

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

Direktor: Professor Dr. med. Jürgen Deckert

**Einfluss von sozialen Feedbackreizen auf neurophysiologische Korrelate von  
Fehlerverarbeitung und Action Monitoring**

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der

Medizinischen Fakultät

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Claudia Massa aus Weinsberg

Würzburg, April 2014

**Referent: Prof. Dr. med. Fallgatter**

**Korreferent: Prof. Dr. Marcel Romanos**

**Dekan: Prof. Dr. Matthias Frosch**

**Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2014**

**Die Promovendin ist Ärztin**

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	1
1.1. Error-related negativity (ERN/Ne).....	2
1.2. Neuroanatomische Korrelate der Fehlerverarbeitung .....	4
1.3. Funktionelle Bedeutung der Fehlerpotentiale von ERN und Pe .....	9
1.3.1. Fehlererkennung .....	10
1.3.2. Fehlersuche und Fehlerkompensation .....	11
1.3.3. Antwortkonflikt und Konfliktsuche .....	13
1.3.4. Generic error detection system .....	17
1.3.5. Dopamin und Verstärkungslerntheorie .....	18
1.4. Error Positivity (Pe) .....	21
1.5. CRN-Negativierungen nach korrekten Trials .....	23
1.6. ERN nach negativem Feedback: Feedback-ERN (FRN) .....	25
1.7. ERN und psychiatrische Erkrankungen .....	28
1.8. Emotionale und motivationale Komponenten.....	31
1.8.1. Motivationale Faktoren .....	31
1.8.2. ERN und Persönlichkeit .....	33
1.8.3. Motivation und Persönlichkeit.....	35
1.8.4. Stimmungseffekte .....	36
1.8.5. ERN und sozialer Stress .....	37
1.8.6. Facial Feedback.....	40
2. Fragestellung und Hypothesen .....	43
3. Methoden .....	47
3.1. Variablen.....	47
3.1.1. Abhängige Variablen .....	47
3.1.2. Unabhängige Variablen .....	47
3.2. Versuchsplan .....	48
3.3. Versuchsteilnehmer .....	49
3.4. Versuchsablauf .....	50
3.4. EEG .....	53
3.5 Elektrodenposition .....	54
3.6 Eriksen Flanker Test.....	54
3.5. Erhebungsinstrumente .....	58
3.5.1. Fragebogen für Probandendaten.....	58
3.5.2. Screening Fragebogen .....	59
3.5.3. Positive and Negative Affect Schedule .....	59
3.5.4. Behavioural Activation/Inhibition System .....	60
3.5.5. Sensitivity of Punishment and Sensitivity of Reward Questionnaire .....	61
3.5.6. NEO-Fünf-Faktoren-Inventar .....	62

3.5.7. Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest .....	63
3.5.8. Zahlenverbindungstest .....	64
4. Datenauswertung .....	65
4.1 Vorverarbeitung der EEG-Daten .....	65
4.2 Statistik .....	67
5. Ergebnisse .....	69
5.1 ERN und Einfluss des Feedbacks .....	69
5.2. FRN und Einfluss des Feedbacks .....	72
5.3 Zusammenhang der ERPs mit Persönlichkeit .....	75
5.3.1 Zusammenhang ERN und Persönlichkeit – Verträglichkeit .....	76
5.3.2 Zusammenhang ERN und Persönlichkeit – Neurotizismus .....	77
5.3.3 Zusammenhang ERN und Persönlichkeit – BIS .....	78
5.3.4 Zusammenhang FRN und Persönlichkeit – Verträglichkeit .....	78
5.3.5 Zusammenhang FRN und Persönlichkeit – Neurotizismus .....	79
5.3.6 Zusammenhang FRN und Persönlichkeit – BIS .....	79
5.4 Einfluss der Stimmung auf die ERPs .....	80
5.4.1 Einfluss der Stimmung auf die ERN-Amplituden .....	80
5.4.2 Einfluss der Stimmung auf die FRN-Amplituden .....	82
5.5 PE und Einfluss des Feedbacks .....	82
6. Diskussion .....	84
6.1 Einfluss sozialen Feedbacks .....	84
6.1.1 Einfluss sozialen Feedbacks auf die ERN .....	84
6.1.2 Einfluss sozialen Feedbacks auf die FRN .....	87
6.2 Zusammenhang der ERPs mit Persönlichkeitsvariablen .....	89
6.2.1 Zusammenhang ERN/FRN und Verträglichkeit .....	90
6.2.2 Zusammenhang ERN/FRN und Neurotizismus .....	91
6.2.3 Zusammenhang ERN/FRN und BIS .....	92
6.3 Einfluss der Stimmung auf die Maße der Fehlerverarbeitung .....	93
6.3.1 Entwicklung der Stimmung im Experiment .....	93
6.3.2 Zusammenhang zwischen Stimmung und Maßen der Fehlerverarbeitung .....	94
6.4 Methodische Probleme .....	95
6.5 Fazit .....	96
7. Zusammenfassung .....	98
8. Literatur .....	101

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Anteriorer cingulärer Cortex</i> .....	9
<i>Abb. 2: Dopaminerge Pfade im Gehirn</i> .....	20
<i>Abb. 3: Versuchsplan</i> .....	49
<i>Abb. 4: Feedback-Stimuli weiblich</i> .....	55
<i>Abb. 5: Feedback-Stimuli männlich</i> .....	56
<i>Abb. 6: Eriksen Flanker Test, soziales positives Feedback</i> .....	57
<i>Abb. 7: Eriksen Flanker neutrales positives Feedback</i> .....	57
<i>Abb. 8: Ergebnis ANOVA feedback * correctness</i> .....	70
<i>Abb. 9: Grand-Average ERN und Pe neutrales Feedback an Cz</i> .....	71
<i>Abb. 10: Grand-Average ERN und Pe nach fazialem Feedback an Cz</i> .....	71
<i>Abb. 11: Grand-Average ERN und Pe nach neutralem Feedback an FCz</i> .....	72
<i>Abb. 12: Grand-Average ERN und Pe nach fazialem Feedback an FCz</i> .....	72
<i>Abb. 13: Ergebnis ANOVA feedback * position</i> .....	73
<i>Abb. 14: Grand-Average ERN nach neutralem und fazialem Feedback an Fz</i> .....	74
<i>Abb. 15: Grand-Average FRN nach neutralem und fazialem Feedback an FCz</i> .....	74
<i>Abb. 16: Grand-Average FRN nach neutralem und fazialem Feedback an Cz</i> .....	75
<i>Abb. 17: Ergebnis ANOVA feedback * Verträglichkeit FCz und Cz:</i> .....	77
<i>Abb. 18: Ergebnis ANOVA feedback * Verträglichkeit Fz, FCz und Cz</i> .....	79
<i>Abb. 19: Ergebnisse ANOVA mit Messwiederholung für positive Items der PANAS</i> .....	80
<i>Abb. 20: Ergebnisse ANOVA mit Messwiederholung für negative Items der PANAS</i> .....	81
<i>Abb. 21: Ergebnis ANOVA correctness * face Pe</i> .....	83

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen ZVT in Sekunden .....	52
Tabelle 2: Zeitlicher Ablauf des Experiments .....	53
Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen für NEO-FFI .....	76
Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichungen für BIS/BAS.....	76

# 1. Einleitung

Menschen sind in der Lage, ihre eigenen fehlerhaften Handlungen zu bewerten und ihr Verhalten so anzupassen, dass die Konsequenzen ihrer Handlungen ihren Zielvorstellungen entsprechen: Sie können aus ihren Fehlern lernen.

Wie bewerkstelligen menschliche Wesen jedoch bei der Flut von Informationen, Eindrücken und potentiellen Handlungsmöglichkeiten, die eine bestimmte Situation mit sich bringt, in den meisten Fällen die richtige Entscheidung zu treffen? Wie kann aus der elektrischen Aktivität von Milliarden von Neuronen unseres Gehirns zielgerichtetes, willentliches Verhalten entstehen?

Es gibt angeborene Verhaltensweisen, die uns erlauben, in einer gefährlichen oder lebensbedrohlichen Situation möglichst schnell und automatisch zu handeln. Sie werden durch bestimmte Stimuli ausgelöst und funktionieren zuverlässig, während sie kaum Konzentration oder Aufmerksamkeit erfordern. Allerdings sind diese phylogenetisch älteren emotionalen und motivationalen Systeme unflexibel. Falls mehr notwendig ist, als einem Beutegreifer aus dem Weg zu gehen, werden neben anderen kognitiven Fähigkeiten Aufmerksamkeit, Koordinationsfähigkeit und Schnelligkeit gebraucht. Man muss Konsequenzen voraussehen und vor allem beurteilen können, ob eine ausgeführte Handlung erfolgreich war oder nicht, um sie entweder bei Gelegenheit zu wiederholen oder den Fehler nicht noch einmal zu begehen. Zuletzt brauchen wir eine Funktion die alles integriert. Dies ist vor allem in neuen, unbekannten Situationen der Fall, wenn unsere Reaktionen nicht eindeutig durch bestimmte Stimuli festgelegt sind oder wenn wir uns ständig neu an eine Situation anpassen müssen. Dann werden Mechanismen notwendig, die die Koordination und Konfiguration sensorischer, kognitiver und motorischer Systeme gemäß unserer übergeordneten Ziele vermitteln. Es handelt sich dabei um kognitive Kontrollprozesse. Durch sie können wir Ziele festlegen, deren Erreichen wir anstreben. Wir können völlig neue und langfristige Handlungen unabhängig von aktuellen Bedürfnissen planen. Kognitive Kontrolle ermöglicht uns einen erweiterten Zeithorizont, in dem wir weit in der Zukunft liegende Handlungsfolgen antizipieren können. Interferierende Reize können ausgeblendet werden und inadäquate Reaktionen sowie emotionale Impulse können inhibiert werden, wenn dies notwendig ist.

Das Verhalten unserer Art ist durch unsere hoch entwickelten sensorischen und motorischen Fähigkeiten sehr flexibel, jedoch besteht bei vielfältigen zur Verfügung

stehenden Handlungsmöglichkeiten eine größere Wahrscheinlichkeit, einen Fehler zu begehen. Zur Vermeidung von Fehlern und zur Optimierung unseres Verhaltens im Hinblick auf unser Ziel brauchen wir *action monitoring*, eine kognitive Funktion, die die eigenen Handlungen kontinuierlich überwacht und hinsichtlich ihrer Güte beurteilt. *Action monitoring* ist ein Aspekt kognitiver Kontrolle, der die Fähigkeit darstellt, Gedanken und Handlungen so in Einklang zu bringen, dass sie unseren Zielen dienen (Miller & Cohen, 2001).

Neuroanatomische Strukturen und Neurotransmitter als Vermittler zwischen denselben spielen bei kognitiver Kontrolle und *action monitoring* als zugrundeliegende biologische Mechanismen – ebenso wie bei anderen Aspekten der Informationsverarbeitung – eine wichtige Rolle. Neben biologischen und genetischen Einflüssen sind in der Situation, die eine Entscheidung von uns fordert, jedoch auch andere Faktoren wichtig, zum Beispiel das soziale Umfeld und wie die Konsequenzen unseres Handelns von anderen sozialen Wesen beurteilt werden. Werden wir z.B. aufgrund einer Handlung oder eines Fehlers, den wir vor Publikum gemacht haben, ausgelacht oder gerügt, so wird dies möglicherweise die Art und Weise unserer Fehlerverarbeitung und unseres *action monitoring* in sozialen Situationen beeinflussen und eventuell zu einer zukünftigen Vermeidung dieses Verhaltens in Gesellschaft führen. Der Einfluss von sozialen Faktoren auf *action monitoring* ist Inhalt dieser Arbeit.

### 1.1. Error-related negativity (ERN/Ne)

Die kognitiven Prozesse, die den Funktionen des *action monitoring*, *performance monitoring* und der Fehlerverarbeitung zugrunde liegen, sind schon seit Jahren Inhalt intensiver Forschung. Unabhängig voneinander gelangten dabei zwei Forschergruppen zeitgleich zu der Erkenntnis, dass fehlerhafte Handlungen spezifische elektrophysiologische Korrelate im Elektroenzephalogramm (EEG) nach sich ziehen.

Gehring, Coles, Meyer & Donchin (1990) machten die Entdeckung, dass nach fehlerhaften Antworten in Reaktionszeitexperimenten negative Potentialänderungen von bis zu 10  $\mu\text{V}$  im EEG auftreten, die 80 bis 100 Millisekunden nach einer fehlerhaften Reaktion ihr Maximum erreichen. Die Autoren nannten dieses Phänomen *error-related negativity* (ERN; Gehring, Goss, Coles, Meyer & Donchin, 1993; Dehaene, Posner & Tucker, 1994; Bernstein, Scheffers, & Coles, 1995). Etwa

zur selben Zeit beobachteten Falkenstein, Hohnsbein & Hoormann (1991) Negativierungen nach Fehlern im EEG und nannten die Negativierung *error negativity* (Ne; Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann & Blanke, 1990; Falkenstein, Hohnsbein & Hoormann, 1996; Kaiser, Barker, Haenschel, Baldeweg & Gruzelier, 1997). Sowohl ERN als auch Ne sind am stärksten frontozentral ausgeprägt (Falkenstein et al., 1991) und es herrscht Einigkeit darüber, dass es sich bei den beiden Potentialänderungen trotz unterschiedlicher Bezeichnungen um dieselbe Komponente handelt. Nach der Negativierung (ERN/Ne, im folgenden ERN) tritt oft noch eine nachfolgende Positivierung (Pe) auf, die in einem Intervall von 200-500 ms nach der fehlerhaften Reaktion parietookzipital ihr Maximum erreicht (Falkenstein et al., 1991).

