Probandengruppen, deren Versuchspersonen jeweils hohe Punktwerte auf standardisierten Messskalen für eine generalisierte Angststörung (GAD), eine Phobie oder auf keiner der Messskalen aufwiesen. Den Probanden wurden Farbbegriffe wie beispielsweise ‚rot‘ gezeigt, welche in verschiedenen Farben dargestellt wurden. Sie sollten nun auf den Wortreiz der jeweiligen Farbe möglichst schnell und genau mit einem entsprechenden Tastendruck reagieren. Dabei zeigte sich, dass die Versuchspersonen, welche an einer generalisierten Angststörung litten, eine signifikant größere ERN/Ne aufwiesen als die phobischen Patienten einerseits und die gesunde Kontrollgruppe andererseits. Daher ist davon auszugehen, dass verschiedene Erkrankungen aus dem Spektrum der Ängste, zu denen unter anderem die OCD zählt, zu ACC- und damit ERN/Ne-Veränderungen führen. Eine statistische Analyse konnte dabei keine Interaktion zwischen den drei Gruppen einerseits und einer richtigen oder falschen Antwort andererseits finden, weshalb die erhöhte ERN/Ne bei GAD-Patienten wohl nicht fehlerspezifisch ist. Dagegen war die vergrößerte ERN/Ne sowohl mit Falsch- als auch Richtigantworten assoziiert, welche im letzteren Fall, wie oben erläutert, auch CRN genannt wird. Die Tatsache, dass sich ERN/Ne und CRN hier gleichartig verhielten, spricht wiederum für eine ähnliche Funktion der beiden Komponenten.

1.5. Das Auftreten einer ERN/Ne nach Fehlerbeobachtung

Interessanterweise tritt eine ERN/Ne auch dann auf, wenn Probanden die Fehler anderer Personen lediglich beobachten. Van Schie et al. (2004) erkannten in ihrer Studie, dass die Aktivität sowohl des medialen frontalen Kortex als auch der Motorkortices von der Richtigkeit des Verhaltens anderer beeinflusst wird. Dies sind in etwa die gleichen Bereiche, die auch bei selbst begangenen Fehlern involviert sind. Bei Fehlreaktionen der beobachteten Personen wurde wiederum eine Negativierung im EEG gefunden. Sie begann ungefähr 90 Millisekunden nach der beobachteten Falschantwort und hatte ihr Maximum bei ca. 250 Millisekunden. Die räumliche Verteilung der ERN/Ne über der Kopfoberfläche war mit der ERN/Ne bei selbst begangenen Fehlern vergleichbar. Analysen des lateralisierten Bereitschaftspotentials zeigten bereits vor der Antwort der ausführenden Person beim Beobachter eine verstärkte neuronale Tätigkeit des Motorkortex. Dabei wurde sowohl bei richtigen als auch falschen Antworten der ausführenden Person im Motorkortex des Beobachters immer zunächst die richtige Antwort repräsentiert. Wenn schließlich der Akteur reagierte, wurde der Motorkortex des Beobachters unterschiedlich aktiviert, je nachdem wie richtig die beobachtete Antwort war. Aus der Tatsache, dass sowohl bei beobachteten Fehlern anderer als auch bei selbst begangenen Fehlern die gleichen Gehirnareale involviert waren, schlossen Van Schie et al. (2004), dass eine ERN/Ne grundsätzlich nach dem Erkennen eines Fehlers entsteht, unabhängig davon, ob dieser von der eigenen Person oder von Außenstehenden begangen wird. Ein ähnlicher Sachverhalt wurde schon von Gallese et al. (1996) bei Affen entdeckt, als man feststellte, dass bestimmte Spiegelneurone sowohl aktiv waren, wenn die Tiere bestimmte Tätigkeiten selbst durchführten als auch bei Beobachtung dieser Verhaltensweisen bei ihren Artgenossen. Rizzolatti, Fogassi und Gallese (2001) glauben aufgrund ihrer Studie, dass analoge Nervenzellverbände auch beim Menschen vorkommen. Einige Theorien, unter anderem von Blakemore und Decety (2001), gehen davon aus, dass Spiegelneurone den Menschen dazu befähigen, sich in andere hineinzusetzen, ihren Geisteszustand festzustellen, ihre Absichten zu erkennen und ihre beabsichtigten Tätigkeiten vorherzusagen. Um diese Vorstellung zu überprüfen, war es zunächst nötig, festzustellen, ob der ACC sowohl bei der Beobachtung von

Fehlern als auch deren Durchführung gleichermaßen aktiv ist. Nachdem die ERN/Ne in diesem Bereich generiert wird, konnte sie zur Überprüfung dieses Sachverhaltes herangezogen werden.

Bates et al. (2005) sind der Meinung, die Studien von van Schie et al. (2004) und Miltner et al. (2004) seien bezüglich der Beobachtungs-ERN/Ne nur begrenzt aussagefähig, da jeweils nur Differenzwerte berücksichtigt, jedoch keine absoluten ERN/Ne-Werte betrachtet wurden. Auch sei noch eine Abgrenzung von der reizinduzierten N2 erforderlich. Um diese beiden Aspekte zu überprüfen, verwendeten die Autoren einen Go/No-go-Task, bei welchem im Gegensatz zu van Schie et al. (2004) der Beobachter die gleichen visuellen Informationen wie der Akteur erhielt, um dessen Geisteshaltung vollständig nachvollziehen zu können. Bates et al. (2005) konnten dabei beim Beobachter ebenfalls eine ERN/Ne detektieren, wenn dieser Fehler des Akteurs verfolgte. Ihre räumliche Verteilung war dabei der ERN/Ne des Akteurs ähnlich, unterschied sich jedoch deutlich von derjenigen der reizbezogenen N2, so dass letztere als Erklärung für die „Beobachter-ERN“ ausgeschlossen werden konnte. Somit konnten die Ergebnisse von van Schie et al. (2004) im Wesentlichen bestätigt werden. Nach Blandin und Proteau (2000) werden Beobachtungen von motorischen Reaktionsaufgaben anderer dazu genutzt, das eigene Fehlverhalten in der gleichen Situation besser einschätzen zu können. Interessanterweise konnten die Probanden bei der Fehlerbeobachtung ihre Leistungsfähigkeit genauso deutlich steigern wie beim unmittelbaren Üben der Reaktionsaufgabe. Daher könnte die ERN/Ne, die nach dem Beobachten von Fehlern auftritt, auch mit den neuronalen Prozessen verknüpft sein, welche für das Beobachtungslernen zuständig sind. Nachdem das Gehirn ja nur korrektes Verhalten nachahmen will, sollte ein Fehlererkennungssystem vorhanden sein, das vor dem Nachahmen falscher Reaktionen bewahrt. Dieses könnte sich in einer ERN/Ne ausdrücken.

1.6 Die Vorstellung von einer „generellen“ ERN/Ne

Weiterhin zeigte eine Studie von Luu et al. (2003), dass eine ERN/Ne nicht nur nach einem begangenen Fehler auftrat, sondern auch nach einer negativen Rückmeldung zu beobachten war. Dabei gaben die Autoren jeweils ein „A“, „C“ oder „F“ als Rückmeldung einer richtigen Antwort, je nachdem wie schnell sie gegeben wurde, sowie ein „E“, falls die Antwort falsch war. Diese Abstufung diente dazu, die Probanden zu möglichst schnellen Reaktionen zu motivieren. Um Antwort-ERN/Ne und Feedback-ERN/Ne vollständig voneinander zu trennen, wurde eine entsprechende Rückmeldung erst sehr verzögert gegeben. Außerdem wurde sie um jeweils fünf Reaktionen nach hinten verschoben, um keinen Zusammenhang zum vorangegangenen Reaktionsverhalten herzustellen. Den Autoren ging es darum, festzustellen, ob beide ERN/Ne-Varianten in den gleichen Hirnbereichen generiert werden. Durch diese formale Trennung glaubte man, die beiden Formen auch topographisch besser unterscheiden zu können. In der anschließenden Auswertung trat, wie erwartet, eine ERN/Ne ungefähr 70 ms nach einem fehlerhaften Tastendruck auf. Zusätzlich fand man eine zweite Negativierung, die ungefähr 336 ms nach dem Beginn der negativen Rückmeldung auftrat und der ersten nach dem fehlerhaften Tastendruck sehr ähnelte. Dabei wurde jeweils der ACC aktiviert, wobei jedoch jeweils unterschiedliche Bereiche betroffen waren. Während die antwortbezogene ERN/Ne sowohl im rostralen als auch dorsalen ACC zu finden war, konnte die feedbackbezogene ERN/Ne nur im dorsalen Bereich detektiert werden. Luu et al. gingen daher davon aus, dass die beiden Regionen des ACC funktionell unterschiedliche Prozesse widerspiegeln. Danach sei der dorsale ACC für Parameter zuständig, die mit der Reaktionsaufgabe an sich zusammenhängen, beispielsweise dem Feedback, dessen Bewertung oder miteinander in Konflikt stehenden, unterschiedlichen Reaktionsanforderungen. Der rostroventrale ACC gebe dagegen die emotionale Bewertung des Reaktionsverhaltens wieder. Somit kann man davon ausgehen, dass die beiden ERN/Ne-Komponenten für jeweils unterschiedliche neurologische Mechanismen stehen, die aber offenbar beide zum Fehlerverarbeitungssystem gehören.

Miltner et al. (1997) fanden in ihrer Studie eine topographisch sehr ähnliche Verteilung der antwortbezogenen ERN/Ne nach einer fehlerhaften Reaktion und der

feedbackbezogene ERN/Ne nach einer negativen Rückmeldung. Daher scheint der gleiche oder ein zumindest sehr ähnlicher neurologischer Prozess, der in beiden Fällen den ACC oder die supplementär-motorische Region aktiviert, sowohl für die Bewertung von Falschantworten bei Reaktionsaufgaben als auch für die Verarbeitung des negativen Feedbacks nach beispielsweise Zeitschätzungsfehlern verantwortlich zu sein. Miltner et al. glauben daher, die ERN/Ne könnte der Repräsentant eines generelles Fehlererkennungssystems sein. „Generell“ würde bedeuten, dass die Aktivität des Systems nicht nur von der richtig oder falsch gegebenen Antwort an sich abhängt, sondern dass es auch durch Ereignisse aktiviert werden kann, die mit der richtigen oder falschen Antwort an sich nicht unmittelbar verbunden sind, wie beispielsweise einer negativen Rückmeldung, die nicht in unmittelbarem Bezug zur zuvor gegebenen Antwort steht. Miltner et al. (1997) postulieren ein sogenanntes „generic error processing system“, das heißt ein einheitliches Fehlerverarbeitungssystem, das auf vielfältige Weise aktiviert werden kann, beispielsweise durch Fehler bei Auswahlreaktionen, Aktionsfehler bei Go-/Nogo-Aufgaben und Zeitschätzungsfehler, und somit nicht von einer einzelnen Fehlerart in einer bestimmten Situation abhängig ist. Außerdem können die Fehler demnach sowohl internen als auch externen Ursprungs sein, also sowohl von der Versuchsperson selbst begangen als auch von außen eingegeben werden, beispielsweise indem eine negative Rückmeldung erfolgt.

1.7 Die Zielsetzung meiner Arbeit

In der vorliegenden Untersuchung habe ich einen weiteren Schritt unternommen, die Vorstellung von einer „generellen ERN/Ne“ zu überprüfen. Hierzu wurde ein modifizierter Eriksen-Flanker-Task verwendet, welcher jeweils aus einer Reihe von fünf Buchstaben bestand, entweder einem „H“, das von jeweils zwei „S“ oder einem „S“, das von jeweils zwei „H“ flankiert wurde. Bei einem „S“ sollte der Proband möglichst schnell mit der rechten und bei einem „H“ möglichst schnell mit der linken Shifttaste der Computertastatur reagieren. Dabei war das Computerparadigma derart programmiert, dass intermittierend bei einer richtigen Antwort des Probanden die Rückmeldung des Computers dennoch eine Fehlantwort signalisierte („externer Fehler“). Das gegebene Feedback wies also in solchen Fällen auf eine Falschantwort hin, obwohl der Proband tatsächlich richtig reagiert hatte. Sollte die Vorstellung von einer „generellen ERN/Ne“ richtig sein, so würde man auch hier das Auftreten einer ERN/Ne erwarten, da das gegebene Feedback allein schon eine entsprechende Negativierung induzieren sollte, unabhängig davon, wie der Proband tatsächlich reagierte. Die Aufgabe meiner Arbeit war es, diese Hypothese genauer zu überprüfen. Sollte sie sich bestätigen, so wäre es möglich, die ERN/Ne ein Stück mehr vom menschlichen Verhalten zu distanzieren und sie als Repräsentanten eines generellen Fehlerverarbeitungssystems des Gehirns zu betrachten.

2. Material und Methoden

2.1. Versuchspersonen

In unsere Studie wurden 18 gesunde Versuchspersonen aufgenommen (neun davon männlich, neun weiblich, mittleres Alter 26.2 ± 6.5 Jahre, Altersbereich 20-50 Jahre), nachdem ihnen die Untersuchung genau erklärt worden war und sie ihre Zustimmung zu einer elektrophysiologischen Messung gegeben hatten. Insgesamt wurden 52 Versuchspersonen untersucht, von denen jedoch 34 Probanden aus unterschiedlichen Gründen nicht in die Datenanalyse eingeschlossen werden konnten, beispielsweise weil in den EEG-Kurven zu viele Blinzelartefakte enthalten waren, die Probanden nicht schnell genug reagierten oder zu viele Artefakte durch motorische Unruhe entstanden.

Alle in die Studie eingeschlossenen Probanden waren nach eigener Aussage Rechtshänder und nahmen zum Zeitpunkt der Untersuchung keine Medikamente ein. Keiner der Probanden litt in der Vergangenheit oder gegenwärtig an einer neurologischen oder psychiatrischen Erkrankung.

2.2. Versuchsparadigma

Die elektrophysiologische Untersuchung wurde in einem elektrisch abgeschirmten, schallgedämpften und spärlich beleuchteten Raum durchgeführt. Die Probanden nahmen auf einem bequemen Stuhl Platz, der sich ungefähr 1,20 m vor einem Computerbildschirm befand. Das ERN/Ne-Paradigma war ein modifizierter Eriksen Flanker Task (Eriksen & Eriksen, 1979), der dem Paradigma von Herrmann et al. (2004) und Fallgatter et al. (2004) ähnelte. Zu Beginn jeder Reaktionsaufgabe wurde eine Reihe von fünf Buchstaben jeweils 125 ms lang auf dem Bildschirm gezeigt, wobei die Buchstabenkombinationen „HSHH“, „SSHSS“, „SHSHS“ und „HSHSH“ mit jeweils gleicher Wahrscheinlichkeit erschienen. Die Probanden wurden dazu aufgefordert, die rechte Shifttaste der Computertastatur möglichst schnell zu drücken, wenn ein „S“ in der Mitte der Buchstabenreihe erschien, und die linke Shifttaste schnellstmöglich zu drücken, wenn es sich dabei um ein „H“ handelte. Direkt nach dem jeweiligen Tastendruck erschien der so gewählte Buchstabe („S“ oder „H“) jeweils 500 ms lang in der Mitte des Computerbildschirms und diente so als unmittelbare

Rückmeldung bezüglich der gegebenen Antwort („Reaktionsfeedback“). Danach war der Bildschirm 750 ms lang leer, bevor schließlich ein Symbol angab, ob die gegebene Antwort richtig oder falsch war („Bewertungsfeedback“). Diese Rückmeldung erschien jeweils 500 ms lang, wobei ein „+“ eine richtige und schnell genug gegebene Antwort anzeigte, ein „-“ eine falsche Antwort und ein „!“ eine richtige Antwort, die allerdings nicht schnell genug gegeben wurde. Der Schwellenwert, welcher angab, ob eine richtige Antwort ausreichend schnell war, wurde in einem zuvor durchgeführten Probendurchlauf berechnet. In diesem wurden 42 Reaktionsaufgaben durchgeführt, wobei die mittlere Reaktionszeit der letzten 32 Antworten berechnet wurde. Das hieraus resultierende Ergebnis wurde als Schwellenwert des jeweiligen Probanden verwendet, welcher festlegte, ob die gegebenen richtigen Antworten bei den darauffolgenden Reaktionsaufgaben den Schnelligkeitsanforderungen genügten. Dieses Verfahren wurde durchgeführt, um die Fehlerrate bei schnelleren Probanden zu erhöhen und um eine Demotivierung der langsameren Probanden zu vermeiden (vergleiche Stemmer et al., 2001).

Insgesamt wurden vier Durchgänge des Paradigmas durchgeführt. Der erste Durchgang bestand aus 100 Reaktionsaufgaben, die Durchgänge zwei bis vier aus jeweils 200 Reaktionsaufgaben pro Durchgang. Die Pause zwischen den einzelnen Reaktionsaufgaben betrug jeweils 1250 ms. Zwischen den einzelnen Durchgängen wurden Pausen von einigen Minuten erlaubt. In den Durchgängen zwei bis vier wurde der falsche Reiz in vier Prozent der Reaktionsaufgaben als Antwortfeedback gegeben. Hierbei reagierte der Proband beim Erscheinen eines „S“ korrekterweise mit der rechten Shifttaste und beim Erscheinen eines „H“ mit der linken, wobei aber dennoch der jeweils entgegengesetzte Buchstabe auf dem Bildschirm erschien und dementsprechend auch ein „-“ als Rückmeldung gegeben wurde, welches 750 ms nach dem Erscheinen des Buchstaben eine angebliche Falschantwort signalisierte. Insgesamt wurden 24 solcher „Computerfehler“ in das Paradigma integriert.

2.3. EEG-Aufzeichnung

Das EEG wurde mit 21 Kopfhautelektroden abgeleitet, die nach dem internationalen 10/20-System an den Elektrodenpositionen Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, T3, T4, C3, C4, T5, T6, P3, P4, O1, O2, Fpz, Fz, Cz, Pz und Oz platziert wurden (Jasper, 1958). Drei zusätzliche Elektroden wurden an der Außenseite beider Augen sowie unter dem rechten Auge positioniert, um so Bulbusbewegungen registrieren zu können. Die Referenzelektrode wurde zwischen Fz und Cz platziert. Die Widerstände der Elektroden lagen unter fünf kOhm. Die Daten wurden mit einem 32-kanaligen DC-Verstärker (Brain Products, München, Deutschland) sowie der Software „Brain Vision Recorder“ (Version 1.01b; Brain Products, München, Deutschland) aufgezeichnet. Der Breitbandfilter lag bei 0.1 bis 70 Hz, die A/D- Rate wurde bei 1000 Hz gewählt.

2.4. EEG-Auswertung

Die EEG-Rohdaten wurden offline mit der Auswerte-Software „Brain Vision Analyzer“ (Version 1.05; Brain Products, München) weiter verarbeitet. Zunächst wurden die Augenkanäle bipolar miteinander verschaltet, indem die beiden Kanäle zur Ableitung des horizontalen EOGs miteinander verrechnet und die vertikale Augenelektrode mit der darüber gelegenen Stirnelektrode (Fp2) verschaltet wurde. So ergab sich jeweils ein neu berechneter Kanal für das horizontale und vertikale EOG. Im nächsten Schritt, der Filterung der Daten, wurde ein Butterworth Zero Phase Filter eingesetzt. Der Hochpassfilter (low cutoff) lag bei 0.1 Hz (Zeitkonstante 1,59 Sekunden), während der Tiefpassfilter (high cutoff) bei 50 Hz gewählt wurde. Die Steilheit des Filters betrug 24dB/Oktave, sowohl beim Hoch- als auch Tiefpassfilter. Die Daten wurden auf die Durchschnittsreferenz rereferenziert. Diese wurde aus dem Mittelwert der folgenden Kanäle gebildet: C3, C4, Cz, F3, F4, F7, F8, Fp1, Fp2, Fpz, Fz, O1, O2, Oz, P3, P4, Pz, T3, T4, T5 und T6. Die Kanäle, auf welche sich die neue Durchschnittsreferenz bezog, waren mit den oben genannten identisch. Anschließend wurde eine Augenartefaktkorrektur (Ocular Correction) durchgeführt. Dabei wurde das Verfahren nach Gratton & Coles (1983) verwendet. Die Augenartefakte wurden mit Hilfe des entsprechenden Algorithmus in allen Kopfelektroden automatisch korrigiert.

Zunächst inspizierten wir den Grandaverage an den Mittellinienelektroden (Fz, Cz, Pz) und legten anhand des Kurvenverlaufs das Intervall fest, innerhalb dessen mit Hilfe der im Vision Analyzer implementierten automatisierten Prozedur die gesuchten Peaks detektiert werden sollten. Die Segmentlänge betrug jeweils 1000 ms und reichte von 200 ms vor bis 800 ms nach dem Tastendruck des Probanden. Anschließend wendeten wir drei verschiedenen Kriterien an, welche zur Bildung von drei verschiedenen Segmentarten führten. Nach dem ersten Kriterium reagierte der Proband auf den gezeigten Buchstaben mit der korrekten Taste ausreichend schnell, so dass er ein „+“ als Rückmeldung erhielt. Korrekt bedeutet, der Proband betätigte beim Erscheinen eines „H“ die linke Shifttaste und beim Erscheinen eines „S“ die rechte Shifttaste. Um die zugehörigen Segmente für den Vision Analyzer kenntlich zu machen, wurde das Programm instruiert, nur diejenigen Segmente aufzunehmen, bei denen spätestens 2000 ms nach dem Tastendruck ein „+“ als Feedback erschien. Diejenigen Segmente, welche die oben genannte Bedingung nicht erfüllten, wurden nicht in die Segmentgruppe ‚Korrekte Reaktion‘ aufgenommen.

Nach dem zweiten Kriterium (Segmente ‚Falsche Reaktion‘) reagierte der Proband mit dem falschen Tastendruck, so dass er ein „-“ als Feedback erhielt. Falsch bedeutet, der Proband betätigte beim Erscheinen eines „H“ die rechte oder beim Erscheinen eines „S“ die linke Shifttaste, allerdings nicht die korrekte Taste innerhalb von 500 ms vor oder nach dem fehlerhaften Tastendruck. Dabei wurden diejenigen Segmente aufgenommen, bei denen bis zu 1500 ms vor dem Tastendruck ein „H“ oder „S“ auf dem Bildschirm erschien, wobei der Tastendruck jeweils inkompatibel mit dem präsentierten Buchstaben war.

Das dritte Kriterium betraf den sogenannten „PC-Fehler“, d.h. der Proband reagierte korrekt und ausreichend schnell, der PC gab allerdings über die jeweils entgegengesetzte Rückmeldung vor, die Reaktion des Probanden sei falsch gewesen. Beim Erscheinen eines „H“ auf dem Bildschirm und dem korrekten Druck der linken Shifttaste erschien ebenso ein „-“ als Rückmeldung wie beim Erscheinen eines „S“ und dem Druck der rechten Shifttaste (wobei jeweils der dem vorausgehenden Stimulus entgegengesetzte Buchstabe als unmittelbares Reaktions-Feedback zurückgemeldet wurde). In diesem Fall sollten diejenigen Segmente aufgenommen werden, bei denen

wiederum die korrekte Reaktion innerhalb von 1500 ms nach Erscheinen des Stimulus erfolgte, und innerhalb von 500 ms vor oder nach der korrekten Reaktion nicht zusätzlich die fehlerhafte Reaktion auftrat. Außerdem sollte bis zu 2000 ms nach dem Tastendruck ein „-“ als Feedback erscheinen (Segmente ‚PC-Fehler‘). Nach der Segmentierung wurde eine Artefaktkorrektur durchgeführt. Dabei wurden von der Auswerte-Software alle Segmente identifiziert und entfernt, die in mindestens einem der 21 Kopfelektrodenkanäle Artefakte aufwiesen. Dabei wurde von einem Artefakt ausgegangen, wenn der maximale Spannungsanstieg zwischen zwei benachbarten Mess-Punkten mehr als 50 Mikrovolt betrug.

Im Anschluss an die Artefaktbereinigung wurden die zuvor segmentierten Daten gemittelt (Average). Dieser Schritt diente dazu, das Hintergrundrauschen des EEGs zu eliminieren und damit die gesuchten Hirnstromkurven zu verdeutlichen.

Abschließend wurde eine automatische Peak-Erkennung (Peak detection) durchgeführt. Die Suche wurde separat für die Kanäle Fz, Cz und Pz durchgeführt und bezog sich jeweils auf globale Maxima. Dabei wurde die reaktionsbezogene ERN/Ne im Intervall von 50 ms vor bis 150 ms nach dem Tastendruck mit voreingestellter negativer Polarität detektiert. Diese ERN/Ne kann man annäherungsweise auch auf das erste Feedback beziehen, welches in der Anzeige des ausgewählten Buchstabens besteht, welche nur wenige Millisekunden nach dem Tastendruck erfolgte. Die Pe wurde dagegen im Intervall von 120 ms bis 400 ms nach dem Tastendruck mit positiver Polarität gesucht. In den Segmenten fiel zudem eine weitere Positivierung auf, welche wir Pl, also späte Positivierung, nannten, und welche in den bisherigen Studien noch nicht beschrieben wurde. Sie wurde von uns im Intervall von 500 ms bis 800 ms nach dem Tastendruck ebenfalls mit positiver Polarität lokalisiert.

Die zweite Feedback-ERN/Ne, welche sich auf die Anzeige eines „+“ oder „-“ als Rückmeldung bezieht, wurde an den Elektroden Fz und Cz im Intervall von 150 ms bis 400 ms mit voreingestellter negativer Polarität bestimmt. Analog wurde bei der Bestimmung der Feedback-Pe an den Elektroden Fz, Cz und Pz vorgegangen. Sie bestimmten wir im Intervall von 200 ms bis 500 ms. Im Gegensatz zur antwortbezogenen Pe wurde bei der Feedback-Pe nicht der absolute Wert als Maß verwendet, sondern der Betrag der „Tal-zu-Gipfel-Amplitude“ bestimmt, welchen man durch Subtraktion des „Talwertes“ vom „Gipfelwert“ erhält. Dieses Vorgehen war

notwendig geworden, weil die unmittelbar vorhergehende negative Amplitude sehr unterschiedlich ausgeprägt war, wovon der nachfolgende absolute Pe-Wert deutlich beeinflusst wurde. Bei der Bestimmung der Feedback-ERN/Ne konnten dagegen die Absolutwerte verwendet werden, da hier eine weitestgehend konstante isoelektrische Linie zu finden war.