Zur Untersuchung der ERN-Potentiale werden verschiedene experimentelle Paradigmen eingesetzt, bei denen Probanden eine Aufgabe lösen müssen, die derart gestaltet ist, dass von Zeit zu Zeit Fehler auftreten. Laut Yeung & Sanfey (2004) treten ERN-Potentiale in drei Situationen auf: Nach Fehlern in Reaktionszeitexperimenten (Falkenstein et al., 1990; 1991; Gehring et al., 1993), nach zu späten Reaktionen in Reaktionszeitexperimenten (Johnson, Otten, Boeck & Coles, 1997; Luu, Flaisch & Tucker, 2000; Pailing, Segalowitz & Davies, 2000) und nach Präsentation eines Feedback-Stimulus, der den Probanden von einer fehlerhaften Antwort in Kenntnis setzt (Holroyd & Coles, 2002; Miltner, Braun & Coles, 1997).

ERN-Potentiale treten sowohl unabhängig von der sensorischen Modalität des Stimulus (Bernstein et al., 1995) als auch von der Reaktionsweise des Probanden auf (Miltner et al., 1997), so dass mit einer Vielzahl von Experimenten verschiedener Modalitäten und Bedingungen gearbeitet werden kann. Häufig genutzte Tests sind Eriksen Flanker Tests (Eriksen & Eriksen, 1974; Gehring et al., 1990; Gehring et al., 1993) sowie Buchstabendiskriminationsaufgaben, bei denen zwischen einer beliebigen Anzahl von Stimuli diskriminiert werden muss (Falkenstein et al., 1991; Falkenstein, Hohnsbein & Hoormann, 1995). Auch bei Fehlern in Aufgaben, die das Zuordnen von Buchstaben-, Wort-, Bilder- und Zahlenstimuli (Dehaene et al., 1994) zu Kategorien beinhalten und bei Gedächtnisaufgaben können ERN-Potentiale beobachtet werden. Kartenspiele (Segalowitz, Santesso, Murphy, Homan, Chantziantoniou & Khan, 2010) und andere Spiele, bei denen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Gewinne oder Verluste erzielt werden (Nieuwenhuis, Heslenfeld,

von Geusau, Mars, Holroyd & Yeung, 2005; Hajcak, Moser, Holroyd & Simons, 2007; Kreussel, Hewig, Kretschmer, Hecht, Coles & Miltner, 2011) werden besonders in Experimenten genutzt, die motivationale Aspekte beleuchten. Go/NoGo Aufgaben kommen ebenfalls in verschiedenen Formen zum Einsatz (Scheffers, Coles, Bernstein, Gehring & Donchin, 1996; Olvet & Hajcak, 2008).

Bei der ERN handelt es sich um ein stabiles und reproduzierbares Potential. Zur Beurteilung ihrer Reproduzierbarkeit erfassten Segalowitz et al. (2010) elektrophysiologische Fehlerkorrelate bei verschiedenen Aufgaben aus dem Bereich des *performance monitoring* (Flanker Test, Go/NoGo) zu jeweils zwei Zeitpunkten. Als kurzes Retest-Intervall wurden dabei 20 Minuten gewählt und als langes Intervall 3 bis 6 Wochen. Es zeigten sich Korrelationen von .6 bis .9 zwischen den verschiedenen MZP. Ähnlich hohe Korrelationen konnten in der gleichen Studie auch bei Manipulationen von State-Variablen der Probanden in der Testsituation gewonnen werden: Als Variante wurden die Experimente mit vs. ohne Schlafentzug bzw. mit vs. ohne Anwesenheit anderer Probanden durchgeführt. Da in den meisten Studien zum *performance monitoring* mit menschlichen Probanden gearbeitet wird, deren augenblickliche Verfassung sich auf das Testergebnis auswirken kann, ist eine Unabhängigkeit von State-Variablen für die Reliabilität des untersuchten Merkmals von großer Bedeutung.

Auch Weinberg & Hajcak (2011) befassten sich mit der Reliabilität der ERN, wobei sie ein breiteres Untersuchungsintervall wählten. Bei zweimaliger Messung mit einem Abstand von 1,5 bis 2,5 Jahren fanden sie eine Retest-Reliabilität von .56 bis .67. Segalowitz et al. (2010) stuften aus diesem Grund die ERN als ebenso zuverlässig und reproduzierbar ein wie andere in der Forschung verwendete psychophysiologische und Verhaltensparameter.

## 1.2. Neuroanatomische Korrelate der Fehlerverarbeitung

Erwägungen zur funktionellen Bedeutung der ERN erfordern Kenntnis der neuroanatomischen Strukturen, die sie generieren. Zur Lokalisation ereigniskorrelierter Potentiale dienten zuerst EEG-Studien, später kamen die Techniken der Magnetoenzephalographie (MEG) und der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) hinzu, mit deren Hilfe es möglich wurde, immer genauere Aussagen zum neuronalen Ursprung der ERN zu machen (Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll & Cohen, 1998; Critchley, Tang, Glaser, Butterworth & Dolana,

2005; Kiehl, Liddle & Hopfinger, 2000; Menon, Adleman, White, Glover & Reiss, 2001).

In Fachkreisen herrscht weitgehend Übereinstimmung darüber, dass der Anteriore Cinguläre Cortex (ACC) maßgeblich an der Entstehung der ERN beteiligt ist (Dehaene et al., 1994; Holroyd, Dien & Coles, 1998; van Veen & Carter, 2002b; Vlamings, Jonkman, Hoeksma, van Engeland & Kemner, 2008). Der ACC ist der vordere Teil des cingulären Cortex, der sich C-förmig oberhalb des Corpus callosum bis zum Frontallappen erstreckt (siehe Abb. 1). Devinsky, Morrell & Vogt (1995) bezeichnen den ACC als anteriore exekutive Region, da er eine wichtige Rolle bei der Initiation von Handlungen, Motivation und zielgerichtetem Verhalten spielt. Er ist wiederum aufgeteilt in einen kaudalen Teil und einen rostralen Teil. Der rostrale, affektive Teil hat unter anderem Verbindungen zum limbischen System und zu autonomen Hirnstammarealen und ist von Bedeutung für die Verarbeitung emotionaler und motivationaler Information und Emotionsregulation. Die kognitive Subdivision im kaudalen Anteil beinhaltet Verbindungen zum dorsolateralen präfrontalen Cortex sowie dem supplementär motorischen Cortex (SMA) und ist bei kognitiven Prozessen wie Aufmerksamkeit, Antwortauswahl und Konfliktsuche involviert (Bush, Luu & Posner, 2001). Untermuert wird diese Auffassung von Studien, bei denen man mittels Bildgebung feststellte, dass bei kognitiven Aufgaben (geteilte Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis) rostrale Aktivität unterdrückt und kaudale Aktivität im ACC gesteigert ist (Drevets & Raichle, 1998) und dass bei Aufgaben mit Verwendung emotionaler Stimuli ein direkt entgegengesetztes Aktivitätsmuster auftritt (Carter, MacDonald, Ross & Stenge, 2001).

Ein weiteres bildgebendes Verfahren zur Lokalisation von Hirnaktivität ist die *Brain Electrical Source Analysis* (BESA; Scherg, 1990). Auch mit dieser elektrophysiologischen Quellenlokalisationsmethode kamen Forschergruppen zu dem Schluss, dass die ERN im ACC erzeugt wird: In zwei Experimenten von Dehaene et al. (1994) zeigte sich eine deutliche ERN, die auf das Gebiet des medialen präfrontalen Cortex, hauptsächlich auf die Mittellinie des inferioren ACC konzentriert war. Da sich keine erhöhte Hirnaktivität der kontralateral zur ausführenden Hand liegenden Hemisphäre zeigte, schloss man daraus, dass das Potential unabhängig von der motorischen Aktivität der ausführenden Hand auf einer den motorischen Potentialen übergeordneten Ebene entsteht. Auch in Experimenten, bei denen die Reaktion nicht mit den Händen, sondern z.B. den Füßen (Holroyd et

al., 1998) zu erfolgen hatte, zeigten sich Ergebnisse, die unabhängig von der Art der motorischen Reaktion waren. Bei der Feedback-induzierten ERN wurde offensichtlich, dass die Lokalisation des ERN-Potentials auch von der Modalität des Feedbacks unabhängig ist. Dass nicht nur visuelle Feedback-Stimuli ERN-Potentiale hervorrufen können, zeigte eine Studie von Miltner, Braun & Coles (1997), in der auch bei Verwendung auditorischer und somatosensorischer Stimuli der ACC als Generator der ERN bestätigt wurde. Eine weitere Möglichkeit zur Lokalisation von Hirnaktivität ist die Technik der *Low Resolution Electromagnetic Tomography* (LORETA; Pascual-Marqui, Michel & Lehmann, 1994), mittels derer ebenfalls eine mathematische Schätzung der am Oberflächen-EEG beteiligten neuronalen Quellen möglich ist, so dass ein dreidimensionales Modell der Hirnaktivität erstellt werden kann. Herrmann, Römmler, Ehlis, Heidrich & Fallgatter (2004), die mittels dieser Technik den neuronalen Ursprung der ERN untersuchten, fanden Aktivität im medialen und mittleren frontalen Gyrus sowie im SMA, in dem sich die stärkste Aktivität nachweisen ließ. Eine Mitwirkung des SMA an der Entstehung des ERN-Potentials vermuteten bereits Dehaene et al (1994) und Miltner et al. (1997). Im selben Experiment untersuchten Herrmann et al. (2004) auch die Entstehung des Pe-Potentials. Trotz deutlicher Überlappungen zwischen den Regionen, die bei beiden Potentialen aktiv sind, fanden sich dennoch leicht unterschiedlich lokalisierte Aktivierungszentren: Die Hauptaktivität der Pe war weiter rostral und inferior im ACC (Brodmann Areal 24) zu finden als die der ERN. Beide Komponenten entstehen demnach in zwar benachbarten, aber trotzdem verschiedenen Strukturen. Dies gibt Grund zu der Annahme, dass die beiden Potentiale zwar Eigenschaften teilen, jedoch elektrophysiologische Korrelate unterschiedlicher kognitiver Prozesse darstellen: Die ERN ist mit unmittelbaren, frühen Prozessen der Fehlerentdeckung und -verarbeitung assoziiert und in Strukturen wie dem ACC und SMA lokalisiert, die auch schon vor einem Fehler (z.B. in Momenten mit erhöhtem Konfliktpotential) aktiv sind. Das Pe-Potential hingegen hängt mit späteren Prozessen der Fehlerverarbeitung zusammen und wird in Regionen erzeugt, die eher mit kognitiven Prozessen nach dem Begehen eines Fehlers in Zusammenhang stehen, wie zum Beispiel der emotionalen Bewertung eines Fehlers (Knutson, Westdorp, Kaiser & Hommer 2000; Van Veen & Carter, 2002a) oder dessen bewusster Verarbeitung (Herrmann et al., 2004). Die LORETA-Technik (Pascual-Marqui et al., 1994) machten sich auch Hochman, Eviatar, Breznitz, Nevat & Shaul (2009) zunutze. Sie

untersuchten Fehlerverarbeitung bei korrigierten vs. nicht korrigierten Fehlern in einem Flanker Test und fanden eine gemeinsame Aktivitätsquelle für beide Arten von Fehlern im ACC (Brodmann Areal 24) sowie weitere Aktivität in Areal 6 bei Korrekturversuchen. Die Autoren deklarierten daher den ACC mit Brodmann Areal 24 als Hauptentstehungsort der ERN.