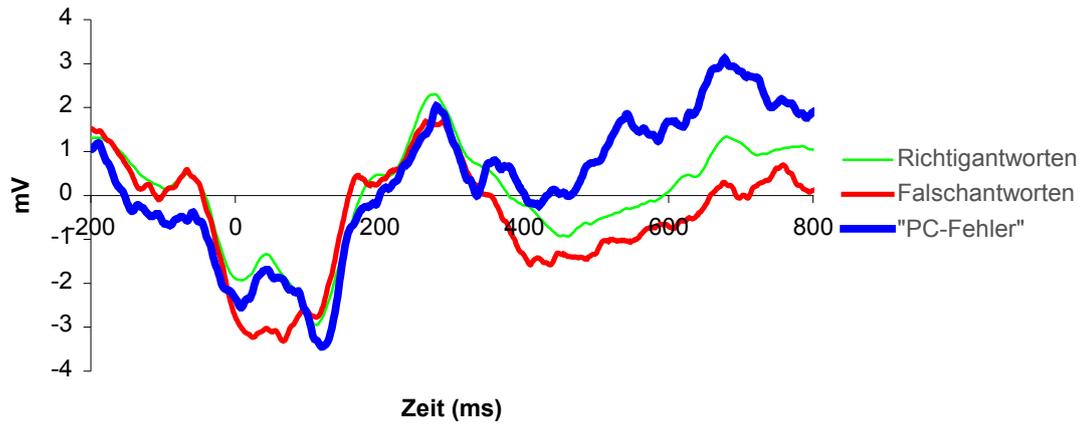
2.5. Statistische Analysen

Die Datenanalyse wurde mit SPSS Version 13.0 durchgeführt. Zunächst wurde jeweils eine zweifaktorielle Varianzanalyse vorgenommen. Der erste Faktor, der von uns „Bedingung“ genannt wurde, bezog sich auf die drei möglichen Reaktionstypen und lag somit in drei Stufen vor („richtige Reaktion“, „Falschreaktion“ und „PC-Fehler“). Mit dem zweiten Faktor wurde die Elektrodenposition analysiert. Dieser war bei der ERN/Ne-Bestimmung zweistufig und beinhaltete die Positionen Fz und Cz, da diese Komponente nur hier reliabel detektierbar war. Bei der Bestimmung der Pe sowie der Pl wurden dagegen die Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz betrachtet, weshalb der Faktor hier dreistufig war. Somit wurden jeweils 3x2 ANOVAs, d.h. zweifaktorielle Varianzanalysen mit einem dreistufigen und einem zweistufigen Faktor, sowie 3x3 ANOVAs mit zwei jeweils dreistufigen Faktoren durchgeführt. Hierbei wurde auf signifikante Haupteffekte der beiden Faktoren sowie auf signifikante Interaktionen geachtet. Sollten letztere aufgetreten sein, so wurden im Anschluss daran entsprechende einfaktorielle Varianzanalysen durchgeführt. Wenn sich hierbei signifikante Effekte ergaben, so wurden post-hoc-t-Tests angeschlossen, um die Auswirkungen des Faktors auf die Amplitude oder Latenz zu verdeutlichen. Zur Korrektur der Freiheitsgrade wurde durchgehend das Huynh-Feldt-Verfahren verwendet. Die Ergebnisse wurden als signifikant bezeichnet, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit bei kleiner als 0,05 lag. Von einem statistischen Trend wurde ausgegangen, wenn sich p-Werte zwischen 0,05 und 0,1 ergaben.

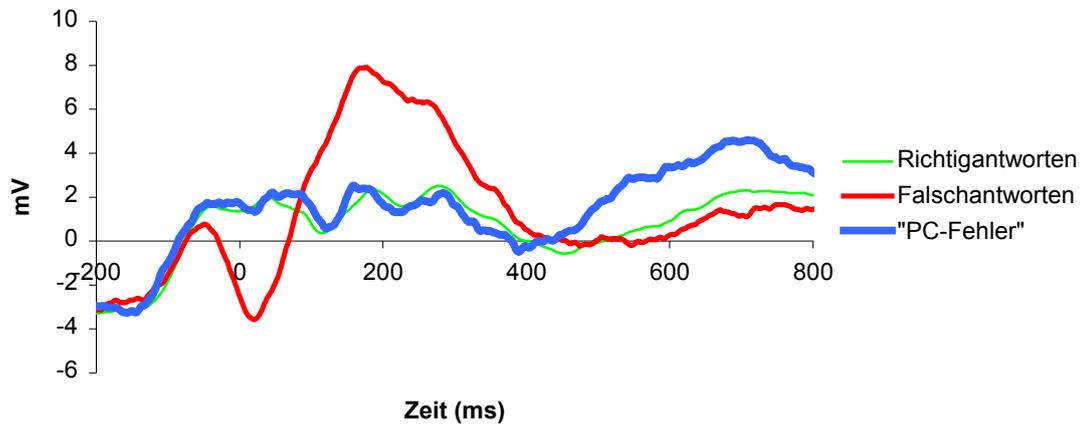
Im folgenden werden die Kurvenverläufe der drei Bedingungen „Richtige Antwort“, „Falschantwort“ und „PC-Fehler“ nach dem jeweiligen Tastendruck dargestellt, jeweils

getrennt an den Elektroden Fz, Cz und Pz. Zudem ist die topographische Verteilung der ERN/Ne, Pe und Pl abgebildet.

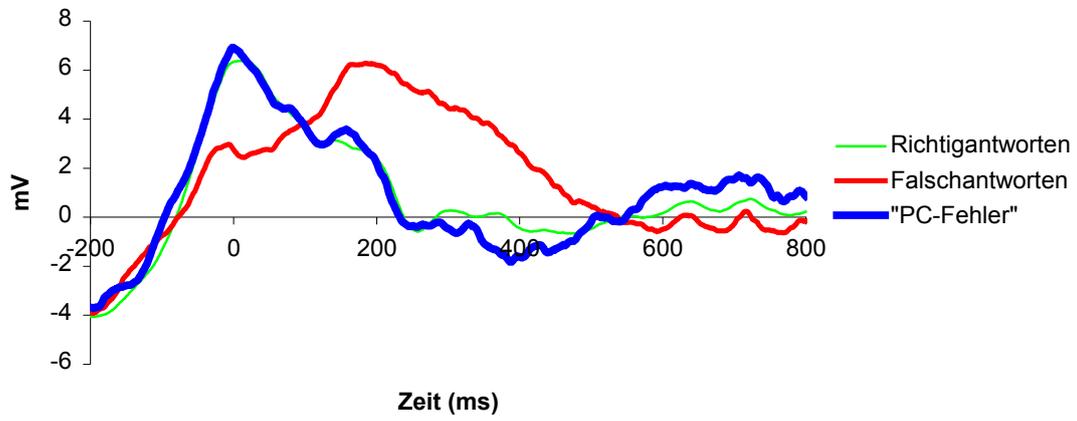
Grand average-Kurven (Fz)



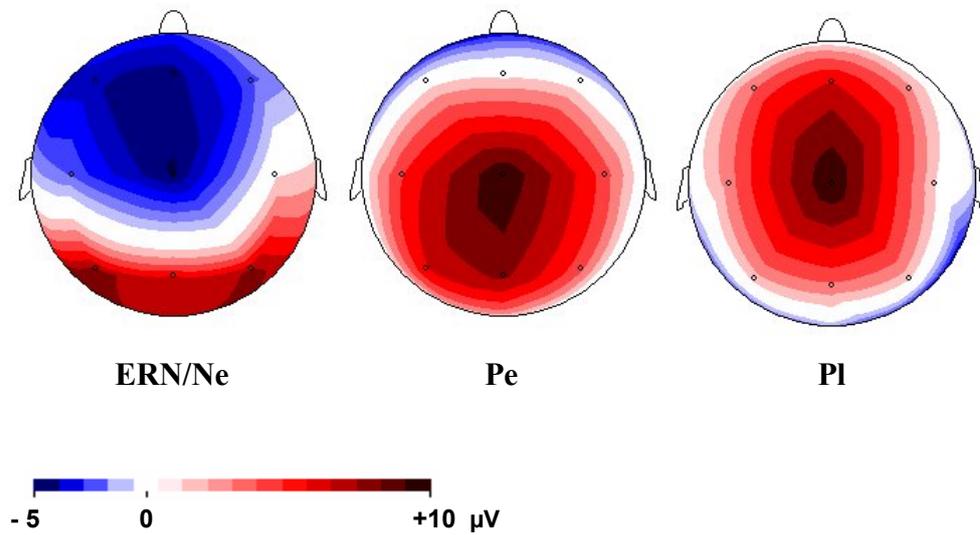
Grand average-Kurven (Cz)



Grand average-Kurven (Pz)



Topographische Verteilung



3. Ergebnisse

3.1. Leistungsdaten

Während der jeweils 700 durchgeführten Reaktionsaufgaben unterliefen den Probanden durchschnittlich 75.7 ± 52.0 Fehler (MW \pm SA; Bandbreite: 22 bis 178). Die Anzahl der Richtigantworten, welche ausreichend schnell waren, betrug durchschnittlich 402.7 ± 90.3 . Die mittlere Reaktionszeitschwelle, die für jeden Probanden einzeln bestimmt wurde und welche die gegebenen Antworten als ausreichend schnell oder zu langsam einstuft, lag bei 444.7 ± 67.0 ms (Bandbreite: 376.0 bis 674.0). Im Mittel wurden 196.2 ± 67.5 richtige Antworten gegeben, die als zu langsam eingestuft wurden. Nachdem aber richtige Antworten, welche in die ERP-Analyse einbezogen wurden, definitionsgemäß schneller waren als die zuvor bestimmte Reaktionszeitschwelle des betreffenden Probanden, während Falschantworten alle falschen Tastendrucke innerhalb von 1500 ms nach dem Stimulus beinhalten, war es nicht sinnvoll, die mittlere Reaktionszeit dieser beiden Antwortbedingungen miteinander zu vergleichen. Wir führten jedoch einen t-Test durch, welcher die mittlere Reaktionszeit von Richtigantworten mit denjenigen Falschantworten verglich, welche schneller waren als die Reaktionszeitschwelle des Probanden. Hierbei zeigte sich eine signifikant kürzere Reaktionszeit bei Falsch- als bei Richtigantworten (366.2 ± 43.6 gegenüber 376.5 ± 42.1 ms; $t_{17} = 3.62$, $p < 0.01$), welche definitionsgemäß vom Beginn des Reizes bis zur Durchführung eines Tastendrucks reichte. Der Vergleich aller Richtig- und Falschantworten unabhängig von der Reaktionszeit, das heißt wenn schnelle und langsame Antworten sowohl bei Richtig- als auch Falschantworten berücksichtigt wurden, erbrachte hierbei annähernd das gleiche Ergebnis ($RT_{\text{correct}} = 417.8 \pm 38.2$ ms gegenüber $RT_{\text{error}} = 391.7 \pm 41.0$ ms; $t_{17} = 6.98$, $p < 0.001$). Diese Ergebnisse bestätigen die Daten bisheriger Publikationen, die wiederholt zeigten, dass die Reaktionszeiten bei Falschantworten durchschnittlich kürzer sind als bei Richtigantworten (siehe beispielsweise Falkenstein et al., 2001b oder Pailing et al., 2002). Beim unmittelbaren Vergleich der Reaktionszeiten richtiger Antworten mit denen der „PC-Fehler“ zeigte sich dagegen erwartungsgemäß kein signifikanter Unterschied (376.5 ± 42.1 gegenüber 374.0 ± 41.6 ms; $t_{17} = 1.56$, n.s.).

3.2. ERP-Daten

Bezüglich der reaktionsgemittelten beziehungsweise auf das erste Feedback bezogenen ERN/Ne-Amplitude wurde eine 3x2 ANOVA (zweifaktorielle Varianzanalyse) durchgeführt, welche signifikante Haupteffekte für die Faktoren „Bedingung“ ($F_{1,19} = 8,76$; $p < 0,01$) und „Elektrodenposition“ ($F_{1,17} = 91,00$; $p < 0,001$) sowie eine signifikante Interaktion ($F_{2,26} = 14,17$; $p < 0,001$) ergab. Die ERN/Ne-Werte waren insgesamt gesehen nach Falschantworten am negativsten ($-3,58 \pm 0,42$, Mittelwert \pm Standardfehler), verglichen sowohl mit Richtigantworten ($-1,40 \pm 0,47$; $p < 0,01$) als auch „PC-Fehlern“ ($-1,86 \pm 0,59$; $p < 0,1$). Richtigantworten und „PC-Fehler“ zeigten dagegen keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,082$). Außerdem waren die ERN/Ne-Werte an Fz negativer als an Cz (Fz: $-5,06 \pm 0,54$; Cz: $0,50 \pm 0,41$; $p < 0,001$).

Eine einfaktorielle Varianzanalyse, welche für die drei Bedingungen an der Elektrode Fz durchgeführt wurde, ergab kein signifikantes Ergebnis ($F_{1,24} = 1,95$; $p = 0,171$). An der Elektrode Cz konnte dagegen ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen gefunden werden ($F_{1,20} = 13,43$; $p < 0,01$). Post-hoc-t-Tests konnten hier zeigen, dass die ERN/Ne nach Falschantworten ($-1,63 \pm 2,16$) größer war als nach Richtigantworten ($1,76 \pm 2,44$; $t_{17} = 4,35$; $p < 0,001$) und „PC-Fehlern“ ($1,37 \pm 2,75$; $t_{17} = 3,28$; $p < 0,01$). Richtigantworten und „PC-Fehler“ zeigten keinen signifikanten Unterschied ($t_{17} = 1,28$; $p = 0,218$).

Für ein weiteres Fehlerpotential, die sogenannte Pe, welche gewöhnlich der ERN/Ne unmittelbar folgt, wurde eine 3x3 ANOVA (zweifaktorielle Varianzanalyse) berechnet. Hierbei war sowohl der Faktor „Bedingung“ als auch der Faktor „Elektrodenposition“ signifikant („Bedingung“: $F_{1,21} = 23,75$; $p < 0,001$; „Elektrodenposition“: $F_{1,29} = 24,35$; $p < 0,001$). Ebenso konnte eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren gefunden werden ($F_{3,54} = 14,01$; $p < 0,001$). Über die drei Elektroden Fz, Cz und Pz gemittelt war die Pe nach Falschantworten am deutlichsten ausgeprägt ($8,46 \pm 0,60$), verglichen sowohl mit Richtigantworten ($5,11 \pm 0,34$; $p < 0,001$) als auch „PC-Fehlern“ ($5,71 \pm 0,39$; $p < 0,001$). Dabei konnte auch nach „PC-Fehlern“ eine signifikant höhere Pe gefunden werden als nach Richtigantworten, wenn auch weniger deutlich ausgeprägt

(„PC-Fehler“: $5,71 \pm 0,39$; Richtigantworten: $5,11 \pm 0,34$; $p < 0,05$). Weiterhin waren die Pe-Werte insgesamt an Fz ($2,75 \pm 0,47$) kleiner als an Cz ($8,59 \pm 0,61$; $p < 0,001$) und Pz ($7,95 \pm 0,78$; $p < 0,001$). Zwischen Cz und Pz ergab sich dagegen kein signifikanter Unterschied ($p = 0,52$).

Aufgrund der signifikanten Interaktion der Faktoren „Bedingung“ und „Elektrodenposition“ wurden jeweils einfaktorielle ANOVAs mit den drei Stufen des Faktors „Bedingung“ für die Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz durchgeführt. Dabei zeigte der Faktor „Bedingung“ signifikante Haupteffekte an den Positionen Cz ($F_{1,21} = 26,54$; $p < 0,001$) und Pz ($F_{2,27} = 20,61$; $p < 0,001$). An Position Fz wurde er dagegen nicht signifikant ($F_{1,26} = 2,45$; $p = 0,12$). Die daraufhin durchgeführten t-Tests zeigten, dass an der Elektrode Cz Falschantworten zu einer signifikant höheren Pe führten als Richtigantworten (Falschantwort: $12,01 \pm 4,42$; Richtigantwort: $6,75 \pm 2,56$; $t_{17} = 5,52$; $p < 0,001$). Auch zwischen Falschantworten und „PC-Fehlern“ gab es einen signifikanten Unterschied (Falschantwort: $12,01 \pm 4,42$; „PC-Fehler“: $6,99 \pm 2,46$; $t_{17} = 5,11$; $p < 0,001$), welcher nach Falschantworten zu einer deutlich höheren Pe führte. Zwischen Richtigantworten und „PC-Fehlern“ konnte dagegen kein wesentlicher Unterschied gefunden werden ($t_{17} = 0,707$; $p = 0,49$). An der Elektrode Pz waren die Ergebnisse ähnlich. Auch hier führten Falschantworten ($10,40 \pm 2,95$) zu einer deutlich höheren Pe als Richtigantworten ($6,51 \pm 3,50$; $t_{17} = 5,42$; $p < 0,001$). Auch der Unterschied zwischen Falschantworten ($10,40 \pm 2,95$) und „PC-Fehlern“ ($6,92 \pm 4,44$; $t_{17} = 4,39$; $p < 0,001$) war signifikant, wobei die Pe nach einer Falschantwort deutlich größer war. Zwischen Richtigantworten und „PC-Fehlern“ konnte dagegen erneut kein signifikanter Unterschied gefunden werden ($t_{17} = 0,942$; $p = 0,36$).

Für die späte Positivierung Pl wurde eine 3x3 ANOVA berechnet. Dabei ergaben sich signifikante Haupteffekte für die Faktoren „Bedingung“ ($F_{2,29} = 22,85$; $p < 0,001$) und „Elektrodenposition“ ($F_{2,29} = 11,01$; $p < 0,001$) sowie eine signifikante Interaktion der beiden Faktoren ($F_{3,45} = 3,01$; $p < 0,05$). Die Pl-Werte waren grundsätzlich nach „PC-Fehlern“ ($6,51 \pm 0,50$) höher als nach Richtigantworten ($3,75 \pm 0,49$; $p < 0,001$) und Falschantworten ($3,65 \pm 0,63$; $p < 0,001$). Zwischen Richtig- und Falschantworten konnte kein signifikanter Unterschied gefunden werden ($p = 0,78$). Bezüglich der Elektrodenpositionen war die Pl an Cz ($6,80 \pm 0,82$) deutlich höher als an Fz ($2,24 \pm 0,71$; $p < 0,001$). Auch zwischen Fz ($2,24 \pm 0,71$) und Pz ($4,87 \pm 0,67$; $p < 0,05$) war

der Unterschied signifikant, allerdings weniger deutlich ausgeprägt. Zwischen Cz und Pz konnte lediglich ein statistischer Trend beobachtet werden, welcher eine etwas höhere PI an Cz als an Pz aufzeigte ($p = 0,084$).

Aufgrund der signifikanten Interaktion der beiden Faktoren wurden wiederum ANOVAs mit dem Faktor „Bedingung“ bezüglich der drei Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz durchgeführt. Dabei konnte man jeweils an allen drei Elektroden einen signifikanten Einfluss des Faktors „Bedingung“ finden (Fz: $F_{1,24} = 22,77$; $p < 0,001$; Cz: $F_{2,28} = 15,94$; $p < 0,001$; Pz: $F_{2,34} = 4,76$; $p < 0,05$). Ein „PC-Fehler“ ($4,58 \pm 2,55$) führte dabei an Fz zu einer signifikant höheren PI als eine Richtigantwort ($1,04 \pm 3,09$; $t_{17} = 7,26$; $p < 0,001$) oder eine Falschantwort ($1,09 \pm 4,16$; $t_{17} = 4,45$; $p < 0,001$). Zwischen Richtig- und Falschantwort konnte dagegen kein signifikanter Unterschied gefunden werden ($p = 0,928$). An Cz und Pz konnte man analoge Ergebnisse finden. Auch hier war die PI nach einem „PC-Fehler“ (Cz: $9,01 \pm 3,78$, Pz: $5,94 \pm 2,82$) signifikant höher als nach Richtigantworten (Cz: $5,83 \pm 3,51$; $t_{17} = 5,01$; $p < 0,001$; Pz: $4,39 \pm 3,09$; $t_{17} = 2,83$; $p < 0,05$) und Falschantworten (Cz: $5,58 \pm 4,18$; $t_{17} = 4,10$; $p < 0,01$; Pz: $4,28 \pm 3,62$; $t_{17} = 2,48$; $p < 0,05$). Weiterhin war zwischen Richtig- und Falschantwort kein signifikanter Unterschied erkennbar (Cz: $p = 0,653$; Pz: $p = 0,851$). Die Auswirkungen des „PC-Fehlers“ auf die PI waren allerdings an Fz und Cz ($p < 0,001$) deutlicher zu sehen als an Pz ($p < 0,05$).

Im Folgenden sollen nun die reaktionsgemittelten beziehungsweise auf das erste Feedback bezogenen Latenzen von ERN/Ne, Pe und der späten Positivierung PI betrachtet werden.

Zunächst wurde für die ERN/Ne wiederum eine 3x2 ANOVA berechnet. Dabei waren die Haupteffekte „Bedingung“ ($F_{2,33} = 6,35$; $p < 0,01$) und „Elektrodenposition“ ($F_{1,17} = 9,50$; $p < 0,05$) signifikant. Für die Interaktion konnte dagegen keine Signifikanz gefunden werden ($F_{2,33} = 0,42$; $p = 0,65$). Die Latenzen waren grundsätzlich nach Falschantworten ($39,22 \pm 5,85$ ms) kürzer als nach Richtigantworten ($70,36 \pm 10,54$ ms; $p < 0,01$) und „PC-Fehlern“ ($65,36 \pm 11,49$ ms; $p < 0,05$). Außerdem waren die mittleren Latenzen an Fz ($77,26 \pm 9,70$ ms) signifikant länger als an Cz ($39,37 \pm 10,38$ ms; $p < 0,01$).

Für die Analyse der Pe-Latenzen wurde eine 3x3 ANOVA berechnet. Dabei zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor „Elektrodenposition“ ($F_{2,34} = 12,44$; $p <$

0,001) sowie eine signifikante Interaktion der Faktoren „Bedingung“ und „Elektrodenposition“ ($F_{3,54} = 3,14$; $p < 0,05$). Der Faktor „Bedingung“ war dagegen nicht signifikant ($F_{2,32} = 0,97$; $p = 0,39$). Die Latenzen waren dabei an Fz ($266,35 \pm 9,64$ ms) länger als an Cz ($226,43 \pm 11,98$ ms; $p < 0,01$) und Pz ($201,26 \pm 9,03$ ms; $p < 0,001$). Zwischen Cz und Pz konnte dagegen nur ein minimaler, nicht signifikanter Unterschied gefunden werden ($p = 0,11$). Aufgrund der signifikanten Interaktion wurden post-hoc ANOVAs für die Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz getrennt durchgeführt. An Fz konnte für die drei Bedingungen kein signifikanter Unterschied gefunden werden ($F_{2,33} = 1,90$; $p = 0,166$). An Cz trat dagegen ein leichter Unterschied der drei Bedingungen auf, der sich als statistischer Trend zeigte ($F_{2,27} = 3,45$; $p = 0,06$). Dabei war die Pe-Latenz nach „PC-Fehlern“ ($250,78 \pm 20,01$ ms) etwas länger als nach Falschantworten ($202,67 \pm 15,24$ ms; $p < 0,05$), wohingegen der Unterschied zu Richtigantworten ($225,83 \pm 11,55$ ms; $p = 0,20$) nicht signifikant war. Die Latenz nach Richtigantworten ($225,83 \pm 11,55$ ms) war dagegen etwas länger als nach Falschantworten ($202,67 \pm 15,24$ ms; $p < 0,1$). An Pz konnte wiederum kein signifikanter Bedingungseffekt gefunden werden ($F_{2,27} = 1,13$; $p = 0,33$).

Bezüglich der späten Positivierung PI wurde wiederum eine 3x3 ANOVA berechnet. Dabei fand sich ein signifikanter Einfluss des Faktors „Elektrodenposition“ auf die PI-Latenz ($F_{2,33} = 4,14$; $p < 0,05$) sowie eine signifikante Interaktion der beiden Faktoren ($F_{3,56} = 2,74$; $p < 0,05$), wohingegen der Faktor „Bedingung“ die PI-Latenz nicht signifikant veränderte ($F_{2,34} = 0,23$; $p = 0,80$). Insgesamt gesehen waren die Latenzen an Pz ($664,96 \pm 13,48$ ms) deutlich kürzer als an Fz ($703,15 \pm 11,89$ ms; $p < 0,05$) und Cz ($701,67 \pm 11,26$ ms; $p < 0,05$). Fz ($703,15 \pm 11,89$ ms) und Cz ($701,67 \pm 11,26$ ms; $p = 0,90$) unterschieden sich dagegen nur unwesentlich. Aufgrund der signifikanten Interaktion wurden post-hoc ANOVAs (einfaktorielle Varianzanalysen) jeweils für die drei Bedingungen und die drei Elektrodenpositionen durchgeführt. Dabei zeigte der Faktor „Bedingung“ weder an Fz ($F_{2,30} = 1,13$; $p = 0,33$) noch an Cz ($F_{2,34} = 2,04$; $p = 0,15$) oder Pz ($F_{2,34} = 1,48$; $p = 0,24$) wesentliche Effekte. Der Faktor „Elektrodenposition“ ergab dagegen für Richtigantworten an Fz, Cz und Pz signifikant verschiedene PI-Latenzen ($F_{1,19} = 11,00$; $p < 0,01$), wohingegen die Werte nach Falschantworten ($F_{2,31} = 1,69$; $p = 0,20$) und „PC-Fehlern“ ($F_{2,34} = 0,04$; $p = 0,96$) relativ ähnlich waren.

Im Folgenden werden nun die auf das zweite Feedback bezogenen ANOVAs („Bewertungs-Feedback“) betrachtet. Dabei wurden die Amplituden und Latenzen der ERN/Ne und Pe berücksichtigt.

Um die Frage zu klären, ob an den Elektroden Fz und Cz eine signifikante Feedback-ERN/Ne ausgelöst wurde, haben wir eine 3x2 ANOVA durchgeführt. Dabei konnte ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“ gefunden werden ($F_{2,31} = 9,17$; $p < 0,01$), während der Faktor „Elektrodenposition“ ($F_{1,17} = 0,15$; $p = 0,70$) sowie die Interaktion der Faktoren ($F_{2,34} = 1,06$; $p = 0,36$) nicht signifikant waren. „PC-Fehler“ ($-4,01 \pm 0,57$) führten dabei zu signifikant negativeren Amplituden als Richtigantworten ($-2,04 \pm 0,50$; $p < 0,01$). Außerdem traten nach Falschantworten ($-3,44 \pm 0,58$) signifikant negativere Werte als nach Richtigantworten ($-2,04 \pm 0,50$; $p < 0,01$) auf. Dagegen war die ERN/Ne nach „PC-Fehlern“ ($-4,01 \pm 0,57$) nur unwesentlich negativer als nach Falschantworten ($-3,44 \pm 0,59$; $p = 0,21$).