Mittels der Technik der Magnetenzephalographie (MEG) gelingt eine genauere Quellenlokalisierung als mit der Technik des EEG (Ishii et al., 2009). Dies zeigt sich vor allem bei der Messung von Signalen, die tiefer unter der Oberfläche des Cortex generiert werden (Keil, Weisz, Paul-Jordanov & Wienbruch 2010). Verglichen mit der Fülle an EEG-Studien zu ereigniskorrelierten Potentialen existieren noch nicht allzu viele Studien, bei denen ERN-Potentiale mittels MEG untersucht wurden (Miltner, Lemke, Weiss, Holroyd, Scheffers & Coles, 2003; Stemmer, Vihla & Salmelin, 2004; Mazaheri, Nieuwenhuis, Van Dijk & Jensen, 2009; Doñamayor, Marco-Pallarés, Heldmann, Schoenfeld & Münte, 2011). Das magnetische Äquivalent der ERN, die mERN, gleicht in vieler Hinsicht dem klassischen ERN-Potential, jedoch ergaben sich feine Unterschiede bei den Latenzen: während für die ERN im Durchschnitt Latenzen von 80 bis 100 ms gefunden wurden (Gehring et al., 1993; Dehaene et al., 1994; Bernstein et al., 1995), berichten Stemmer et al. (2004) sowie Mazaheri et al. (2009) von Latenzen bis 190 ms für die mERN. Stemmer et al. (2004) erklären diese Unterschiede dadurch, dass bei den beiden Methoden unterschiedliche neuronale Netzwerke erfasst werden. Weiterhin scheint das EEG radiale Strömungen zu messen, während das MEG eher für tangentielle Strömungen empfänglich ist. Aussagen bezüglich Polarität und Topographie können somit nicht ohne weiteres von einem Bildgebungsinstrument auf das andere übertragen werden (Keil et al., 2010). Miltner et al. (2003) sowie Keil et al. (2010) betrachteten ungeachtet der Einschränkungen der Vergleichbarkeit zwischen Ergebnissen aus EEG und MEG den ACC als Ursprungsort der mERN, während andere Autoren dies nicht bestätigen konnten (Stemmer et al., 2004). Miltner et al. (2003) ließen sechs Versuchspersonen eine Go/NoGo-Aufgabe am PC ausführen, während sie gleichzeitig per EEG und MEG Hirnaktivität aufzeichneten. Sie fanden ERN-Potentiale sowie deren magnetische Äquivalente im ACC. Keil et al. (2010) konnten die Existenz der mERN und deren Lokalisation im ACC durch eine ähnlich aufgebaute Studie mit beinahe doppelt so vielen Probanden untermauern. Pe-Potentiale konnten in diesem Experiment durch Magnetenzephalographie nicht nachgewiesen werden.

Van Veen und Carter (2002b) benutzten die Technik der fMRT, um Aufschluss über die Lokalisation und funktionelle Bedeutung der ERN zu gewinnen. Auch mit diesem Verfahren wurde gezeigt, dass ERN-Potentiale als Produkt des ACC angesehen werden können.

Auch ohne den Einsatz bildgebender Verfahren können Erkenntnisse bezüglich der Funktion und Lokalisation bestimmter Hirnregionen gewonnen werden. Hierzu dienen Studien mit Patienten, bei denen aufgrund von Unfällen, vaskulären Ereignissen oder neurologischen Erkrankungen Läsionen in bestimmten Hirnregionen entstanden sind und zum Ausfall deren ursprünglicher Funktion geführt haben. In einer Studie mit Patienten mit lateral präfrontalem Hirnschaden konnten Gehring & Knight (2000) feststellen, dass die Patienten im Gegensatz zu den gesunden Kontrollen keine ERN als Reaktion auf Fehler-Trials aufwiesen. Die Autoren vermuteten eine Interaktion zwischen präfrontalem Cortex und ACC bei Verhaltensmonitoring und kompensatorischem Verhalten sowie eine Beteiligung des ACC an der Unterscheidung von richtigen und falschen Reaktionen. Seifert, von Cramon, Imperati, Tittgemeyer & Ullsperger (2011) untersuchten die Rolle des Thalamus bei Fehlersuche und Verhaltensanpassung und fanden heraus, dass auch dieser durch seine anatomische und funktionelle Verbindung mit dem ACC eine wichtige Rolle bei der Entstehung der ERN spielt. Im Vergleich zu gesunden Personen zeigten Patienten mit fokalen Läsionen des Thalamus kleinere ERN-Amplituden sowie weniger Zeichen von Fehlersuche und Verhaltensanpassung nach Fehlern. Betrafen die Läsionen speziell die ventral anterioren und ventral lateral anterioren Thalamuskern, so zeigte sich die Wichtigkeit dieser Strukturen am deutlichsten, nämlich durch das gänzliche Fehlen einer ERN.

Unabhängig von der jeweils genutzten Methode kommen die meisten Autoren zu der gemeinsamen Auffassung, dass bei der Entstehung der ERN der ACC eine wichtige Rolle spielt (Miltner et al., 2003; Yeung & Sanfey, 2004; Dehaene, 1994; Kiehl et al., 2000; van Veen & Carter, 2002b). Auch bei der Entstehung der Pe ist der ACC maßgeblich beteiligt, jedoch sind dabei eher rostrale Gebiete aktiv (Herrmann et al., 2004; van Veen & Carter, 2002b).

Neben dem ACC spielt auch der SMA eine wichtige Rolle (Herrmann et al., 2004; Dehaene et al., 1994; Miltner et al., 1997). Zuletzt gibt es Hinweise darauf, dass auch der präfrontale Cortex (Gehring & Knight, 2000) sowie die Basalganglien

(Falkenstein, Hielscher, Dziobek, Schwarzenau, Hoormann & Sundermann, 2001) involviert sind.

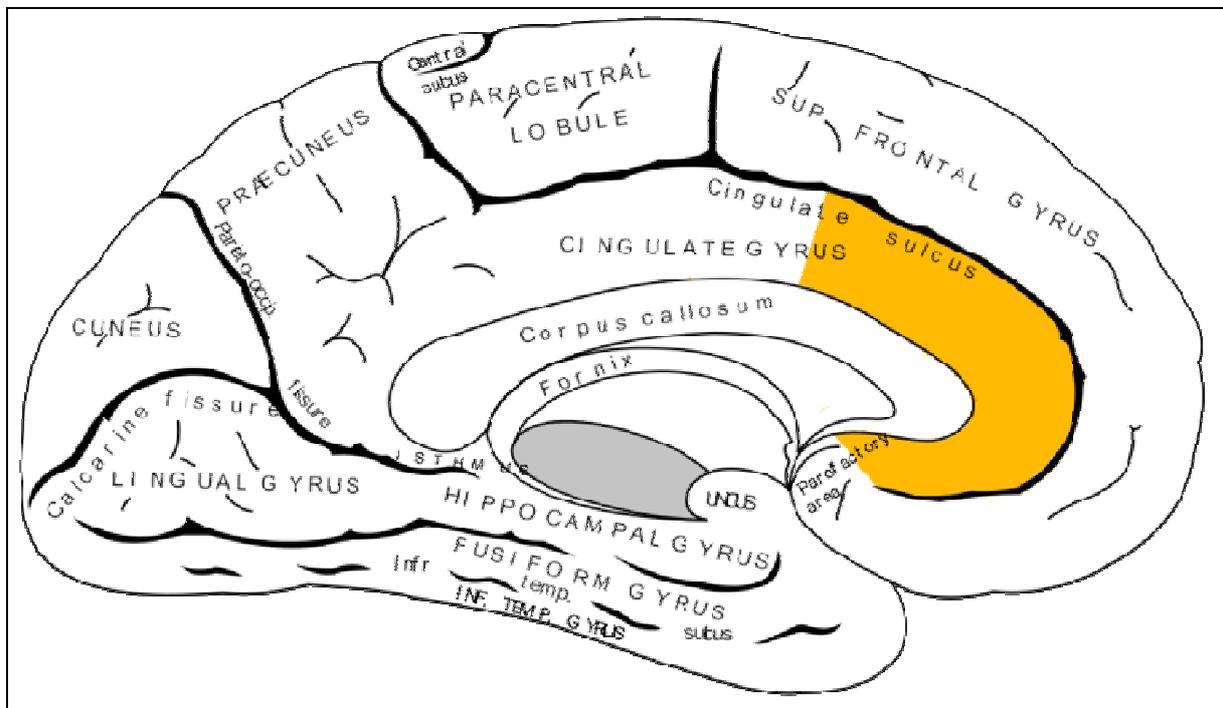


Abb. 1: Anteriorer cingulärer Cortex

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gray727\\_anterior\\_cingulate\\_cortex.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gray727_anterior_cingulate_cortex.png)

### 1.3. Funktionelle Bedeutung der Fehlerpotentiale von ERN und Pe

Trotz intensiver Forschung zur Entstehung des ERN-Potentials seit nunmehr zwanzig Jahren herrscht noch immer Uneinigkeit bezüglich seiner funktionellen Bedeutung.

Das ERN-Potential tritt in der Regel auf, noch bevor der begangene Fehler sich durch zu Tage treten seiner Konsequenzen oder durch ein Feedback vollständig manifestieren konnte (Yeung & Sanfey, 2004). Man nimmt an, dass die ERN einen Fehlerverarbeitungsmechanismus repräsentiert, der mittels eines zentralen Verarbeitungsweges Fehler in bereits ausgeführten fehlerhaften motorischen Befehlen sucht (Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band & Kok, 2001). Sensorische oder propriozeptive Afferenzen werden als Informationsquelle ausgeschlossen; vielmehr vermutet man die Information über die Korrektheit des ausgeführten Befehls in einer Efferenzkopie (Gehring et al., 1993; Hewig, Coles, Trippe, Hecht & Miltner, 2011). Dehaene et al. (1994) bewerteten die in ihrem ERN-Experiment gefundenen Latenzen von 64 ms zwischen Knopfdruck und Peak der ERN als zu kurz für eine sensorische oder propriozeptive Verarbeitung der Information. Auch Keil et al. (2010) sahen propriozeptive Informationen irrelevant für die Entstehung eines ERN-

Potentials. Dehaene et al. (1994) schlossen ähnlich anderen Autoren (z.B. Gehring et al., 1993) aus ihren Ergebnissen, dass das Potential einen internen Prozess der Verhaltensüberwachung reflektiert. Die genauen Mechanismen dieses Prozesses sind noch nicht zur Gänze geklärt. Bisherige Theorien favorisierten vor allem die Möglichkeit der ERN als Korrelat eines Mechanismus zur Fehler- oder Konflikterkennung; als andere Möglichkeit wird ein Fehlerkorrekturmechanismus gesehen.

### 1.3.1. Fehlererkennung

Ursprünglich vermutete man hinter der ERN einen Fehlererkennungsprozess, der bei fehlender Übereinstimmung zwischen konkurrierenden Repräsentationen von Antwortmöglichkeiten entsteht, beispielsweise zwischen dem Ergebnis der Antwortauswahl und der Antwortausführung oder zwischen der Repräsentation der korrekten Antwort und der Repräsentation der Antwort, die gegeben wurde. Dieser „*Mismatch Theory*“ zufolge ist das ERN-Potential Korrelat der fehlenden Übereinstimmung der beiden Repräsentationen (Falkenstein et al., 1990, 1991; Gehring et al., 1993; Bernstein et al., 1995; Scheffers et al., 1996; Ullsperger & Von Cramon, 2006; Nieuwenhuis et al., 2001).

In ihrem ersten Artikel über die ERN interpretierten Falkenstein et al. (1990), die zusammen mit Gehring et al. (1993) die Erstbeschreiber des Potentials waren, die ERN als Korrelat eines Mechanismus zur Fehlersuche. Dabei sollten zwei Prozesse ablaufen: „*response determination*“ bezeichnet den Prozess, in dem ein Stimulus mit der zu ihm passenden Antwort verknüpft wird. Ergebnis ist die korrekte Antwort. „*Response choice*“ hingegen ist die Handlung, die letztendlich ausgeführt wird; sie kann richtig oder falsch sein. Entspricht nun das Ergebnis des einen Prozesses nicht dem des anderen, entsteht ein *mismatch*, der anzeigt, dass hier ein Fehler vorliegt, was sich wiederum laut Falkenstein et al. (1990) im ERN-Potential äußert.

Zur weiteren Klärung der funktionellen Bedeutung der ERN führten Falkenstein et al. (1991) ein Reaktionszeitexperiment mit visuellen und auditorischen Stimuli durch. Aus den Daten schlossen sie, dass die ERN kein motorisches Potential darstellen könne und auch nicht Ausdruck der kognitiven Verarbeitung eines Stimulus sei. Sie vermuteten, die ERN sei am ehesten mit dem Prozess der Antwortauswahl verbunden, wobei Antwortauswahl hier die kognitive Repräsentation der Resultate bezeichnet, die bei der Bewertung des präsentierten Stimulus auf der Suche nach

der korrekten Antwort gewonnen werden. Falkenstein et al. (1991) fanden schnellere Reaktionszeiten in Fehler-Trials und schlossen daraus, dass fehlerhafte Antworten verfrüht abgegeben werden, noch bevor der Vergleichsprozess, der die Identifikation der richtigen Antwort hervorbringen soll, überhaupt zu Ende abgelaufen ist. Auch wenn bereits eine (inkorrekte) Antwort abgegeben wurde, läuft dieser Prozess den Autoren zufolge immer bis zum Ende ab und endet mit der Fertigstellung der Auswahl. Erst in diesem Moment kann ein Vergleich der gegebenen („aspezifischen“, fehlerhaften) Antwort mit dem Ergebnis der Auswahl stattfinden, weshalb auch erst dann die ERN auftreten kann, die Korrelat jenes Vergleichs ist. Die gegebene Antwort muss demnach nicht auf dem Ergebnis einer Antwortauswahl basieren, sondern kann auch Produkt einfachen Ratens sein oder von Erwartungen des Probanden beeinflusst werden ("fast guesses": vgl. Coles, 1988). Die Autoren fanden noch eine Positivierung, die sie vorerst als zweite P300 interpretierten, und die später *Pe* genannt wurde. Sie vermuteten bereits, diese Positivierung hänge mit dem bewussten Verarbeiten des Fehlers und mit Anpassungen der Fehlervermeidungsstrategie des Probanden zusammen (Falkenstein et al., 1991). Entgegen ihrer ursprünglichen Auffassung der ERN als Ergebnis eines Vergleichsprozesses (Falkenstein et al., 1990) favorisieren Falkenstein, Hoormann, Christ & Hohnsbein (2000) inzwischen aufgrund neuer Erkenntnisse eher die *response checking* Hypothese (Vidal, Hasbroucq, Grapperon & Bonnet, 2000), die besagt, dass ERN-Potentiale einen Vergleichsprozess an sich widerspiegeln und nicht dessen Ergebnis (s.u.).