Für die Feedback-Pe wurde wiederum eine 3x3 ANOVA (zweifaktorielle Varianzanalyse) berechnet. Hierbei zeigte sich für den Faktor „Bedingung“ ($F_{1,25} = 9,36$; $p < 0,01$) ein signifikanter Haupteffekt. Für den Faktor „Elektrodenposition“ ($F_{1,22} = 3,99$; $p = 0,05$) konnte dagegen ein statistischer Trend beobachtet werden, während die Interaktion der beiden Faktoren ($F_{3,52} = 1,28$; $p = 0,29$) nicht signifikant war. Bei Mittelung der Werte über die drei Elektrodenpositionen hinweg war die Pe nach „PC-Fehlern“ ($4,43 \pm 0,39$) deutlich größer als nach Richtigantworten ($3,10 \pm 0,31$; $p < 0,01$) und Falschantworten ($3,50 \pm 0,28$; $p < 0,05$). Auch nach Falschantworten ($3,50 \pm 0,28$) war die Pe signifikant größer als nach Richtigantworten ($3,10 \pm 0,31$; $p < 0,05$), allerdings war dieser Unterschied weniger ausgeprägt. Wenn man dagegen die drei Bedingungen mittelte, so war die Pe an der Elektrode Cz ($3,62 \pm 0,34$) deutlich größer als an Fz ($3,11 \pm 0,28$; $p < 0,05$), während sie sich von den Werten an Pz ($4,30 \pm 0,45$; $p = 0,20$) zwar numerisch, aber nicht signifikant unterschied. An Pz ($4,30 \pm 0,45$) war sie allerdings signifikant höher als an Fz ($3,11 \pm 0,28$; $p < 0,05$).

Bezüglich der auf das zweite Feedback bezogenen Latenzen konnte für die ERN/Ne an den Elektroden Fz und Cz mit einer 3x2 ANOVA kein signifikanter Effekt gefunden werden: weder die Faktoren „Bedingung“ ($F_{1,23} = 0,21$; $p = 0,73$) oder „Elektrodenposition“ ($F_{1,17} = 0,003$; $p = 0,96$) noch die Interaktion der Faktoren ($F_{2,34} = 0,03$; $p = 0,97$) waren signifikant. Auch für die Latenz der feedbackbezogenen Pe, die

mit einer 3x3 ANOVA für die Elektroden Fz, Cz und Pz bestimmt wurde, konnte weder ein signifikanter Haupteffekt der beiden Faktoren noch eine signifikante Interaktion gefunden werden (Faktor „Bedingung“: $F_{2,34} = 1,47$; $p = 0,24$; Faktor „Elektrodenposition“: $F_{2,34} = 0,09$; $p = 0,91$; Interaktion: $F_{3,59} = 0,57$; $p = 0,66$).

Zusammenfassend betrachtet war die reaktionsgemittelte beziehungsweise auf das erste Feedback bezogene ERN/Ne nach Falschantworten am negativsten, wenn man sie mit Richtigantworten und „PC-Fehlern“ verglich, wobei dieser Effekt insbesondere an der Elektrode Cz auftrat. Über alle drei Elektroden hinweg betrachtet hatte die Pe nach Falschantworten den größten positiven Wert zu verzeichnen. Allerdings konnte man auch nach „PC-Fehlern“ eine signifikant höhere Pe als nach Richtigantworten finden. Die Amplituden der Pe war dabei jeweils an Fz signifikant kleiner ausgeprägt als an Cz und Pz. An den Elektroden Cz und Pz führten Falschantworten zu einer signifikant höheren Pe als Richtigantworten. Außerdem war deren Amplitude nach Falschantworten signifikant größer als nach „PC-Fehlern“.

Die Pl ließ grundsätzlich nach „PC-Fehlern“ einen größeren positiven Wert erkennen als nach Richtigantworten und Falschantworten. Dieses statistisch signifikante Ergebnis erhielt man auch, wenn man die drei Elektrodenpositionen jeweils getrennt betrachtete. Dabei war die Pl an Cz deutlich stärker als an Fz ausgeprägt.

Innerhalb der auf das zweite Feedback bezogenen Auswertung führten „PC-Fehler“ zu signifikant negativeren ERN/Ne-Amplituden als Richtigantworten. Außerdem waren nach Falschantworten signifikant negativere Werte als nach Richtigantworten zu finden.

Die auf das zweite Feedback bezogene Pe war grundsätzlich nach „PC-Fehlern“ größer als nach Richtigantworten und Falschantworten. Außerdem war sie nach Falschantworten signifikant größer als nach Richtigantworten. Dabei war ihre Amplitude an Cz deutlich größer als an Fz sowie an Pz signifikant höher als an Fz.

4. Diskussion

Die ERN/Ne-Amplitude war in unserer Untersuchung reaktionsgemittelt beziehungsweise auf das erste Feedback bezogen nach Falschantworten am signifikant größten, sowohl gegenüber Richtigantworten als auch „PC-Fehlern“. Zwischen letzteren beiden war dagegen kein signifikanter Unterschied erkennbar. Die Latenz der ERN/Ne war, ebenfalls reaktionsgemittelt, analog hierzu nach Falschantworten am kürzesten, sowohl gegenüber Richtigantworten als auch „PC-Fehlern“. Bezüglich Richtigantworten und „PC-Fehlern“ ergab sich wiederum kein signifikanter Unterschied. Es ist anzumerken, dass das erste Feedback, also das Erscheinen des ausgewählten Buchstabens, nur wenige Millisekunden nach dem Tastendruck auftrat. Daher kann man annäherungsweise von einem gleichzeitigen Auftreten von Tastendruck und erstem Feedback ausgehen. Somit erhält man durch eine Analyse der antwortbezogenen ereigniskorrelierten Potentiale prinzipiell zugleich auch eine Analyse der auf das erste Feedback bezogenen Potentiale. Nach sogenannten „PC-Fehlern“ war hier jedoch, weder im „regulären“ Zeitintervall der ERN/Ne (bis 150 ms nach dem jeweiligen Tastendruck) noch im weiteren Verlauf des Potentials eine frontozentrale Negativierung zu erkennen, wie in den Abbildungen zu erkennen ist, obwohl das erste Feedback (und auch das zweite in Form eines „+“ oder „-“) mit dem nach Falschantworten identisch war. Prinzipiell wäre daher auch nach „PC-Fehlern“ eine ERN/Ne zu erwarten gewesen.

Diese Erkenntnisse stimmen mit den Daten von Falkenstein et al. (2000) tendenziell insofern überein, dass auch diese Autoren signifikant höhere ERN/Ne-Amplituden nach Fehlern im Vergleich zu korrekten Reaktionen fanden. Interessanterweise erkannten Vidal et al. (1995), dass ein Latenzunterschied von 50 ms bis zum Erscheinen der ERN/Ne auftreten kann, je nachdem, ob die EEG-Aufzeichnung mit der EMG-Aktivität der betätigten Extremität oder dem Tastendruck beginnt. Unsere EEG-Aufzeichnungen begannen mit letzterem, und auch das Intervall bis zum Auftreten der ERN/Ne scheint in unserer Studie verkürzt zu sein, was mit Vidal et al. gut vereinbar ist.

Falkenstein et al. (2000) gingen davon aus, dass die ERN/Ne nach Richtigantworten, die von ihnen CRN genannt wird, mit einer Latenz von 40 ms auftritt. Die gemessene ERN/Ne, welche nach Falschantworten entsteht, setzte sich dagegen aus einer CRN und

einer „tatsächlichen“ ERN/Ne zusammen, welche nach Angaben der Autoren nach etwa 80 ms zu erwarten sei. Somit sollte auch in unserer Studie die „ERN/Ne“, welche nach Richtigantworten auftritt (CRN), gegenüber der ERN/Ne nach Falschantworten eine deutlich verkürzte Latenz aufweisen. Dies ist jedoch bei den reaktionsgemittelten beziehungsweise auf das erste Feedback bezogenen ERN/Ne-Werten nicht feststellbar. Die ERN/Ne wies bei uns nach Falschantworten eine kürzere Latenz als nach Richtigantworten auf. Somit kann dieses Ergebnis von Falkenstein et al. nicht bestätigt werden.

Die Amplitude der auf das zweite Feedback bezogenen ERN/Ne war in unserer Studie nach „PC-Fehlern“ signifikant größer als nach Richtigantworten. Gegenüber Falschantworten war die Amplitude der „PC-Fehler“ dagegen nicht signifikant verändert. Die ERN/Ne-Amplitude nach Richtigantworten stimmt dabei in etwa mit den Ergebnissen von Luu et al. (2003) überein, wo sie mit etwa 3,5 μV angegeben wird. Ihre Latenz ist bei Luu et al. allerdings deutlich länger als in unserer Studie. Dies lässt sich möglicherweise mit einer unterschiedlichen Rückmeldung erklären. Während Luu et al. bei Richtigantworten ein „A“, „C“ oder „F“ als Rückmeldung erscheinen ließen, je nachdem wie schnell die Antwort war, wurde in unserer Studie lediglich ein „+“ für eine Richtigantwort gegeben. Somit könnten die Latenzunterschiede durch eine unterschiedlich ausgeprägte Reizverarbeitung erklärbar sein. Die Latenz der Feedback-ERN bei Holroyd et al. (2003) stimmt dagegen relativ deutlich mit unseren Werten überein.

Die Amplitude der Pe war in unserer Studie reaktionsgemittelt nach Falschantworten am größten, während sie nach Richtigantworten und nach „PC-Fehlern“ deutlich kleiner und hier in etwa gleich groß war. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Falkenstein et al. (2000) überein, wo eine Pe lediglich nach Falschantworten beobachtet wurde, während nach Richtigantworten nur ein positiver Komplex auftrat, welcher vor allem an Pz ausgeprägt war. Bei Falkenstein war das Maximum der Pe an Cz zu finden, was auch in unserer Studie zu beobachten war. Unsere Pe-Latenz nach Falschantworten stimmt in etwa mit den Ergebnissen von Falkenstein et al. (2000) überein.

Nach einer fehlerhaften Reaktion konnte also reaktionsgemittelt eine ERN/Ne detektiert werden, der anschließend eine Pe folgte, während beides nach Richtigantworten nicht

(oder zumindest signifikant weniger ausgeprägt) der Fall war. Dies stimmt mit der Mehrheit der bisherigen Studien zur Fehlerverarbeitung überein.

Bei den sogenannten „PC-Fehlern“, wenn der Computer also bei richtiger Antwort eine fehlerhafte Rückmeldung gab, konnte reaktionsgemittelt beziehungsweise nach dem ersten Feedback keine ERN/Ne gefunden werden. Nach dem zweiten Feedback war dagegen nach „PC-Fehlern“ eine signifikant größere Negativierung als nach Richtigantworten zu erkennen, die somit einer ERN/Ne entspricht. Die zusätzliche Suche im Intervall, welches sich auf das zweite Feedback bezieht, erschien sinnvoll, weil – aufgrund der mit der tatsächlich gegebenen Antwort konfligierenden Rückmeldung – möglicherweise auch hier eine ERN/Ne zu erwarten gewesen wäre (vgl. auch Befunde zu einer generellen „Feedback-ERN“). Der Grund, warum nach dem zweiten Feedback eine ERN/Ne auftritt, nach dem ersten jedoch nicht, könnte auf das Vorhandensein beziehungsweise Fehlen einer motorischen Reaktion zurückgehen. Der Zeitpunkt des ersten Feedbacks ist zeitlich eng mit der motorischen Reaktion des Probanden verknüpft. Somit hat das Fehlererkennungssystem einerseits die Möglichkeit, der eigenen inneren Repräsentanz zu folgen, welche auf die motorische Reaktion zurückgeht, von welcher das System weiß, dass sie korrekt durchgeführt wurde. Zum anderen könnte es sich an der von außen eingegebenen Rückmeldung, also dem ersten Feedback, orientieren. Das Fehlererkennungssystem scheint sich im Konfliktfall jedoch bevorzugt an der eigenen Motorreaktion zu orientieren, weshalb antwortbezogen beziehungsweise auf das erste Feedback bezogen keine ERN/Ne generiert wird. Zum Zeitpunkt des zweiten Feedbacks ist die motorische Reaktion jedoch bereits beendet. Hier kann sich das System nur noch an der von außen eingegebenen Rückmeldung orientieren, weshalb hier eine ERN/Ne entstehen kann. Weiterhin wäre es möglich, dass der Proband nun, da die Motorreaktion bereits beendet ist, an der Korrektheit seiner Antwort zu zweifeln beginnt, wodurch die Generierung einer ERN/Ne unterstützt werden könnte.

Die Lokalisation der ERN/Ne unserer Versuchsreihe ist mit der anderer Autoren vergleichbar. Sie war auch bei uns vor allem im frontozentralen Bereich der Kopfhaut zu detektieren, wobei die maximale Ausprägung an der Zentralelektrode Cz zu erkennen war. Die Pe war dagegen im zentroparietalen Bereich am besten erkennbar,

was beispielsweise mit den Ergebnissen von Hohnsbein et al. (1989) und Falkenstein et al. (1990) gut übereinstimmt.

Die Theorie des Verstärkungslernens kann durch unsere vorliegenden Daten nicht in vollem Umfang bestätigt werden. Sie geht davon aus, dass die ERN/Ne umso größer ist, je schlechter die gegebene Antwort im Vergleich zur erwarteten Antwort ausfällt. Unser Paradigma war derart programmiert, dass zunächst eine Reihe von Durchgängen erfolgte, bei welchen auf die sogenannten „PC-Fehler“ verzichtet wurde, so dass dem Probanden ausreichend Zeit blieb, sich an die jeweils zu erwartende Rückmeldung zu gewöhnen. Beging der Proband dabei einen Fehler, so sollte dieser den inneren Erwartungen an eine Richtigantwort zuwiderlaufen, wenn man voraussetzt, dass zuvor die meisten Reaktionsaufgaben richtig beantwortet wurden. Somit fiel die Reaktion schlechter als erwartet aus und sollte damit eine ERN/Ne generieren. Übereinstimmend mit dieser Vorstellung war in unserer Studie die ERN/Ne sowohl reaktionsgemittelt als auch auf das zweite Feedback bezogen nach Falschantworten signifikant größer als nach Richtigantworten. Dies kann von verschiedenen Autoren, beispielsweise Falkenstein et al. (2000), bestätigt werden. Im weiteren Verlauf unseres Paradigmas wurden dann die ersten „PC-Fehler“ eingeführt, welche intermittierend bis zu dessen Ende auftraten. Diese lassen, noch mehr als Falschantworten, einen sehr deutlich ausgeprägten „negativen Überraschungseffekt“ erwarten, da der Proband ja tatsächlich richtig reagierte, ihm aber über die unmittelbare Rückmeldung eine Fehlreaktion vorgehalten wurde. Dieser Überraschungseffekt wurde auch durch die akustischen und verbalen Reaktionen der Probanden bestätigt. Einige drückten nur kurz ihr Erstaunen aus, andere nutzten die Pausen zwischen den Versuchseinheiten, um den Versuchsleiter auf das vermeintlich fehlerhafte Paradigma hinzuweisen. Man kann daher davon ausgehen, dass die Probanden über die diametrale Rückmeldung definitiv überrascht waren. Somit sollte die auftretende Rückmeldung deutlich schlechter als erwartet sein, weshalb auf mindestens einen der beiden Feedback-Reize (unmittelbar nach der Reaktion bzw. im weiteren Verlauf auftretend) bezogen eine ERN/Ne mit großer Amplitude zu erwarten gewesen wäre. Weiterhin würde man nach anfänglichen „PC-Fehlern“ eine besonders hohe ERN/Ne erwarten, da der Überraschungseffekt zunächst sehr groß sein sollte. Mit immer häufiger werdenden „PC-Fehlern“ sollte die ERN/Ne dagegen kleiner werden, da nun schon ein gewisser Gewöhnungseffekt eingetreten sein

sollte. Wider Erwarten konnte jedoch nach „PC-Fehlern“ reaktionsgemittelt keine signifikante Negativierung detektiert werden. Um nichts zu übersehen, suchten wir bei „PC-Fehlern“ stimulus- und reaktionsgemittelt nach einer ERN/Ne, jedoch mit negativem Ergebnis. Auf das zweite Feedback gemittelt war dagegen nach „PC-Fehlern“ eine ERN/Ne zu detektieren. Somit kann die Theorie des Verstärkungslernens bezüglich der aufgetretenen Falschantworten bestätigt werden, übereinstimmend mit den Ergebnissen anderer Autoren. Die in unserer Studie neu eingeführten „PC-Fehler“ bestätigen die Theorie zumindest teilweise, da nach dem zweiten Feedback eine ERN/Ne auftrat, jedoch nicht antwortbezogen beziehungsweise nach dem ersten Feedback.

Auffallend war zudem eine späte Positivierung (PI), die reaktionsgemittelt nach „PC-Fehlern“ signifikant größer war als nach Richtig- und Falschantworten. Von ihrer Verteilung her war sie eher in den mittleren Kopfhautbereichen lokalisiert, weshalb es nicht sinnvoll erschien, sie mit der Pe, welche nach der ERN/Ne auftritt, gleichzusetzen (vgl. Topographie Pe vs. PI). Außerdem lag ihr Latenzbereich weit später als der der Pe. Man könnte sich vorstellen, dass diese PI, die so nur nach „PC-Fehlern“ auftrat, auf andere Weise den Überraschungseffekt des Probanden und den ihm zugrundeliegenden neuronalen Verarbeitungsprozess widerspiegelt. Möglicherweise drückt sich in der PI eine Art Konflikt aus, einerseits zwischen der inneren Überzeugung, richtig reagiert zu haben und andererseits der genau entgegengesetzten Rückmeldung, welche die innere Repräsentanz des Reaktionsverhaltens infrage stellt. Möglich wäre allerdings auch ein völlig eigenes Fehlererkennungssystem, das von der bisherigen ERN/Ne und Pe getrennt betrachtet werden muss und möglicherweise der Entdeckung von (verhaltensunabhängigen) „externen“ (Umwelt-)Fehlern zugrunde liegt.

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass unsere Ergebnisse sowohl mit der Konflikterkennungs- als auch Fehlererkennungstheorie vereinbar sind. Wenn sogenannte „PC-Fehler“ in unserer Studie auftraten, so lag diesen prinzipiell eine Richtigantwort zugrunde. Lediglich die Rückmeldung wies auf eine vermeintliche Fehlreaktion hin, die jedoch nicht begangen wurde. Nach der Konflikterkennungstheorie ist die Amplitude der ERN/Ne umso höher, je mehr sich gegebene und gesuchte Antwort ähneln. Nachdem bei „PC-Fehlern“ die gegebene Antwort mit der gesuchten Antwort identisch ist, entsteht auch kein Antwortkonflikt,

weshalb reaktionsgemittelt keine ERN/Ne generiert werden sollte. Unsere Ergebnisse sind daher mit der Konflikterkennungstheorie vereinbar. Analoges gilt für die Fehlererkennungstheorie. Ihr zufolge entsteht dann eine ERN/Ne mit großer Amplitude, wenn sich die gegebene und die gesuchte Antwort deutlich voneinander unterscheiden. Nachdem gesuchte und gegebene Antwort in diesem Fall identisch sind, sollte auch ihr zufolge keine ERN/Ne auftreten.

Unser Paradigma weist gewisse Parallelen zu dem auf, das von van Schie et al. (2004) bereits verwendet wurde. Bei den Autoren wurde ein Akteur eingesetzt, welcher einen Bildschirm mit Pfeilen vor sich hatte, die entweder nach links oder rechts zeigten. Dabei sollte jeweils der mittlere Pfeil betrachtet werden, während dieser jeweils links und rechts von zwei weiteren Pfeilen flankiert wurde, welche die Reaktionsaufgabe erschweren sollten. Der Akteur sollte auf derjenigen Seite, zu welcher der Pfeil jeweils zeigte, mit einem Joystick möglichst schnell reagieren. Der Beobachter saß dem Akteur genau gegenüber und hatte ebenfalls einen Bildschirm vor sich, welcher allerdings nur den einen, jeweils relevanten Pfeil darstellte. Da für ihn die Hände des Akteurs sichtbar waren, konnte er dessen Reaktionsverhalten unmittelbar beobachten. Somit waren für den Beobachter tatsächlich begangene Fehler des Akteurs erkennbar, welche bei ersterem eine ERN/Ne induzierten. Auch bei unserem Paradigma wurden gewissermaßen Fehler beobachtet, wenn sogenannte „PC-Fehler“ auftraten, allerdings mit dem Unterschied, dass diese nicht tatsächlich begangen wurden. Stattdessen wurde bei einem korrekten Tastendruck mittels Computerbildschirm eine Fehlreaktion vorgegeben, indem kurz nach dem Betätigen einer Shifttaste der jeweils entgegengesetzte, nicht ausgewählte Buchstabe erschien, welcher somit zu einer angeblichen Falschantwort führte. Kurz darauf wurde, ebenfalls per Computerbildschirm, die dazu passende negative Rückmeldung gegeben. Weiterhin war die Person des Akteurs nicht von der des Beobachters, wie bei van Schie et al., getrennt, sondern beide Funktionen wurden von ein und derselben Person wahrgenommen. Van Schie et al. (2004) konnten beim Beobachter eine reaktionsgemittelte ERN/Ne detektieren, welche bei unserem Paradigma nach „PC-Fehlern“ reaktionsgemittelt beziehungsweise nach dem ersten Feedback nicht gefunden wurde. Dies könnte durch die Tatsache bedingt sein, dass bei van Schie et al. der Beobachter die motorische Reaktion des Akteurs unmittelbar verfolgen konnte, was

wohl zur Aktivierung auch seines Motorkortexes geführt haben wird. Bei unserer Versuchsanordnung konnte die Versuchsperson bei „PC-Fehlern“ keine solche motorische Aktivität beobachten, jedenfalls keine, die zur gegebenen Rückmeldung passen würde. Stattdessen wurde im Rahmen der Reaktion des Probanden die genau entgegengesetzte Motorreaktion durchgeführt als durch die Rückmeldung repräsentiert wurde. Somit könnte das Auftreten einer ERN/Ne beim Beobachter unabdingbar an das Verfolgen der dazu passenden motorischen Reaktion geknüpft sein. Van Schie et al. (2004) wiesen bereits darauf hin, dass auch beim Beobachten von Reaktionsaufgaben anderer der Motorkortex aktiv ist, was einen solchen Zusammenhang vermuten lässt. Weniger plausibel erscheint allerdings die Tatsache, dass laut van Schie et al. stets zunächst die Repräsentanz einer Richtigantwort beim Beobachter generiert wird, unabhängig davon, wie der Akteur tatsächlich reagieren wird. Erst im weiteren Verlauf wird diese dann, je nach Reaktion des Akteurs, modifiziert. Eine ähnliche motorische Repräsentanz sollte man auch in unserer Studie erwarten, da bei „PC-Fehlern“ stets zunächst eine Richtigantwort gegeben wurde und damit ebenfalls die Repräsentanz einer Richtigantwort, wie bei van Schie et al., aktiviert werden sollte. Dennoch konnte bei uns keine ERN/Ne gefunden werden, was auf eine anders geartete Aktivierung des Motorkortexes schließen lässt.

Miltner et al. (1997) beschrieben eine Feedback-ERN/Ne, welche zwischen 230 und 330 ms nach negativem Feedback auftrat, wenn zuvor eine Fehlreaktion durchgeführt wurde. Die Probanden sollten dabei das Zeitintervall von einer Sekunde abschätzen, indem sie eine Taste der Computertastatur betätigten. Dabei wurde visuell ein „X“ oder „O“ als Rückmeldung gegeben, je nachdem, ob die Schätzung gewissen Grenzwerten genügte oder nicht. Wenn dabei eine negative Rückmeldung gegeben wurde, konnte feedbackbezogen eine ERN/Ne beobachtet werden. Auch hier gibt es zu unserem Paradigma gewisse Parallelen. In beiden Fällen wurde eine negative Rückmeldung gegeben, welche sich auf eine vorangehende Reaktionsaufgabe bezog. Allerdings wurde bei Miltner et al. tatsächlich fehlerhaft reagiert und die damit verbundene Motorreaktion durchgeführt, während bei uns per negativem Feedback lediglich eine Fehlreaktion vorgegaukelt wurde, zu welcher es kein motorisches Korrelat gab. Dennoch konnte sowohl bei Miltner et al. als auch nach „PC-Fehlern“ unseres Paradigmas eine Feedback-ERN/Ne beobachtet werden. Somit scheinen für die

Generierung einer reaktionsgemittelten und einer feedbackgemittelten ERN/Ne verschiedene Voraussetzungen nötig zu sein. Während eine reaktionsgemittelte ERN/Ne nur entstehen kann, wenn eine gleichsinnige motorische Repräsentanz vorliegt, kann eine feedbackgemittelte ERN/Ne, wie bei unserem Paradigma, offenbar auch durch eine alleinige negative Rückmeldung generiert werden.

Diese Vorstellung ist auch mit einer Studie von Ruchow et al. (2002) kompatibel, in welcher die Probanden erraten sollten, welche von vier verschiedenen Karten eines französischen Kartenspiels als nächstes auf dem Bildschirm erscheinen wird. Dabei wurde eine der vier Karten per Computertastatur, also motorisch, ausgewählt, woraufhin eine feedbackbezogene ERN/Ne auftrat, wenn eine andere als die ausgewählte Karte als Rückmeldung erschien, das Feedback also negativ war. Die „PC-Fehler“ scheinen also bei unserem Paradigma reaktionsgemittelt zu keinem Fehlermonitoring oder einer damit einhergehenden neuronalen Verarbeitung zu führen. Wenn man diese Annahme zugrunde legt, so wäre auch nach „PC-Fehlern“ die für Richtigantworten typische CRN zu erwarten, sofern sich der Verarbeitungsprozess nicht von dem einer Richtigantwort unterscheidet. Die reaktionsgemittelte beziehungsweise auf das erste Feedback bezogene ERN/Ne ist nach unseren Ergebnissen tatsächlich nach Richtigantworten und „PC-Fehlern“ nicht signifikant verschieden. Somit kann man davon ausgehen, dass zumindest im reaktionsgemittelten Zeitintervall nur die Richtigantwort repräsentiert wurde und es zu keiner Fehlerverarbeitung kam. Die auf das zweite Feedback bezogenen ERN/Ne-Werte zeigen dagegen für Richtigantworten und „PC-Fehler“ einen signifikanten Unterschied. Dabei führte die nach „PC-Fehlern“ gegebene negative Rückmeldung zu einer deutlich größeren ERN/Ne-Amplitude als nach Richtigantworten, was auf einen Fehlerverarbeitungsprozess hinweist, der zunächst nicht vorhanden war, allerdings mit Auftreten des zweiten Feedbacks begann. Die reaktionsgemittelte ERN/Ne nach „PC-Fehlern“ scheint also mit der CRN nach Richtigantworten identisch zu sein. Die auf das zweite Feedback bezogene ERN/Ne war dagegen nach „PC-Fehlern“ signifikant negativer als nach Richtigantworten, so dass sie wohl durch die negative Rückmeldung induziert wurde.