### 1.3.2. Fehlersuche und Fehlerkompensation

Gehring et al. (1993) vermuteten, das ERN-Potential reflektiere ein System zur Fehlersuche und Fehlerkompensation. Kompensation bezeichnet laut Gehring, Coles, Meyer & Donchin (1995) Prozesse zur Vermeidung und sofortigen Korrektur von Fehlern und Verhaltensmodifikationen, die die Wahrscheinlichkeit künftiger Fehler reduzieren.

Da die ERN in der Regel erst 80 bis 100 Millisekunden nach Beginn einer fehlerhaften Handlung auftritt, wenn die Möglichkeit, den Fehler zu korrigieren, häufig nicht mehr gegeben ist, schlossen Miltner et al. (1997), dass es sich bei der ERN weniger um Ausdruck eines Fehlerkorrekturmechanismus handelt, sondern vielmehr um einen Fehlererkennungsmechanismus. Hierfür spricht auch das Auftreten von

ERN-Potentialen bei Go/NoGo-Versuchen (Falkenstein, Hoormann & Hohnsbein, 1999): Sowohl nach fehlender Reaktion bei einem Go-Stimulus, vielmehr aber noch bei Reaktionen nach einem NoGo-Stimulus (false alarms) wurden ERN-Potentiale beobachtet. Bei letzterem kann es sich nur schwer um das neurophysiologische Korrelat eines Korrekturmechanismus handeln, da die Möglichkeit einer Korrektur bei einer solchen Aufgabe prinzipiell nicht gegeben ist. Dies spricht somit eher für ein Fehlerentdeckungs- oder Inhibitionssystem als funktionelle Basis der ERN (Falkenstein et al., 1991; Gehring et al., 1993).

Auch Bernstein et al. (1995) beschäftigten sich mit der Frage, welche spezifischen kognitiven Prozesse das Fehlersignal der ERN widerspiegelt. Zur Debatte standen die Verarbeitung des präsentierten Stimulus selbst und die Reaktion des Probanden auf denselben. Unter der Annahme der Generierung der ERN durch Verarbeitung des Stimulus gehen die Autoren von einem Vergleich zwischen erwartetem und tatsächlichem Stimulus aus. Je ähnlicher der präsentierte Stimulus dem erwarteten ist, desto größer ist der Konflikt, der vor der Entscheidung für eine Reaktion entsteht. Ähnlichkeit im Bezug auf die Stimuli würde bedeuten, inwiefern sie physikalische Ähnlichkeiten aufweisen (Tversky, 1977). Bei Annahme der Auslösung der ERN durch die Reaktion des Probanden entsteht das Signal beim Vergleich der tatsächlich ausgeführten Handlung mit der adäquaten und der Feststellung eines *mismatch*. Die Amplitude der ERN sollte in diesem Fall mit der Ähnlichkeit der tatsächlichen (fehlerhaften) und korrekten Antwort variieren, wobei Reaktionen mit derselben Hand ähnlicher sind als mit verschiedenen Händen. Die unähnlichste Reaktion und somit der größte Fehler wäre somit eine Reaktion mit dem falschen Finger der falschen Hand.

Das Experiment von Bernstein et al. (1995) war so aufgebaut, dass der Einfluss von Stimulus- und Antwortähnlichkeit nicht konfundiert werden konnte, denn es gab drei Gruppen mit unterschiedlichen Stimulus-Reaktions-Mustern. So kann der Einfluss von Stimulusähnlichkeit auf die Entstehung von ERN-Potentialen über die verschiedenen Gruppen hinweg beurteilt werden. Im Gegenzug kann der Einfluss von Antwortähnlichkeit untersucht werden, indem man ERN-Potentiale für die verschiedenen Arten von Fehlern betrachtet und ermittelt, ob die ERN-Morphologie bei Fehlern mit derselben Hand sich von der bei Fehlern mit verschiedenen Händen oder Fingern unterscheidet.

Im Experiment hatten die Versuchspersonen mit dem Zeige- oder Mittelfinger der linken oder rechten Hand auf einen der vier Buchstabenstimuli S, H, C und K zu reagieren, wobei H und K sowie S und C als ähnlich im Sinne von Tversky (1977) betrachtet werden. Fehler wurden wie folgt klassifiziert: 1) Richtige Hand – Falscher Finger, 2) Falsche Hand – Richtiger Finger, 3) Falsche Hand – Falscher Finger. Es zeigte sich, dass Reaktionen auf ähnliche Stimuli häufiger falsch waren. Die Fehler mit den kürzesten Reaktionszeiten waren die extremsten, also diejenigen, die mit dem falschen Finger der falschen Hand ausgeführt wurden. Die kurzen Reaktionszeiten entstehen vermutlich dadurch, dass hier geraten wird und keine kognitive Verarbeitung des Stimulus stattfindet. Dazu passend wiesen Fehler, die weniger gravierend waren, also einen korrekten Anteil hatten (mindestens korrekte Hand oder korrekter Finger), auch etwas längere Reaktionszeiten auf, die zumindest auf den Versuch einer kognitiven Verarbeitung hinweisen. Bezüglich des Einflusses von Antwortähnlichkeit wurde erwartet, dass wegen geringerer Ähnlichkeit beide Fehlerarten, die die falsche Hand involvieren, größere ERN-Amplituden zeigen sollten. Es zeigte sich jedoch kein solcher Effekt. Lediglich beim extremsten Fehler mit dem falschen Finger der falschen Hand zeigten sich die größten ERN-Amplituden. Den Autoren fiel allerdings auf, dass es bei den Probanden Subgruppen gab, die verschiedene Strategien bei der Bewegungsausführung einsetzten. Einige wählten zuerst den Finger, mit dem die Reaktion ausgeführt werden sollte, andere die Hand. In der Subgruppenanalyse zeigte sich bei den Finger-präferierenden Probanden die kleinste ERN bei Fehlern, bei denen der richtige Finger (aber die falsche Hand) benutzt wurde, und bei den Hand-präferierenden Probanden bei den Fehlern, die die richtige Hand (aber den falschen Finger) involvierten.

Bernstein et al. (1995) werteten dies als Hinweis darauf, dass dem Prozess der Fehlersuche und somit der ERN ein Vergleich von Antwortrepräsentationen zugrunde liegt, dessen Ergebnis von der Antwortähnlichkeit und von der Strategie des Probanden abhängt, mit der er seine Handlungen plant. Ähnlichkeit der Stimuli hatte keinerlei Einfluss auf die Amplitude der ERN. Es ist also eher unwahrscheinlich, dass die ERN einen Vergleich zwischen erwarteten und tatsächlichen Stimuli reflektiert.

### 1.3.3. Antwortkonflikt und Konfliktsuche

Viele der bisher diskutierten Studien kamen zum Schluss, die ERN reflektiere einen Mechanismus, der speziell der Suche von Fehlern dient (Falkenstein et al., 1990,

1991, 1995; Gehring et al., 1993; Coles, Scheffers, & Fournier, 1995). Entgegen der Auffassung, ACC-Aktivität und somit ERN-Potentiale reflektieren einen Vergleich der richtigen Antwort gegenüber der Repräsentation der tatsächlich gegebenen Antwort zur Erkennung eines Fehlers (Coles et al., 1995; Falkenstein et al., 1995) verbinden alternative Theorien die ACC-Aktivität, die in der ERN sichtbar wird, mit der Erkennung eines Antwortkonflikts (Botvinick, Braver, Barch, Carter & Cohen, 2001; Carter & Van Veen, 2007). Antwortkonflikt bedeutet, dass verschiedene, konkurrierende Repräsentationen von Antwortmöglichkeiten aktiv sind (Botvinick et al., 2001; Botvinick, Cohen & Carter, 2004; Carter et al., 1998), unter anderem die Repräsentation der korrekten Lösung, die im Verlauf der Verarbeitung aktiv wird. Die Amplitude der ERN reflektiert Variationen im Ausmaß des Konflikts nach Beginn einer fehlerhaften Handlung (Yeung, Botvinick & Cohen, 2004). Je größer dieser Konflikt ist, desto mehr ACC-Aktivität entsteht mit folglich höheren ERN-Amplituden. Besonders stark konfliktinduzierende Aufgaben sind solche, deren Teilaspekte miteinander interferieren, wobei Interferenz bedeutet, dass die Ausführung eines Teils der Aufgabe die Ausführung des anderen behindert. Dieses Phänomen namens „Cross talk“ (Mozer & Sitton, 1998) tritt vor allem auf, wenn die Teilaspekte der Aufgaben ähnlich sind und auf denselben Verarbeitungspfaden verarbeitet werden. Carter et al. (1998) schlossen aufgrund von Daten, die sie aus einer fMRT-Studie zur Rolle des ACC bei *performance monitoring* gewannen, dass auch bei korrekter Aufgabenlösung konkurrierende Antwortrepräsentationen entstehen. Sie beobachteten deutliche ERN-Potentiale vor allem bei denjenigen richtig gelösten Aufgaben, die einen größeren Antwortkonflikt auslösten, und schlossen daraus, dass die Potentiale eher Korrelate der Entdeckung eines Antwortkonflikts darstellten, als Korrelate der Suche nach Fehlern. Auch Botvinick et al. (2001) unterstützen die Konfliktverarbeitungstheorie. Sie konnten durch konnektionistische Modelle zeigen, dass eine Feedbackschleife (Carter & Van Veen, 2007) *conflict monitoring* und Kontrolle verbindet. Als weiteren Hinweis darauf, dass der ERN eine Konfliktsuche zugrunde liegt, fanden Dehaene et al. (1994), dass Probanden, die ihre Antwort auf einen Stimulus für zwei Sekunden zurückhalten mussten, bei Fehlern keine ERN aufwiesen. Die Autoren führten dies darauf zurück, dass zum Zeitpunkt der Antwort keine Konkurrenz mehr zwischen verschiedenen Verarbeitungswegen, und somit kein Konflikt mehr besteht (Dehaene et al., 1994).

In einer aktuelleren Studie zum Zusammenhang zwischen Antwortkonflikt und ERN fanden Hughes und Yeung (2011), dass Variationen in der Dynamik von Antwortauswahl und Antwortkonflikt mit Veränderungen der ERN zusammenhängen, womit sie ebenfalls die Aussagen der *conflict monitoring* Theorie bekräftigten. In der Studie wurden Flanker Tasks eingesetzt (Eriksen & Eriksen 1974), von denen bekannt ist, dass die Aktivität des ACC größer ist, wenn der kritische Stimulus von inkongruenten Stimuli umgeben wird, als wenn er von kongruenten Stimuli umgeben wird (Hughes und Yeung, 2011). Dies kann einerseits dadurch begründet werden, dass bei inkongruenten Stimuli ein größerer Antwortkonflikt durch die inkongruenten Informationen und Implikationen von Target und Flanker entsteht, der nicht entsteht, wenn Stimulus und Flanker dieselbe korrekte Antwort auslösen. Genauso besteht in Trials mit inkongruenten Flankern eine höhere Wahrscheinlichkeit für Fehler. Somit steigen und kovariieren mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit sowohl Fehlerwahrscheinlichkeit als auch Antwortkonflikt. Die Studie sollte Schwierigkeit und Antwortkonflikt trennen und deutlich machen, welche distinkten Prozesse jeweils ablaufen. Dies erfolgte durch die Präsentation von kongruenten, inkongruenten (*conflict trials*) und maskierten Target-Distraktor-Paaren. Die maskierten kongruenten Stimuli wurden durch Schraffur so verdeckt, dass die Richtung von Target und Distraktor nur noch schwer zu erkennen war. Es wurden kongruente Stimuli für die Maskierung gewählt, um eine Bedingung zu schaffen, in der Fehler durch die Maskierung entstehen. Die Maskierung wurde so gewählt, dass die darunter liegenden Stimuli noch gut zu erkennen waren, jedoch genügend Fehler erzeugten, um mit den Resultaten bezüglich der inkongruenten Stimuli verglichen werden zu können. Die Probanden sollten zunächst auf den jeweils präsentierten Stimulus reagieren und dann erneut die Taste drücken, wenn sie der Meinung waren, einen Fehler gemacht zu haben. Zum Vergleich wurden Trials gewählt, in denen die Leistung der Probanden in der Bedingung mit inkongruenten und maskierten Stimuli einander im Bezug auf Fehlerrate, Anzahl der angegebenen Fehler und Reaktionszeiten entsprach. Die Ergebnisse in den beiden Bedingungen unterschieden sich massiv im Bezug auf die resultierenden ERN-Amplituden: So zeigten sich signifikant größere Amplituden und deutlichere Korrekturversuche in der Bedingung mit den inkongruenten Target-Distraktor-Kombinationen als in der Bedingung mit den maskierten Stimuli, was die Auffassung der Autoren bekräftigte, die Morphologie der ERN-Amplitude hänge mit einem Antwortkonflikt zusammen und

nicht mit der Aufgabenschwierigkeit. Die Pe-Amplituden unterschieden sich zwischen beiden Bedingungen nicht, sie variierten aber abhängig von dem Wissen des Probanden, einen Fehler gemacht zu haben. Die Autoren schlossen daraus, dass die ERN die Dynamik der Antwortauswahl widerspiegelt und die Pe das bewusste Verarbeiten eines Fehlers (Hughes & Yeung, 2011).

Gehring & Fencsik (2001) befassten sich ebenfalls mit der Frage, ob der ERN eher ein System zur Fehlersuche oder Konfliktsuche zugrunde liegt. Würde der ERN ein System zur Fehlersuche zugrunde liegen, so müssten die größten ERN-Potentiale bei gravierenden Fehlern zu verzeichnen sein, also bei geringer Ähnlichkeit zwischen tatsächlicher und verlangter Reaktion. Wäre die ERN Ausdruck einer Suche nach Konflikten, so müssten die größten Amplituden bei weniger gravierenden Fehlern mit der richtigen Reaktion ähnlichen Bewegungsparametern entstehen. Die Studie war ähnlich aufgebaut wie die von Bernstein et al. (1995, s.o.). So gab es drei Arten von Fehlern, die begangen werden konnten: 1. Falsches Körperteil auf richtiger Seite, 2. Richtiges Körperteil auf falscher Seite und 3. Falsches Körperteil auf falscher Seite. Die Autoren fanden die größten Amplituden bei Fehlern mit Reaktionen, die der richtigen Reaktion ähnlich waren und somit einen Antwortkonflikt generierten, und unterstützen so eher die Theorie der ERN als Korrelat der Konfliktsuche. Im Gegensatz zu den Befunden von Bernstein et al. (1995) waren bei den gravierendsten Fehlern, nämlich denjenigen mit falschem Körperteil auf falscher Seite, die kleinsten Potentiale zu sehen.

Arbel und Donchin (2011) versuchten in einem Experiment zu belegen, dass neben der ERN andere Komponenten ereigniskorrelierter Potentiale (event-related potential, ERP) ähnliche Variation in Bezug auf ihre Amplituden bei verschiedenen Arten von Fehlern zeigen. Dafür wurde ein ähnlicher Versuchsaufbau genutzt wie bei Bernstein et al. (1995), nur galt diesmal das Interesse nicht hauptsächlich der ERN. Bezüglich der ERN fanden die Autoren heraus, dass sie zwar in gewissem Ausmaß durch den Konflikt bei ähnlichen Stimuli beeinflusst wird, dass der größte Einfluss jedoch von dem Vergleich zwischen adäquater und tatsächlicher Reaktion herrührt. Hier waren die kleinsten ERN-Amplituden in der Kategorie „falsche Hand“ und „falscher Finger“ zu beobachten, der Kategorie, in der am wenigsten Fehler begangen wurden. Dies stimmt mit Ergebnissen von Falkenstein et al. (2000) und Gehring und Fencsik (2001) überein, die ebenfalls in den Bedingungen, in denen am wenigsten Fehler gemacht wurden, die kleinsten ERN-Amplituden fanden. Bezüglich der Pe konnte

gezeigt werden, dass sie ebenfalls von Antwort-Ähnlichkeit beeinflusst wird und die größten Amplituden bei der Fehlerkategorie „falscher Finger – falsche Hand“ aufweist, wobei sich die Amplituden in den beiden anderen Bedingungen nicht unterscheiden. Dies entspricht nicht dem Verhalten der ERN-Amplituden im selben Experiment und lässt vermuten, dass die Pe-Amplitude in anderer Art und Weise vom Ausmaß des Fehlers beeinflusst wird als die ERN. Als mögliche Erklärung zogen die Autoren in Betracht, die Pe-Amplituden nach Fehlern könnten weniger sensitiv für Variationen im Ausmaß des Fehlers sein und nur von extremsten Fehlern moduliert werden.

Die Ergebnisse einer der Nachfolgearbeiten aus der Falkenstein-Gruppe (Falkenstein, Hoormann, Christ & Hohnsbein, 2000, s.o.) sprechen jedoch nicht für die Korrektheit der Konfliktverarbeitungshypothese. Die Autoren fanden ERN-Potentiale auch in Aufgaben, bei denen per Definition kein Antwortkonflikt entstehen kann, zum Beispiel bei Reaktionen in der NoGo-Bedingung bei Go/Nogo Aufgaben, den sogenannten false alarms. Zudem fanden sie annähernd gleich große ERN-Amplituden in Aufgaben mit starkem Antwortkonflikt im Vergleich zu Aufgaben mit weniger ausgeprägtem Antwortkonflikt. Diese Ergebnisse widersprechen der Konflikterkennungstheorie, welche unter anderem besagt, dass die Amplitude der ERN/Ne dann besonders groß ist, wenn ein großer Antwortkonflikt besteht, z.B. wenn die erforderliche und die tatsächlich gegebene Antwort einander sehr ähnlich sind (Botvinick et al., 2001).

#### 1.3.4. Generic error detection system

Van Schie, Mars, Coles & Bekkering (2004) ließen Versuchspersonen selbst Flanker-Tests am PC ausführen und später andere Probanden dabei beobachten, wie sie denselben Test ausführten. Sie fanden sowohl in der Ausführungs- als auch in der Beobachtungsbedingung eine signifikante ERN bei Fehlern. Die ERN bei Beobachtung hatte eine längere Latenz und ein späteres und kleineres Maximum, war aber an einer ähnlichen Stelle lokalisiert wie die ERN, die bei eigener Ausführung der Aufgabe entstand: Die Richtigkeit des eigenen oder beobachteten Verhaltens beeinflusste die neuronale Aktivität im medialen frontalen und Motorcortex (van Schie et al., 2004). Dabei erhärtete sich die Vermutung, dass bei Beobachtung eines fehlerhaften Verhaltens einer anderen Person ähnliche Mechanismen der Fehlerverarbeitung aktiv sind wie bei der eigenen Ausführung des

Verhaltens. Dies bestätigten die Ergebnisse von Miltner, Brauer, Hecht & Trippe (2004), die ebenfalls zeigen konnten, dass auch die bloße Beobachtung der fehlerhaften Performance einer anderen Person ERN-Potentiale auslösen kann.

In einer Studie von Yeung, Holroyd & Cohen (2005) reagierten die Probanden auf Stimuli, die vom Bildschirm präsentiert wurden, per Knopfdruck und beobachteten im zweiten Teil, wie vom Computer randomisierte Antworten auf Stimuli gegeben wurden. Auch durch das bloße Zusehen zeigten die Probanden ERN-Potentiale, die sich von den anderen nur durch eine kleinere Amplitude unterschieden. Auch Kobza, Thoma, Daum & Bellebaum (2011) fanden in einer Studie zu Beobachtungslernen ERN-Potentiale bei Versuchsteilnehmern die am PC-Bildschirm die Handlungen einer virtuellen Person mitverfolgten.

Diese Ergebnisse führten zu der Annahme, dass die ERN nicht unbedingt durch die fehlerhafte Handlung selbst entsteht, sondern Korrelat eines allgemeinen Fehlererkennungssystems ist (Generic Error Detection System; Miltner et al., 1997; Leuthold & Sommer, 1999). Dieser Terminus soll im Zusammenhang mit Fehlerverarbeitung bedeuten, dass das System weder von der Modalität der Aufgabe (Auswahl-, Schätz-, RT-, Go/Nogo-Aufgaben) noch dem präsentierten Stimulus (visuell, auditorisch, somatosensorisch, interne oder externe Quelle) abhängig ist (Miltner et al., 1997) und auch Fehler erkennt, die nicht notwendigerweise das Individuum selbst verursacht hat, sondern z.B. ein anderes Individuum (van Schie et al., 2004) oder ein Computersystem (Ehlis et al., 2005; Miltner et al., 1997).

Ehlis et al. (2005) überprüften in diesem Zusammenhang, ob ERN-ähnliche Potentiale gemäß der Theorie des allgemeinen Fehlererkennungssystems auch bei externen Fehlern auftreten, die die Versuchsperson nicht selbst produziert hat. In einem Eriksen Flanker Test traten reguläre ERN- und Pe-Potentiale nach Fehlern auf, nicht jedoch nach korrekten Trials mit falschem Feedback durch simulierte Computerfehler. Auch bei Erweiterung des Suchintervalls auf 500 ms blieben Komponenten, die einer ERN entsprechen würden, aus. Dieses Ergebnis spricht eher gegen ein allgemeines Fehlererkennungssystem (Ehlis et al., 2005).

#### 1.3.5. Dopamin und Verstärkungslerntheorie

Dopamin entsteht beim Umbau von Tyrosin zu Adrenalin, wobei Tyrosin in Levodopa umgewandelt wird, aus welchem dann Dopamin entsteht. Dieses ist essentiell für viele physiologische Prozesse inner- und außerhalb des ZNS. Das größte

Vorkommen von Dopamin im ZNS findet sich u.a. in der Pars Compacta der Substantia Nigra, dem Ventralen Tegmentalen System und den retro-rubralen Regionen. Diese Ansammlungen von Nervenkerne weisen Projektionen in andere Teile des Gehirns wie die Basalganglien und den Cortex auf (Holroyd & Coles, 2002) und werden in ihrer Gesamtheit als das mesenzephalische Dopaminsystem bezeichnet (Meck, 2006). Dabei existieren vier besonders wichtige dopaminerge Pfade, die teilweise für die Entstehung der ERN wichtig sind:

Das Tubero-infundibuläre System zieht vom Ncl. infundibularis und von der periventriculären Zone zum Infundibulum. Es spielt eine wichtige Rolle bei der Freisetzung von Prolactin, luteinisierendem Hormon (LH) und Wachstumshormonen. Die übrigen Systeme entwickeln sich aus den dopaminergen Zellgruppen der Area tegmenti ventralis und der Substantia nigra: Das nigrostriatale System zieht von der Substantia nigra zum Neostriatum. Die motorischen Störungen bei M. Parkinson werden mit einem Verlust dopaminergener Neurone in der Zona compacta der Substantia nigra in Verbindung gebracht (Falkenstein et al., 2001). Das mesocorticale System verläuft vom ventralen Tegmentum zum Frontallappen. Diese Projektion spielt eine Rolle bei kognitiven Funktionen, insbesondere bei exekutiven Funktionen und Motivation (Meck, 2006).

Das mesolimbische System entspringt im ventralen Tegmentum und projiziert v.a. zum limbischen System (Nucleus Accumbens, Hippocampus, Amygdala, Corpus Mammillare, Fornix etc.). Es wird auch als mesolimbisches Belohnungssystem bezeichnet, da es eine wichtige Rolle bei Verstärkung und Verstärkungslernen spielt (Holroyd & Coles, 2002, s.u.). Die vier dopaminergen Systeme sind in Abb. 2 dargestellt.