Es lassen sich noch weitere Hypothesen aufstellen, warum nach „PC-Fehlern“ reaktionsgemittelt keine ERN/Ne auftrat. So protestierten einige unserer Probanden

beim Auftreten der falschen Rückmeldung heftigst und wiesen den Versuchsleiter auf das vermeintlich fehlerhafte Paradigma hin. Andere dagegen verhielten sich während des gesamten Versuchsablaufs ruhig und zeigten keinerlei Anzeichen innerer Erregung. Auch als sie hinterher gefragt wurden, ob ihnen etwas Besonderes aufgefallen sei, verneinten einige diese Frage, oder sie gaben relativ gleichgültig zu verstehen, dass wohl gelegentlich eine fehlerhafte Rückmeldung erschien, was sie aber offenbar kaum berührte. Daher wäre es möglich, dass die Motivation einiger Probanden, möglichst viele Reaktionsaufgaben richtig durchzuführen, zu gering ausgeprägt war. Vielleicht hätte der Anreiz im Rahmen der Versuchsbedingungen erhöht werden sollen. So boten einige Autoren den Probanden finanzielle Anreize, wie beispielsweise Ruchsov et al. (2002), bei denen der Proband für jede richtig geratene Spielkarte 1 DM erhielt und für jede falsch geratene Karte den gleichen Betrag abgeben musste. Vielleicht hätten sich so signifikante Unterschiede ergeben, die bei unserem Versuchsablauf nicht eintraten. Weiterhin klagten einige Probanden über zu lange Versuchsdurchgänge und zu seltene Pausen. Somit ließ möglicherweise deren Konzentration während des Paradigmas allmählich nach, was zu einer geringeren Fehleraufmerksamkeit geführt haben könnte. Daher wäre es möglich, dass einige Probanden während der letzten Versuchsdurchgänge, in denen die meisten „PC-Fehler“ auftraten, nicht mehr ausreichend konzentriert waren, um diese zu registrieren. Da wir in unserer Studie den Grandaverage aller Probanden verwendeten, könnte so eine signifikante Negativierung einiger Probanden eliminiert worden sein. Vielleicht sollten künftige Versuchsleiter das gleiche Paradigma nochmals durchführen, dabei aber die einzelnen Versuchsblöcke kürzen und dazwischen ausreichend lange Pausen ermöglichen.

Bezüglich der unterschiedlichen Elektrodenpositionen war die ERN/Ne reaktionsgemittelt an Fz deutlich negativer als an Cz. Dagegen konnte nach dem zweiten Feedback für die Elektroden Fz und Cz kein signifikanter Unterschied gefunden werden. Bei anderen Autoren, wie beispielsweise Pailing et al. (2002), wurde die ERN/Ne an den Elektroden Fz, Cz und Pz detektiert, während wir sie nur an Fz und Cz fanden. Außerdem konnten Pailing et al. (2002) die größte Negativierung an Cz detektieren, während sie nach unseren Daten bei Fz lag. In unserer Studie war die ERN/Ne an Cz nach Falschantworten signifikant negativer als nach Richtigantworten und „PC-Fehlern“. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von Pailing et al. (2002) überein,

wo ebenfalls an Cz die größte Negativierung nach Falschantworten auftrat. Die Latenz der ERN/Ne war reaktionsgemittelt an Fz signifikant länger als an Cz. Bei Pailing et al. war sie dagegen an Fz und Cz ungefähr gleich groß. Die auf das zweite Feedback bezogenen Latenzen der ERN/Ne zeigten dagegen für die Elektroden Fz und Cz in unserer Studie keinen signifikanten Unterschied.

Die bereits bei Sutton et al. (1965) beschriebene Positivierung, welche nach der ERN/Ne auftritt, konnte auch in unserer Studie detektiert werden. Sie war reaktionsgemittelt nach Falschantworten am größten, während sie nach Richtigantworten und nach „PC-Fehlern“ signifikant kleiner war. Dabei war sie sowohl nach Falschantworten als auch „PC-Fehlern“ signifikant größer als nach Richtigantworten. Die Pe-Werte waren an Cz am deutlichsten ausgeprägt, gefolgt von Pz und Fz. Die reaktionsgemittelten Pe-Latenzen waren an Fz am längsten, verglichen mit Cz und Pz. Die auf das zweite Feedback bezogenen Amplituden verhielten sich ähnlich. Hier war die Pe nach „PC-Fehlern“ am positivsten, während sie nach Falschantworten und nach Richtigantworten signifikant kleiner war. Wiederum war die Positivierung sowohl nach „PC-Fehlern“ als auch Falschantworten signifikant größer als nach Richtigantworten. Die von Pailing et al. (2002) ermittelten Latenzen sind wiederum etwas länger als diejenigen, welche in unserer Studie beobachtet wurden. Wenn man allerdings, wie bereits oben beschrieben, 50 ms hinzuaddiert, so sind diese Werte mit denen von Pailing et al. vergleichbar.

Verschiedene Studien zeigten bereits die unterschiedliche Variation der ERN/Ne einerseits und der Pe andererseits, weshalb die beiden Komponenten wahrscheinlich unterschiedliche Fehlerverarbeitungsmechanismen widerspiegeln. So zeigte eine Literaturschau von Overbeek et al. (2005), dass die ERN/Ne in Entwicklungsstudien bei Kindern kleiner als bei jungen Erwachsenen war, während die Pe in beiden Gruppen annähernd gleich ausgeprägt war. Weiterhin war die ERN/Ne, den gleichen Autoren zufolge, bei Alzheimerpatienten, Parkinsonkranken und Schizophrenen deutlich kleiner als bei gesunden Kontrollen, während für die Pe kein Unterschied gefunden wurde. Ruchow et al. (2005) beobachteten eine vergrößerte ERN/Ne bei Zwangspatienten und konnten wiederum bezüglich der Pe keine derartigen Veränderungen feststellen.

Nach Falkenstein et al. (2004) könnte die Pe zum einen eine Affektverarbeitung widerspiegeln, was bedeutet, dass sie die emotionale Bewertung des Fehlers oder seiner Konsequenzen wiedergibt. Dies würde bedeuten, dass Probanden, welchen viele Fehler unterlaufen, eine kleinere Pe zeigen als Probanden mit wenigen Fehlern, da sich die ersteren um Fehler weniger sorgten als die letzteren. Nach der Verhaltensanpassungstheorie sollte ein Zusammenhang zwischen der Verhaltensanpassung nach einem Fehler, wie beispielsweise einer Reaktionsverlangsamung, und der Pe-Amplitude erkennbar sein, wie dies von Hajcak et al. (2003) und Nieuwenhuis et al. (2001) beobachtet wurde. Die dritte Theorie, nämlich die der bewussten Fehlererkennung, geht davon aus, dass die Pe-Amplitude mit dem Grad der bewussten Fehlererkennung korreliert und wurde von Kaiser et al. (1997) und Nieuwenhuis et al. (2001) bestätigt. Insgesamt gibt es nur wenige Studien, welche die Theorie der Affektverarbeitung und die der Verhaltensanpassung unterstützen, während die Theorie der bewussten Fehlererkennung derzeit stärker favorisiert wird (Overbeek et al., 2005).

Wie bereits beschrieben war in unserer Studie eine Positivierung zu beobachten, welche wir PI nannten. Ihre Amplitude war an allen drei Elektroden, also Fz, Cz und Pz, nach „PC-Fehlern“ signifikant größer als nach Richtigantworten einerseits und Falschantworten andererseits, während zwischen letzteren kein signifikanter Unterschied bestand. Ihre Latenz war an Fz einerseits und an Cz andererseits signifikant länger als an Pz, während zwischen Fz und Cz kein signifikanter Unterschied gefunden wurde. Die drei Bedingungen ergaben keine signifikant verschiedenen PI-Latenzen. Die Amplituden der reaktionsgemittelten Pe und PI waren dagegen an den drei Elektroden Fz, Cz und Pz ähnlich verteilt. In beiden Fällen war sie an Cz am größten, an Pz am zweitgrößten und an Fz am drittgrößten ausgeprägt, was auf eine gewisse Gemeinsamkeit beider Komponenten schließen lassen könnte. Bezüglich der drei Bedingungen zeigten sich allerdings deutliche Unterschiede. Die reaktionsgemittelte Pe war nach Falschantworten am größten und dabei signifikant größer als nach Richtigantworten und „PC-Fehlern“. Nach „PC-Fehlern“ war sie wiederum signifikant größer als nach Richtigantworten. Die PI war dagegen nach „PC-Fehlern“ am größten und dabei signifikant gegenüber Richtigantworten und Falschantworten. Für Richtig- und Falschantworten zeigte sich hingegen kein

signifikanter Unterschied. Somit scheinen sich die drei Bedingungen unterschiedlich auf die Generierung der Komponenten auszuwirken, weshalb jeweils verschiedene neuronale Systeme ursächlich sein könnten. Möglicherweise ist die PI auch gänzlich unabhängig von der Pe zu betrachten. Nachdem sie nach „PC-Fehlern“ am deutlichsten ausgeprägt war und in anderen Studien noch nicht beschrieben wurde, könnte sie durch die Eigenheiten unseres Paradigmas entstehen. So könnte sie beispielsweise den Überraschungseffekt widerspiegeln, wenn nach einer korrekten Antwort eine fehlerhafte Rückmeldung erschien. Die PI könnte aber auch Prozesse wiedergeben, welche schon von anderen Autoren außerhalb des Fehlerverarbeitungs-Kontextes beschrieben wurden. Friederici (2004) beschrieb eine P600, welche im EEG zu detektieren war, wenn man Probanden Sätze mit syntaktischen Fehlern vorlas. Diese stimmt relativ deutlich mit unserem Zeitfenster überein. Die PI könnte aber auch mit einer der sogenannten „langsamen Wellen“ verwandt sein, welche beispielsweise von Rösler et al. (1997) beschrieben wurden und einen weniger charakteristischen Gipfel aufwiesen. Diese können demnach mehrere hundert Millisekunden, aber auch mehrere Sekunden andauern. Die PI begann für „PC-Fehler“ etwa 400 ms nach dem Tastendruck und endete nach etwa 600 ms. Somit könnte sie eine derartige Welle widerspiegeln. Allerdings haben langsame Wellen meist eine negative Polarität, was wiederum im Gegensatz zur positiven Polarität der PI steht. Insgesamt betrachtet ist die Natur der PI also noch unbekannt. Vielleicht werden künftige Studien in der Lage sein, ihre Funktion genauer zu erklären.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie habe ich gezeigt, dass eine Error-related Negativity, kurz ERN/Ne, wie in anderen Studien bereits detektiert, nach Falschantworten von Versuchspersonen auftritt. Nach sogenannten „PC-Fehlern“, bei welchen die Probanden korrekt reagierten, der Computer jedoch eine Falschantwort durch eine negative Rückmeldung vorgab, kam es wider Erwarten reaktionsgemittelt zu keiner ERN/Ne. Nach dem zweiten Feedback war jedoch eine ERN/Ne zu detektieren. In der vorliegenden Studie trat zudem nach „PC-Fehlern“ eine späte Positivierung auf, kurz als PI bezeichnet, deren Funktion bisher unklar ist. Sie könnte auf einem Überraschungseffekt der Probanden beruhen, welcher auftritt, wenn die tatsächlich richtige Reaktion vom Computer als fehlerhaft bezeichnet wird.

6. Literaturverzeichnis

Baleydier C., Mauguiere F. (1980). The duality of the cingulate gyrus in monkey. Neuroanatomical study and functional hypothesis. *Brain*, 103, 3, 525-554.

Barch D. M., Carter C. S., Perlstein W., Baird J., Cohen J. D., Schooler N. (1999). Increased stroop facilitation effects in schizophrenia are not due to increased automatic spreading activation. *Schizophrenia Research*, 39, 51-54.

Bates A. T., Kiehl K. A., Laurens K. R., Liddle P. F. (2002). Error-related negativity and correct response negativity in schizophrenia. *Clinical Neurophysiology*, 113, 1454-1463.

Bates A. T., Patel T. P., Liddle P. F. (2005). External Behavior Monitoring Mirrors Internal Behavior Monitoring: Error-Related Negativity for Observed Errors. *Journal of Psychophysiology*, 19, 281-288.

Bernstein P. S., Scheffers M. K., Coles M. G. H. (1995). Where did you go wrong? A psychophysiological analysis of error-detection. *Journal of Experimental Psychology of Human Perception and Performance*, 21, 1312-1322.

Blakemore S., Decety J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 561-567.

Blandin Y., Proteau L. (2000). On the cognitive basis of observational learning: development of mechanisms for the detection and correction of errors. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology* (2000). 53A, 846-867.

Botvinick M. M., Braver T. S., Barch T. M., Carter C. S., Cohen J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624-652.