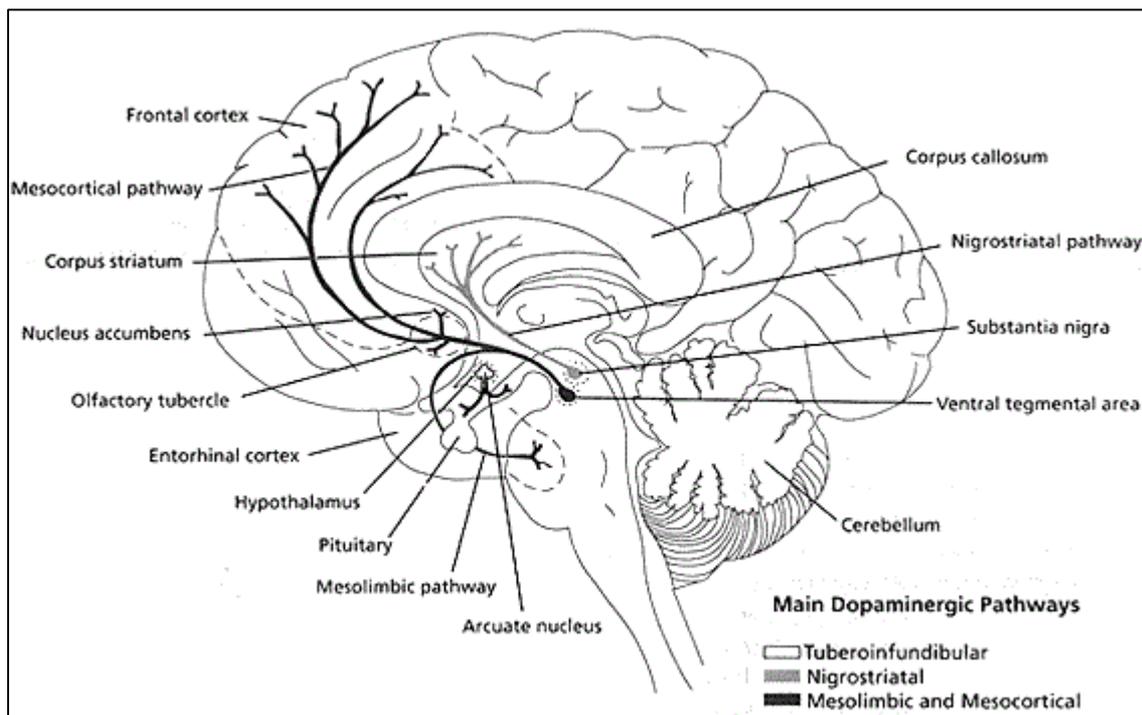


Abb. 2: Dopaminerge Pfade im Gehirn  
<http://www.australianprescriber.com/magazine/17/1/17/21>

Laut Holroyd & Coles' (2002) *Reinforcement Learning Theory* für die funktionelle Bedeutung der ERN gibt es Zusammenhänge zwischen der ERN und der Aktivität des mesencephalen Dopaminsystems. Die Theorie besagt, dass bei einer vom ACC ausgewählten Handlung, die nicht zum gewünschten Outcome führt, dopaminvermittelt Feedback über die nicht erfolgreiche Handlung gegeben wird. Dieses fehler-assoziierte Feedbacksystem, das letztendlich dem Verstärkungslernen zugrunde liegt, involviert das mesenzephal Dopaminsystem (s.o.). Die mesenzephalen dopaminergen Neuronen der Basalganglien kodieren dabei die Diskrepanz zwischen erwartetem und tatsächlichem Outcome einer Handlung. Wird ein Fehler gemacht, sind die erwarteten Konsequenzen des Handelns schlechter als erwartet und das mesenzephal Dopaminsystem sendet ein negatives Verstärkungslernsignal (*prediction error*) an den frontalen Cortex. Im ACC werden dann apikale Dendriten von Motoneuronen durch das Signal disinhibiert (Holroyd Holroyd, Nieuwenhuis, Cohen & Yeung, 2003). Durch die dopaminerge Disinhibition des ventralen Teils des ACC werden die apikalen Dendriten von Neuronen depolarisiert. Als Folge erscheint im EEG die ERN durch die zeitgleich auf Zellkörper oder Dendriten der Pyramidenzellen einwirkenden postsynaptischen Potentiale. Pyramidenzellen sind parallel angeordnet und bei gleichzeitiger Erregung überlagern

sich die Potentiale, wobei sie an der Kopfoberfläche messbare Signale erzeugen (ERN). Die gesendeten Signale werden vom ACC genutzt, um die Leistung in der jeweiligen Aufgabe zu verändern bzw. anzupassen (Yasuda, Sato, Miyawaki, Kumano & Kuboki, 2004). Holroyd & Coles (2002) vermuten den exakten Ort der Entstehung der ERN in den Sulci des ventralen Teils des ACC (s. Kapitel 1.2. Lokalisation).

Die wichtige Rolle des Dopamins bei der Entstehung der ERN zeigt sich bei psychischen Erkrankungen und anderen auch artifiziell erzeugten Zuständen mit Dopaminmangel oder -überfluss. Beim Morbus Parkinson beobachtet man bei kompromittiertem mesenzepalem Dopaminsystem reduzierte ERN-Amplituden (Falkenstein, Hoormann & Hohnsbein, 2001, 2005). Deutliche Effekte zeigen sich auch bei bestimmten psychotropen Substanzen. Die Verabreichung von Amphetaminen (de Bruijn, Hulstijn, Verkes, Ruigt & Sabbe, 2004) und Koffein (Tieges, Ridderinkhof, Snel & Kok, 2004), die beide die Ausschüttung von Dopamin erhöhen, hat einen Anstieg der ERN-Amplituden zur Folge (Boksem, Tops, Kostermans & De Cremer, 2008). Die Verabreichung von Haloperidol hingegen, das die dopaminerge Aktivität in den Basalganglien vermindert, verursachte kleinere ERN-Amplituden (de Bruijn, Sabbe, Hulstijn, Ruigt & Verkes, 2006).

#### 1.4. Error Positivity (Pe)

Das Pe-Potential tritt nach der ERN, ca. 200-500 ms nach der fehlerhaften Reaktion parietookzipital auf (Falkenstein et al., 1991). Die Regionen der Aktivität der Pe und ERN im ACC überlappen zwar teilweise, die Hauptaktivität der Pe befindet sich jedoch weiter rostral und inferior im ACC als die der ERN (Herrmann et al., 2004). Van Veen und Carter (2002a) fanden in einer ERP-Studie durch Dipol-Analysen heraus, dass die Pe aus zwei Subkomponenten besteht: einer frühen frontozentralen Komponente, die der ERN folgt und vermutlich ebenso im kaudalen ACC gebildet wird, und einer späten posterioren Komponente, die vom rostralen ACC und dem superioren posterioren Cortex generiert wird. Arbel & Donchin (2009, 2011) konnten die Ergebnisse von van Veen und Carter (2000a) untermauern. Sie stellten unter Anwendung einer Hauptkomponentenanalyse (*Principal Components Analysis*, PCA) ebenfalls fest, dass die Pe aus zwei Komponenten besteht: einer P300 und einer frontozentralen Positivierung.

Ähnlich wie bei der ERN ist die funktionelle Bedeutung der Pe nicht abschließend geklärt. Von manchen Autoren wird vermutet, dass sie Ausdruck einer bewussten Fehlerverarbeitung ist, die nach dem Begehen eines Fehlers auftritt, wenn das Individuum seine Handlungsstrategie modifizieren muss (Nieuwenhuis et al., 2001; Ehlis et al., 2005; Hughes & Yeung, 2011). Andere Autoren sehen die Pe als Korrelat der subjektiven Bewertung eines Fehlers (Falkenstein et al., 2000) oder als Korrelat von Aufmerksamkeitsprozessen und Gedächtnisfunktionen im Bezug auf die Aufgabe (Ishii et al., 2009).

In einer Serie von Experimenten befassten sich Falkenstein et al. (2000) ausführlich mit der funktionellen Bedeutung der Pe. Aufgrund der Datenlage schlossen sie die Möglichkeit der Pe als Korrelat eines Fehlerkorrektursystems aus, da auch bei *false alarms* in Go/NoGo-Aufgaben sowie bei Fehlern ohne Korrekturversuch Pe-Potentiale zu beobachten waren. Die Möglichkeit der Pe als Korrelat einer bewussten Fehlerverarbeitung wurde ausgeschlossen, da manche Probanden nach Fehlern keine Pe aufwiesen, und es von den Forschern als unwahrscheinlich betrachtet wurde, dass diese sich ihrer Fehler gänzlich unbewusst waren. Auch die Möglichkeit, dass die Pe Korrelat der Inaktivierung der zuvor aufgetretenen ERN sein könnte, wurde entkräftet, da in verschiedenen Versuchsbedingungen festgestellt werden konnte, dass Pe und ERN häufig nicht gleichsinnig kovariieren. So lagen bei manchen Probanden deutliche ERN-Potentiale vor, die jedoch nicht oder nicht konsistent von einer Pe begleitet wurden. ERN-Amplituden wurden außerdem unter Zeitdruck kleiner, während Pe-Amplituden gleich blieben, und zuletzt unterschied sich die Morphologie von Pe und ERN deutlich beim Vergleich von Probanden mit hoher vs. Probanden mit niedriger Fehlerrate: Zwischen den beiden Gruppen gab es keinen Unterschied bezüglich der ERN-Amplituden, die Pe-Amplituden waren jedoch bei Probanden mit hoher Fehlerzahl wesentlich kleiner als bei denen, die wenige Fehler begingen. Dies brachte die Autoren zu der Annahme eines zugrunde liegenden emotionalen oder wertenden Prozesses, da sie davon ausgingen, dass Probanden mit vielen Fehlern eher gleichgültig auf einen Fehler reagieren, wohingegen ein Fehler für Probanden mit weniger Fehlern ein außergewöhnlicheres Ereignis darstellt und somit eine intensivere emotionale Reaktion zur Folge haben müsste. Für die Autoren stand also fest, dass die Pe Ausdruck von Verarbeitungsprozessen ist, die nach Ausführung der Aufgabe auftreten und sich von

den Prozessen, die der ERN zugrunde liegen, unterscheiden (Falkenstein et al., 2000).

### 1.5. CRN-Negativierungen nach korrekten Trials

Die weit verbreitete Auffassung der ERN als Korrelat der Fehlererkennung oder Fehlerkompensation (Scheffers et al., 1996; Falkenstein, 1995, 1996) entstand mitunter dadurch, dass man anfangs davon ausging, die ERN/Ne erscheine ausschließlich nach Fehlern (Gehring et al., 1993; Dehaene et al., 1994). Diese Annahme wurde jedoch in Frage gestellt, als andere Autoren eine ERN-ähnliche Negativierung auch nach fehlerfrei durchgeführten Aufgaben fanden, die im folgenden CRN (*correct response negativity*) genannt wurde (Falkenstein et al., 2000; Scheffers & Coles, 2000; Vidal et al., 2000; Gehring & Knight, 2000). CRN-Potentiale haben i.d.R. kleinere Amplituden, teilen jedoch weitgehend die morphologischen und topographischen Eigenschaften der ERN (Vidal et al., 2000; Vidal, Burle, Bonnet, Grapperon & Hasbroucq, 2003). Carter et al. (1998) beobachteten in fMRT-Studien zu *performance monitoring*, dass der ACC nicht nur bei fehlerhaften Reaktionen aktiv war, sondern auch bei richtigen Reaktionen auf eine Aufgabe, die einen hohen Antwortkonflikt beinhaltete. Die Autoren schlossen daraus, dass der ACC eher Bedingungen detektiert, unter denen Fehler wahrscheinlich sind, als die Fehler selbst. Auch Suchan, Zoppelt & Daum (2003) lokalisierten den Entstehungsort der CRN im ACC.

Es herrscht Uneinigkeit darüber, ob die beiden Potentiale neurophysiologische Korrelate desselben Prozesses darstellen. Die CRN stellt in Frage, ob antwortbezogene ERP wie die ERN wirklich fehlerspezifisch sind. Es gibt Vertreter der Meinung, dass ERN und CRN nicht durch die gleichen Prozesse hervorgerufen werden. Hierfür spricht zum Beispiel, dass Hajcak, Moser, Yeung & Simons (2005a) in einem Wettspiel Variation der ERN-Amplituden mit dem Ausmaß des Gewinns oder Verlusts fanden und sich dies bei der CRN nicht beobachten ließ. Endrass, Klawohn, Gruetzmann, Ischebeck & Kathmann (2012) fanden mittels einer PCA sowohl des ERN- als auch des CRN-Potentials zwei Faktoren mit unterschiedlicher Lokalisation. Ein zentraler Faktor schien zwischen richtigen und falschen Antworten zu unterscheiden und ein frontoparietaler Faktor trug zu ERN und CRN gleichermaßen bei. Dieser Befund ließ die Autoren vermuten, dass der ERN und CRN eine Kombination zweier Prozesse zugrunde liegt. Ein Aspekt ist auf Fehler

bezogen und ein weiterer reflektiert *response monitoring* unabhängig vom Outcome. Coles, Scheffers & Holroyd (2001) vermuteten, die ERN nach korrekten Trials könnte dadurch hervorgerufen werden, dass Versuchspersonen überzeugt sind, einen Fehler gemacht zu haben, obwohl ihre Antwort korrekt war. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die CRN einen Antwortkonflikt widerspiegelt, der auch bei letztendlich korrekt beantworteten Trials vorliegen kann. Außerdem zogen die Autoren Fehlerverarbeitung oder Artefakte als Auslöser in Betracht. Vidal et al. (2000) fanden ERN-ähnliche Potentiale auch nach korrekten Durchläufen in Go/NoGo-, Wahl- und Reaktionszeitaufgaben. Sie traten nach korrekten und nach anfangs fehlerhaften Aufgabendurchgängen auf, bei denen die Möglichkeit einer Korrektur durch die Probanden bestand. Vidal et al. (2000) unterstützten aufgrund der bisherigen Studienlage und wegen der Existenz der CRN nicht die Theorie, dass die ERN spezifisch für Fehler sei oder einen Fehlerverarbeitungsprozess repräsentieren könnte und zogen alternative Erklärungen für die Ausbildung von ERN und CRN in Erwägung. Sie diskutierten die Möglichkeit, dass die tatsächliche Fehlersuche, von der man bisher dachte, sie sei durch die ERN reflektiert, später stattfindet, nämlich zeitgleich mit der Pe, welche laut den Autoren tatsächlich spezifisch im Zusammenhang mit Fehlern auftritt. Hierfür spricht auch die Tatsache dass sich bei Vidal et al. (2000) keine Pe nach korrekten und korrigierten Trials fand, sondern ausschließlich bei (unkorrigierten) Fehlern. Die ERN könnte somit einen emotionalen Prozess oder einen Bewertungsprozess der gegebenen Antwort reflektieren, z.B. einen Vergleich, der dann zu Fehlersuche führt, welche sich wiederum im Potential der Pe zeigt. Falkenstein et al. (2000) benutzten ein Experiment mit Eriksen Flanker Tests (Eriksen & Eriksen 1974), um herausfinden, ob ein durch inkongruente Trials erzeugter Antwortkonflikt auch bei korrekten Trials stärkere Negativierungen hervorrufen würde. Sie fanden nach korrekten Trials ERN-ähnliche Potentiale, deren Amplitude davon unabhängig war, ob kongruente oder inkongruente Target-Distraktor-Paare präsentiert wurden. Die CRN-Potentiale waren, genau wie die ERN-Potentiale im selben Experiment, nicht abhängig vom Vorliegen eines Antwortkonflikts und sprachen gegen die auf diesem basierende Theorie (Carter et al., 1998; Carter & Van Veen, 2007). Als Erklärung für das Auftreten der CRN zogen Falkenstein et al. (2000) zusammenfassend folgende Gründe in Betracht: Die CRN könnte daraus entstehen, dass die korrekte Antwort nicht präsent ist, weil der Prozess der *response determination* (Falkenstein et al., 2000; s.o.) noch

nicht bis zum Ende abgelaufen ist und die Aufgabe nur durch Raten richtig gelöst wird. Die CRN wäre dann Korrelat des *mismatch* zwischen Repräsentationen der korrekten Antwort (*response choice*) und dem inkorrekten oder nicht vorhandenen Ergebnis der *response determination*. Alternativ ist es möglich, dass die CRN nicht das Ergebnis eines Vergleichsprozesses (*error detection*), sondern den Vergleichsprozess selbst (*response checking*) darstellt oder dass die CRN Korrelat des Vergleichs der Antwortrepräsentationen ist und die ERN dasselbe zuzüglich eines Fehlersignals widerspiegelt.

Die Auffassung der ERN als reines Fehlerpotential gerät durch die Existenz der CRN ins Wanken. Prozesse des *response monitoring*, die mit dem Begehen von Fehlern verbunden sind und die eben auch bei korrekt bearbeiteten Aufgaben ablaufen, wurden als Auslöser der Potentiale ebenso in Betracht gezogen wie Fehler. Abschließend kann jedoch trotzdem bisher keine der klassischen Theorien eine einfache und schlüssige Erklärung für die Existenz der CRN liefern. Die CRN stellt die Gültigkeit des *error detection* Ansatzes (Coles et al., 2001), das Modell des *conflict monitoring* (Yeung et al., 2004) und die Modelle des Verstärkungslernens (Holroyd & Coles, 2002) in Frage. Die Autoren einer aktuelleren Studie (Roger, Benar, Vidal, Hasbroucq & Burle, 2010) vermuten, dass hinter ERN- und CRN-Potentiale der gleiche Prozess steht. Die Potentiale spiegeln laut den Autoren einen Routineprozess wider, der immer abläuft. Die Unterschiede in der Amplitudengröße entstehen durch Modulation, z.B. durch den medialen präfrontalen Kortex und den ACC. Jedoch ist zur weiteren Festigung dieser Theorie und der weiteren Klärung der Herkunft der CRN weitere Forschung notwendig.

## 1.6. ERN nach negativem Feedback: Feedback-ERN (FRN)

Auch negatives Feedback kann zur Auslösung eines ERN-Potentiale führen. Miltner et al. (1997) beschrieben das Potential, das nach negativem Feedback auftritt und dessen Morphologie der ERN sehr ähnelt, als Feedback-ERN (FRN; Miltner et al., 1997) und vermuteten, dass es vom selben allgemeinen Mechanismus hervorgerufen wird wie die ERN.

Die FRN entsteht im ACC und im SMA (Gehring & Willoughby, 2002; Miltner et al., 1997) und erreicht ihr Maximum später als die reaktionsgebundene ERN, indem sie erst 250 bis 400 ms nach einem negativen Feedback-Reiz frontozentral sichtbar wird (Miltner et al., 1997; Holroyd & Coles, 2002). Auch im posterioren cingulären Cortex

(PCC; Nieuwenhuis et al., 2005) wurde FRN-Aktivität festgestellt. Die im Vergleich zur ERN längere Latenz von 250 bis 400 ms kann dadurch erklärt werden, dass die FRN durch ein externes Signal (den Feedback-Stimulus) erzeugt wird, das erst noch verarbeitet werden muss, wohingegen die ERN durch einen internen Prozess erzeugt wird, der stattfindet, noch bevor die jeweilige Handlung überhaupt vollständig ausgeführt wird (Ehlis et al., 2005).

Doñamayor et al. (2011) untersuchten die FRN und deren funktionelle Bedeutung mittels des MEG, um durch die gute zeitliche und dem EEG überlegene räumliche Auflösung genauere Daten zum Ablauf des Potentials zu gewinnen. Das magnetische Korrelat der FRN nannten sie mFRN. Sie hatte entsprechend oben genannter Vorbefunde eine Latenz von 230 bis 465 ms. Das Potential war zuerst im dorsalen PCC und später weiter anterior sichtbar. Da bei ERN sowie Feedback-ERN ähnliche Regionen des ACC aktiv sind, wird angenommen, dass diese Region für die Verarbeitung externer sowie interner Fehler-Stimuli verantwortlich ist (Holroyd, Nieuwenhuis, Mars & Coles, 2004).

Luu, Tucker, Derryberry, Reed & Poulsen (2003) konnten nicht bestätigen, dass der Ursprungsort der ERN dem der FRN entspricht. Obwohl in ihrer Untersuchung beide Komponenten aus dem ACC stammten, ergaben sich doch leichte Unterschiede. Den Daten von Luu et al. (2003) zu Folge traten ERN-Potentiale ca. 70 ms nach Fehlern in Fehler-Trials und FRN-Potentiale ca. 336 ms nach Präsentation eines Fehler-Feedbacks auf. Nicht nur bezüglich ihrer Latenz, sondern auch bezüglich der Lokalisation fanden sich Unterschiede zwischen ERN und Feedback-ERN: Die Potentiale reflektierten Aktivität des ACC, wobei beide Komponenten dorsomedial lokalisiert werden konnten, die ERN aber im dorsomedialen und zusätzlich im rostromedialen Teil des ACC. Luu et al. (2003) vermuteten, dass der dorsale Teil des ACC für die Aufgabe (Feedback, Valenz, Anforderungen der Aufgabe) und der rostroventrale Teil für die affektive Bewertung des Outcomes zuständig ist. Da sowohl die Überwachung von Fehlern als auch von Konflikten Aktivität des ACC involviert, vermuteten Luu et al. (2003), dass der ACC als allgemeines Kontrollsystem anzusehen ist, das sowohl bei den frühen Stadien von Diskriminationslernen als auch bei fortlaufender Handlungsregulation eine Rolle spielt.

Ähnlich wie bei der Forschung zur ERN beurteilt man in Experimenten zur FRN das Auftreten der Potentiale in verschiedenen Kontexten, um Aussagen über den

Einfluss verschiedener Arten von Feedback auf die FRN treffen zu können. Ziel ist die Identifikation des kognitiven Prozesses, dessen elektrophysiologisches Korrelat die FRN darstellt. Hierbei hat sich vor allem der Einsatz von Glücksspiel-Aufgaben mit variierendem Gewinn oder Verlust als hilfreiches Erhebungsinstrument erwiesen, da hier das Ausmaß des Verlustes durch einen Fehler gut variiert werden kann. Inwiefern die Amplitude eines FRN-Potentials mit dem Ausmaß eines Fehlers kovariert, ist noch Gegenstand aktueller Diskussionen, da widersprüchliche Ergebnisse vorliegen.

Einige Autoren berichten, dass die FRN durch das Bewusstsein entsteht, einen Fehler begangen zu haben, jedoch nicht vom Ausmaß des dadurch entstandenen Verlustes moduliert wird. Die FRN unterscheidet demnach nur zwischen Gewinn und Verlust, nicht jedoch zwischen kleinem Verlust und großem Verlust (Hajcak, Moser, Holroyd & Simons, 2006; Yeung & Sanfey, 2004). Im Gegensatz dazu fanden Wu & Zhou (2009), dass sich FRN-Amplituden abhängig von der Valenz und dem Ausmaß des begangenen Fehlers verändern und auch Doñamayor et al. (2011) konnten in ihrer MEG-Studie zeigen, dass das magnetische Korrelat der FRN, die mFRN, sensitiv für Verluste war, und ihre Amplituden bei Verlusten von 25 Cent signifikant höher waren als bei Verlusten von nur 5 Cent (s.u.).

Da teilweise auch nach neutralem Feedback (weder Gewinn noch Verlust) FRN-Potentiale auftreten, stellt sich die Frage, ob es sich bei der FRN wirklich um ein stabiles, ausschließlich von Fehlern oder negativem Feedback induziertes Potential handelt. In einer Studie von Holroyd, Hajcak & Larsen (2006) zeigte sich, dass neutrales Feedback je nach Kontext die Amplitude der FRN beeinflusst. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Valenz eines Outcomes vom Kontext abhängt (Foti, Weinberg, Dien & Hajcak, 2011). Wenn Geld weder verloren noch gewonnen wurde, so kann dies je nach Kontext bedeuten, dass ein großer Verlust abgewendet werden konnte, oder ein großer Gewinn nicht erzielt wurde. Somit kann auch ein neutrales Ergebnis eine Valenz haben, die im Versuch FRN-Amplituden modulieren kann (Holroyd et al., 2004; Holroyd et al., 2006). Ähnlich dem Einfluss des Kontexts kann auch der Einfluss von Antizipation bei neutralem Feedback die Größe von FRN-Amplituden beeinflussen. Feedback wird nach seiner Präsentation den Erwartungen des Probanden gemäß beurteilt, so dass ein die Erwartung verletzendes Feedback, auch wenn es neutral ist, Einfluss auf die Amplituden haben kann (Hajcak et al., 2007; Holroyd et al., 2003).

Foti et al. (2011) untersuchten mittels PCA von evozierten Potentialen den Einfluss von Feedback auf die FRN in einer Glücksspielaufgabe. Die PCA ist in der Lage, ein ERP in seine einzelnen Komponenten zu zerlegen. So können alle verschiedenen und sich teilweise überlappenden Potentialanteile nach Begehen eines Fehlers einzeln betrachtet und bewertet werden, ohne dass die zu untersuchende Komponente mit anderen Potentialanteilen konfundiert wird (Dien, Spencer & Donchin, 2003; Spencer, Dien & Donchin, 2001). Nach Auftrennung der Potentiale in P300 und andere Komponenten blieben positive Potentiale nach Belohnung mit einer Latenz von 297 ms übrig, die den Latenzen in den oben genannten Vorbefunden zur FRN entsprachen (Miltner et al., 1997; Holroyd & Coles, 2002). Dieses positive Potential zeigte sich bei negativem Feedback reduziert. Dies bewog die Autoren zu vermuten, dass entgegen der bisher gängigen Auffassung, die FRN sei eine negative Welle als Konsequenz eines negativen Feedbacks, die FRN eher eine Modulation eines frontozentralen positiven Potentials als Reaktion auf negatives Feedback ist. Aus der Differenz der ERPs nach positivem und negativem Feedback ergibt sich demnach letztlich eine relative Negativierung nach negativem Feedback. (Foti et al., 2011).

Das Auftreten von FRN-Potentialen beschränkt sich nicht auf Situationen in denen tatsächlich ein Fehler begangen wurde. Wie nach korrekten Reaktionen (CRN, Gehring & Knight, 2000; Scheffers & Coles, 2000) auf den Stimulus in einer Aufgabe kann auch nach falsch negativem Feedback ein FRN-Potential entstehen.

## 1.7. ERN und psychiatrische Erkrankungen

Im Rahmen vieler psychischer Störungen treten kognitive Beeinträchtigungen auf. Sehr deutlich wird dies am Beispiel der Depression: Bei Patienten mit Major Depression Episode wurde eine deutliche Beeinträchtigung der Funktionen des Frontallappens wie z.B. der exekutiven Funktionen und der Handlungskontrolle gefunden, die sich in neuropsychologischen Defiziten äußerte (Veiel, 1997).