- Brázdil M., Roman R., Falkenstein M., Daniel P., Jurák P., Rektor I. (2002). Error processing – evidence from intracerebral ERP recordings. *Experimental Brain Research*, 146, 460-466.
- Bystritsky A., Pontillo D., Powers M., Sabb F. W., Craske M. G., Bookheimer S. Y. (2001). Functional MRI changes during panic anticipation and imagery exposure. *Neuroreport*, 12 (18), 3953-3957.
- Carter C. S., Braver T. S., Barch D.M., Botvinick M. M., Noll D., Cohen J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747-749.
- Coles M. G. H., Scheffers M. K., Fournier L. (1995). Where did you go wrong? Errors, partial errors, and the nature of human information processing. *Acta Psychologica*, 90, 129-144.
- Coles M. G. H., Scheffers M. K., Holroyd C. B. (2001). Why is there an ERN/Ne on correct trials ? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing. *Biological Psychology*, 56, 173-189.
- Davies P. L., Segalowitz S. J., Dywan J., Pailing P. E. (2001). Error-negativity and positivity as they relate to other ERP indices of attentional control and stimulus processing. *Biological Psychology*, 56, 191-206.
- Dehaene S., Posner M. I., Tucker D. M. (1994). Localization of a Neural System for Error Detection and Compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.
- Elton M., Band G., Falkenstein M. (2000). To err is human. *Biological Psychology*, 51, 83-85.

Eriksen C. W., Eriksen B. A. (1979). Target redundancy in visual research: Do repetitions of the target within the display impair processing? *Perception and Psychophysics*, 26, 195-205.

Falkenstein M. (2004). ERP correlates of erroneous performance. In: Ullsperger M., Falkenstein M. (eds.). *Errors, conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring (MPI special issue in human cognitive and brain sciences, 1, 5-14)*. Leipzig: MPI for Cognitive Neurosciences.

Falkenstein M., Hielscher H., Dziobek I., Schwarzenau P., Hoormann J., Sundermann B., Hohnsbein J. (2000). Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: An ERP study. *Neurophysiology, Basic and Clinical*, 12, 157-161.

Falkenstein M., Hielscher H., Dziobek I., Schwarzenau P., Hoormann J., Sundermann B., Hohnsbein J. (2001b). Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: An ERP study. *NeuroReport*, 12, 157-161.

Falkenstein M., Hohnsbein J., Hoormann J. (1994). Effects of choice complexity on different subcomponents of the late positive complex of the event-related potential. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 92, 148-160.

Falkenstein M., Hohnsbein J., Hoormann J. (1996). Differential processing of motor errors. In: Ogura C., Koga Y., Shimokochi M. (eds.). *Recent advances in event-related brain potential research*. Amsterdam: Elsevier, 579-585.

Falkenstein M., Hohnsbein J., Hoormann J., Blanke L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In: C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard, A. Kok (eds.), *Psychological brain research*, 192-195. Tilburg, The Netherlands: Tilburg University Press.

Falkenstein M., Hoormann J., Christ S., Hohnsbein J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.

Falkenstein M., Hoormann J., Hohnsbein J. (1999). ERP components in Go/Nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta psychologica*, 101, 267-291.

Falkenstein M., Hoormann J., Hohnsbein J. (2000). Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Brain Research*, 138, 258-262.

Falkenstein M., Willemsen R., Hohnsbein J., Hielscher H. (2005). Error Processing in Parkinson's Disease: The Error Positivity (Pe). *Journal of Psychophysiology*, 19, 305-310.

Fallgatter A. J., Herrmann M. J., Roemmler J., Ehlis A.-C., Wagnener A., Heidrich A., Ortega G., Zeng Y., Lesch K.-P. (2004). Allelic variation of serotonin transporter function modulates the brain electrical response for error processing. *Neuropsychopharmacology*, 29, 1506-1511.

Friederici A. D. (2004). Event-related potential studies in language. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 4, 466-470.

Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119, 593-609.

Gehring W. J., Coles M. G. H., Meyer D. E., Donchin E. (1990). The error-related negativity: An event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology*, 27, S34. (Abstract).

Gehring W. J., Goss B., Coles M. G. H., Meyer D. E., Donchin F. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.

Gehring W. J., Fencsik D. E. (2001). Functions of the Medial Frontal Cortex in the Processing of Conflict and Errors. *The Journal of Neuroscience*, 21, 9430-9437.

Gehring W. J., Himle J., Nisenson L. G. (2000). Action-Monitoring Dysfunction on Obsessive-Compulsive Disorder. *American Psychological Society*, 11, 1-6.

Gehring W. J., Knight R. T. (2000). Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*, 3, 516-520.

Gratton G., Coles M. G., Donchin E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55, 468-484.

Hajcak G., McDonald N., Simons R. F. (2003). Anxiety and error-related brain activity. *Biological Psychology*, 64, 77-90.

Hohnsbein J., Falkenstein M., Hoormann J. (1989). Error processing in visual and auditory choice reaction tasks. *Journal of Psychophysiology*, 3, 320 (Abstract).

Herrmann M. J., Roemmler J., Ehlis A. C., Heidrich A., Fallgatter A. J. (2004). Source localization (LORETA) of the error-related negativity (ERN/Ne) and positivity (Pe). *Cognitive Brain Research*, 20, 294-299.

Holroyd C. B., Coles M. G. H. (2002). The Neural Basis of Human Error Processing: Reinforcement Learning, Dopamine, and the Error-related Negativity. *Psychological Review*, 109, 679-709.

Holroyd C. B., Dien J., Coles M. G. H. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements : Evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letter*, 242, 65-68.

Holroyd, C. B., Nieuwenhuis S., Yeung N., Cohen J.D. (2003). Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology*, 14, 2481-2484.

Jasper H. (1958). Report of committee on methods of clinical exam in EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 370-375.

Kaiser J., Barker R., Haenschel C., Baldeweg T., Gruzelier J. H. (1997). Hypnosis and event-related potential correlates of error processing in a stroop-type paradigm: A test of the frontal hypothesis. *International Journal of Psychophysiology*, 27, 215-222.

Kiehl K. A., Liddle P. F., Hopfinger J. B. (2000). Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, 37, 216-223.

Kopp B., Rist F. (1999). An event-related brain potential substrate of disturbed response monitoring in paranoid schizophrenic patients. *Journal of Abnormal Psychology*, 108, 337-346.

Laurens K. R., Elton T. C. N., Alan T. B., Kent A. K., Liddle P. F. (2003). Rostral anterior cingulate cortex dysfunction during error processing in schizophrenia. *Brain*, 126, 610-622.

Leudar I., Thomas P., Johnston M. (1994). Self-monitoring in speech production: effects of verbal hallucinations and negative symptoms. *Psychological Medicine*, 24, 749-761.

Leuthold H., Sommer W. (1999). ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, 110, 342-357.

Luu P., Flaisch T., Tucker D.M. (1999). Medial Frontal Cortex in Action Monitoring. *The Journal of Neuroscience*, 20, 464-469.

Luu P., Tucker D. M., Derryberry D., Reed M., Poulsen C. (2003). Electrophysiological Responses to Errors and Feedback in the Process of Action Regulation. *Psychological Science*, 14, 47-53.

Mathalon D. H., Susan L. W., Judith M. F. (2003). Anatomy of an error: ERP and fMRI. *Biological Psychology*, 64, 119-141.

Miltner W. H. R., Brauer J., Hecht H., Trippe R., Coles M. G. H. (2004). Parallel brain activity for self-generated and observed errors. In: *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring* (eds. Ullsperger M., Falkenstein M.), MPI of Cognitive Neuroscience, 124-129.

Miltner W. H. R., Braun C. H., Coles M. G. H. (1997). Event-Related Brain Potentials Following Incorrect Feedback in a Time-Estimation Task : Evidence for a « Generic » Neural System for Error Detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 788-798.

Miltner W. H. R., Lemke U., Weiss T., Holroyd C., Scheffers M. K., Coles M. G. H. (2003). Implementation of error-processing in the human anterior cingulate cortex: a source analysis of the magnetic equivalent of the error-related negativity. *Biological Psychology*, 64, 157-166.

Nieuwenhuis S., Ridderinkhof K. R., Blom J., Band G. P. H., Kok A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38, 752-760.

Overbeek T. J. M., Nieuwenhuis S., Ridderinkhof K. R. (2005). Dissociable Components of Error Processing: On The Functional Significance of the Pe Vis-à-vis the ERN/Ne. *Journal of Psychophysiology*, 19, 319-329.

Pailing P. E., Segalowitz S. R., Dywan J., Davies P. L. (2002). Error negativity and response control. *Psychophysiology*, 39, 198-206.

Pitman R. K. (1987). A cybernetic model of obsessive compulsive pathology. *Comprehensive Psychiatry*, 28, 334-343.

Rabbitt P., Rodgers B. (1977). What does a man do after he makes an error? An analysis of response programming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29, 727-743.

Rizzolatti G., Fogassi L., Gallese V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 661-670.

Rodríguez-Fornells A., Kurzbuch A. R., Münte T. F. (2002). Time Course of Error Detection and Correction in Humans: Neurophysiological Evidence. *The Journal of Neuroscience*, 22, 9990-9996.

Rösler F., Heil M., Röder B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology*, 45, 109-141.

Ruchsow M., Grön G., Reuter K., Spitzer M., Hermle L., Kiefer M. (2005). Error-Related Brain Activity in Patients with Obsessive-Compulsive Disorder and in Healthy Controls. *Journal of Psychophysiology*, 19, 298-304.

Ruchsow M., Grothe J., Spitzer M., Kiefer M. (2002). Human anterior cingulate cortex is activated by negative feedback: evidence from event-related potentials in a guessing task. *Neuroscience Letters*, 325, 203-206.

Scheffers M. K., Coles M. G. H. (2000). Performance Monitoring in a Confusing World: Error-Related Brain Activity, Judgement of Response Accuracy, and Types of Errors. *Journal of Experimental Psychology*, 26, 141-151.

Schwartz J. M. (1997). Cognitive-behavioral self-treatment for OCD systematically alters cerebral metabolism: A mind-brain interaction paradigm for psychotherapists. In

- E. Hollander and D. J. Stein (Eds.), *Obsessive-compulsive disorders: Diagnosis, etiology, treatment* (pp. 257-281). New York: Marcel Dekker.
- Shin L. M., Whalen P. J., Pitman R. K., Bush G., Macklin M. L., Lasko N. B., Orr S. P., McInerney S. C., Rauch S. L. (2001). An fMRI study of anterior cingulate function in posttraumatic stress disorder. *Biological Psychiatry*, 50, 932-942.
- Stemmer B., Witzke W., Schonle P. W. (2001). Loosing the error-related negativity in the EEG of human subjects: an indicator for willed action. *Neuroscience Letters* 2001 July 27, 308, 1, 60-62.
- Sutton S., Braren M., Zubin J., John E. R. (1965). Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150, 1187-1188.
- Ullsperger M., Cramon D. Y., (2001). Subprocesses of performance monitoring: A dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fMRI and ERPs. *Neuroimage*, 14, 1387-1401.
- Van Schie H. T., Mars R. B., Coles M. G. H., Bekkering H. (2004). Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during error observation. *Nature Neuroscience*, 7, 549-554.
- Van Veen V., Carter C. S. (2002). The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies. *Physiology & Behavior*, 77, 477-482.
- Van Veen V., Carter C. S. (2002). The Timing of Action-Monitoring Processes in the Anterior Cingulate Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593-602.
- Vidal F., Bonnet M., Mascar F. (1995). Programming the duration of a motor sequence: role of the primary and supplementary motor areas in man. *Experimental Brain Research*, 106, 339-350.

Vidal F., Hasbroucq T., Grapperson J., Bonnet M. (2000). Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological Psychology*, 51, 109-128.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. Dr. h. c. Beckmann, ehemaliger Direktor der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie, sowie Herrn Prof. Dr. med. J. Deckert, Direktor der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Würzburg, für die Möglichkeit, meine Arbeit an deren Klinik durchführen zu können.

Großer Dank geht an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. A. J. Fallgatter für die freundliche Überlassung des Themas, sowie an die beiden Gutachter, Herrn Prof. Dr. med. A. J. Fallgatter sowie Prof. Dr. med. K. Reiners für die fachliche Betreuung.

Besonderer Dank geht an Frau Dipl. Psych. Dr. A.-C. Ehlig für die äußerst engagierte und kompetente Betreuung und Begleitung meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Dipl. Psych. Dr. M. J. Herrmann für die Hilfestellungen bezüglich meines Paradigmas sowie den medizinisch-technischen Assistenten, Frau Inge Gröbner und Frau Melanie Greutner, für deren Hilfe bei der notwendigen praktischen Einarbeitung.

Lebenslauf

von Achim Bernhard

geboren am 11.10.1975 in Aschaffenburg

1982-1997 Besuch der Grundschule und des Hanns-Seidel-Gymnasiums Hösbach,
Abschluss allgemeine Hochschulreife

1997 – 1998 Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Universität Würzburg

1998 Herbst Krankenpflegepraktikum am Klinikum Aschaffenburg

1999 Frühjahr Vorsemester am Rheinischen Bildungszentrum Köln

1999 Herbst Studium der Humanmedizin an der Universität Würzburg

2001 Physikum

2002 1. Staatsexamen

2005 2. Staatsexamen

2006 3. Staatsexamen

Seit Juli 2006 Assistenzarzt in der Neurologie

Aschaffenburg, 24.6.2008

Achim Bernhard