Elektrophysiologische Korrelate von Hirnaktivität wie die ERN können genutzt werden, um Fehlerverarbeitung bei neuropsychologisch beeinträchtigten und psychiatrisch erkrankten Patienten zu untersuchen. Veränderte Morphologien von ERPs können unter anderem auch bei Patienten mit Morbus Parkinson (Falkenstein et al., 2005), Schizophrenie (Ehlis, Herrmann, Pauli, Stoeber, Pfuhlmann & Fallgatter 2007), Zwangserkrankungen (Gehring et al, 2000; Ruchow, Gron, Reuter, Spitzer,

Hermle & Kiefer, 2005), Thalamusläsionen (Seifert et al., 2011), und lateral-präfrontalen Hirnschäden (Gehring & Knight, 2000) beobachtet werden.

Wie bereits erwähnt kann eine depressive Störung Auswirkungen auf kognitive Funktionen haben (Veiel, 1997). Depressive Patienten scheinen dabei sensibler für Fehler und negatives Feedback zu sein (Elliott, Sahakian, Michael, Paykel & Dolan, 1998) und können als Reaktion auf negatives Feedback nur schwer ihre Strategien modifizieren (Holmes & Pizzagalli, 2007). Für die stärkere Empfindlichkeit depressiver Patienten für Bestrafung und negatives Feedback spricht auch das Ergebnis einer Studie von Chiu & Deldin (2007), die bei Depressiven höhere ERN-Amplituden in Bedingungen mit neutralem Feedback und Bestrafung fanden, aber keine Veränderung in der Belohnungsbedingung.

Auch bei Angststörungen können deutliche Auswirkungen der Erkrankung auf die ERN-Morphologie auftreten. Eine hohe Trait-Ängstlichkeit (Paulus, Feinstein, Simmons & Stein, 2004) und pathologisches Grübeln (Hajcak, McDonald & Simons, 2003) haben höhere ERN-Amplituden zur Folge (Olvet & Hajcak, 2008). State-Variablen scheinen im Gegensatz zu Trait-Variablen die ERN-Amplituden nicht entscheidend zu beeinflussen. So stellten Moser, Hajcak & Simons (2005) fest, dass die Präsenz einer Spinne im experimentellen Setting bei Spinnenphobikern nicht zu einer Veränderung der ERN-Amplituden bei Fehlern führte.

Gehring, Himle & Nisenson (2000) untersuchten Patienten mit Zwangsstörung im Bezug auf Fehlerverarbeitung und fanden bei ihnen stärkere und verlängerte elektrophysiologische Reaktionen auf Fehler als bei Gesunden, wobei die Amplituden mit dem Schweregrad der Erkrankung variierten. Der Ursprung der Aktivität konnte wie bei vielen anderen Arbeiten zur ERN (z.B. Dehaene, 1994) im ACC lokalisiert werden. Gehring et al. (2000) ziehen als Begründung ein hyperaktives Kontrollsystem in Betracht, das Ereignisse überwachen und im Hinblick auf ihre Konsequenzen klassifizieren soll. Auch bei korrekten Handlungen können bei einer Dysfunktion desselben Fehlersignale entstehen, aufgrund derer die Patienten mit Zwangserkrankungen mehr als andere Menschen das Gefühl haben, eine Handlung verlaufe nicht in der beabsichtigten Art und Weise. Auch Ursu, Stenger, Shear, Jones & Carter (2003) sowie Hajcak & Simons (2002) fanden erhöhte Aktivität des ACC bei Menschen mit Zwangserkrankungen sowohl nach Fehlern als auch nach korrekten Trials im Vergleich mit der jeweiligen Kontrollgruppe

und nahmen wie Gehring et al. (2000) daher eine allgemeine Hyperaktivität des ACC beim *performance monitoring* bei Zwangserkrankungen an.

Bei psychiatrischen Erkrankungen aus dem Gebiet der externalisierenden Störungen wie Substanzabusus oder antisozialer Störung (Krueger, Markon, Patrick, Benning & Kramer, 2007) kann man eine andere ERN-Morphologie beobachten (Olvet & Hajcak, 2008). Wenig sozialisierte Personen und Psychopathen haben Schwierigkeiten, Antworten oder Reaktionen zu inhibieren, selbst wenn bekannt ist, dass sie eine Strafe nach sich ziehen. Die Patienten zeichnen sich durch Unempfindlichkeit gegenüber Fehlern und Bestrafung aus und weisen somit Defizite beim Vermeidungslernen auf (Krueger et al., 2007; Newman & Schmitt, 1998). Laut Devinsky et al. (1995) weisen Personen mit cingulären Läsionen Ähnlichkeiten mit Psychopathen bzgl. Aggression, Fehlen sozialer Zurückhaltung und Enthemmung auf. Da der ACC, der als Entstehungsort der ERN bekannt ist (Scherg, 1990; Dehaene, 1994; Herrmann et al., 2004), neben vielen anderen Funktionen für die Expression und Kontrolle von Affekt verantwortlich ist (Dikman & Allen, 2000), sind die veränderten ERN-Morphologien bei Psychopathen möglicherweise auf Dysfunktionen im ACC zurückzuführen.

Schizophrene Patienten weisen nach weitverbreiteter Auffassung kleinere ERN-Amplituden nach Fehlern auf als gesunde Menschen (Bates, Kiehl, Laurens & Liddle, 2002). Morris, Yee & Nuechterlein (2006) fanden bei Schizophrenen reduzierte ERN-Potentiale, wenn in der Aufgabe Genauigkeit betont war, sowie höhere Amplituden der CRN, die in ihrer Ausprägung den ERN-Amplituden dieser Gruppe entsprachen. Reduzierte ERN- und erhöhte CRN-Amplituden bei schizophrenen Patienten bestätigten sich in den Experimenten von Mathalon, Fedor, Faustman, Gray, Askari & Ford (2002) sowie Alain, McNeely, He, Christensen & West (2002). Die erhöhten CRN-Amplituden konnten dabei nur in einem Teil der Studien nachgewiesen werden, während sich die reduzierten ERN-Amplituden in den meisten Stichproben schizophrener Patienten bestätigen. Bei diesen Studien muss der Einfluss antipsychotischer Medikation berücksichtigt werden, die modulierend auf den Dopaminhaushalt sowie präfrontale Hirnfunktionen und somit möglicherweise auf die Ausbildung von ERN-Potentialen wirken kann (Morris et al., 2006).

## 1.8. Emotionale und motivationale Komponenten

Falkenstein et al. (1991) erwähnten bereits in einem frühen Artikel zur ERN, dass die interindividuelle Varianz der Amplituden von ERPs bei den Probanden groß sei und schlossen, dass nicht nur kognitive, sondern auch emotionale Reaktionen auf einen Fehler variieren könnten und vom Probanden und dessen Persönlichkeit abhängig seien. Die Autoren vermuteten, dass die unterschiedlichen Amplituden interindividuell unterschiedliche Wege darstellen könnten, wie die Probanden eigene Fehler erleben. Aufgrund dieser Erkenntnisse wandte man sich nach intensiver Erforschung der kognitiven Aspekte der ERN (*error detection, conflict detection usw.*) auch emotionalen und motivationalen Einflussfaktoren sowie Persönlichkeitsaspekten zu (Gehring & Willoughby, 2002; Hajcak, McDonald & Simons, 2004; Luu, Collins & Tucker, 2000b; Pailing & Segalowitz, 2004).

### 1.8.1. Motivationale Faktoren

Um herauszufinden, wie Gewinn und Verlust die ERN modulieren, wurden ERN- oder FRN-Amplituden in Wett-Situationen mit variierendem Gewinn oder Verlust untersucht. Verschiedene Autoren konnten in solchen Experimenten zeigen, dass monetäre Verluste in diesem Zusammenhang ERN- bzw. FRN-Potentiale verursachen (Gehring & Willoughby, 2002; Goyer, Woldorff & Huettel, 2008; Holroyd et al., 2006; Sato et al., 2005; Yeung & Sanfey, 2004) und dass die ERN mit der Valenz des Feedbacks über den Outcome des Experiments zusammenhängt. Aufgrund verschiedener Studien zog man in Betracht, dass Abstufungen in den Verlusten nicht relevant seien, sondern nur die Tatsache des Gewinns oder Verlustes an sich (Holroyd et al., 2006): Laut Yeung und Sanfey (2004) ist die FRN abhängig von der Valenz des gegebenen Feedbacks, aber nicht von der Menge des verlorenen Geldes. Auch Toyomaki & Murohashi (2005) konnten keinen Effekt der Verlustgröße feststellen, obwohl die Teilnehmer angaben, den erlebten Geldverlust bedauert zu haben. Im Experiment von Sato et al. (2005) bestanden keine Amplitudenunterschiede der ERN bei nicht vorhandenem Verlust, kleinem und großem Verlust. Auch Hajcak et al. (2006) berichteten, die ERN/FRN werde allein von Gewinn und Verlust verändert, ob der Verlust jedoch klein oder groß sei, sei unerheblich. Auch neutrales Feedback kann kontextabhängig FRN/ERN-Potentiale hervorrufen (Holroyd et al., 2006). Ebenso kann die Antizipation von Gewinn oder

Verlust die Bewertung des Outcome beeinflussen (Hajcak et al., 2007; Holroyd et al., 2003).

Andere Autoren (Goyer et al., 2008; Wu & Zhou, 2009; Doñamayor et al., 2011) fanden jedoch, dass sich FRN-Amplituden abhängig von Valenz und Ausmaß des Fehlers sehr wohl verändern und sensitiv für Verluste sind. So zeigten sich bei Doñamayor et al. (2011) signifikant höhere Amplituden bei monetären Verlusten von 25 Cent als bei Verlusten von nur 5 Cent. Wurde in einem Experiment besonders viel Wert auf Genauigkeit gelegt (Gehring et al., 1993), oder konnte man unterschiedlich gravierende Fehler machen (Bernstein, 1995), zeigte sich Variation der Amplitude mit dem Ausmaß des Fehlers. Hajcak et al. (2005a) gaben den Probanden in ihrem Experiment Hinweise, wie groß der potentielle Gewinn oder Verlust im Spiel sein würde. Je höher dieser Wert war, desto größer war auch die ERN bei Fehlern. Im zweiten Teil des Experiments führten die Probanden das Experiment unter Beobachtung vs. ohne Beobachtung aus. Unter Beobachtung waren die ERN-Amplituden signifikant höher als in der Kontrollbedingung. Schnelligkeit und Genauigkeit unterschieden sich in den Trials nicht, so dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die ERN-Unterschiede durch unterschiedliche Stimulusverarbeitung hervorgerufen wurden. Die höheren ERN-Amplituden werden vielmehr durch den größeren Verlust bei „wertvolleren“ Trials hervorgerufen. In einem weiteren Experiment (Hajcak, 2007) mussten die Teilnehmer bevor oder nachdem sie auf einen Stimulus reagiert hatten, angeben, was sie als Outcome des Experiments erwartet hatten. Es zeigte sich, dass die Probanden auf Verletzungen der Erwartung mit deutlich höheren FRN-Amplituden reagierten.

Kreussel et al. (2011) untersuchten weitere Faktoren, von denen bekannt ist, dass sie Feedback-ERPs beeinflussen können. Sie stellten fest, dass potentieller Outcome, Feedbackvalenz, Ausmaß und Auftretenswahrscheinlichkeit des Fehlers die ERPs modulieren. Im Experiment wurde vor Beginn ein Hinweis gegeben, ob es sich um Trials mit potentiellem Gewinn oder mit potentiellem Verlust handeln würde. Sie untersuchten dann die ERPs nach Trials mit Ausgang ohne Gewinn, wobei bei einem Teil der Trials die Alternative Gewinn und bei dem anderen Verlust gewesen wäre. Es zeigte sich, dass ERPs nach Fehlertrials mit potentiellem Gewinn höhere Amplituden aufwiesen, wohingegen keine Veränderungen der Amplituden in Fehlertrials mit potentiellem Verlust festzustellen waren. Hier zeigt sich die Wichtigkeit des objektiven und relativen Verlustes. In beiden Situationen hatte der

Outcome den gleichen Wert, nur die Alternativen unterschieden sich. Die Autoren vermuteten in diesem Zusammenhang, dass das Verstärkungslernsystem empfindlicher auf positive als auf negative Verstärkung reagiert (Kreussel et al., 2011).

### 1.8.2. ERN und Persönlichkeit

Boksem, Tops, Wester, Meijman & Lorist (2006) untersuchten den Zusammenhang zwischen Persönlichkeitsvariablen und ERN-Potentialen. Sie benutzten die BIS/BAS Skalen (Carver & White, 1994), die auf Grays biopsychologischer Theorie der Persönlichkeit beruhen (Gray, 1987, 1989). Das BAS (Behavioural Activation System, s.u.) entspricht einer Persönlichkeitsausprägung, die Belohnung anstrebt und mit Extraversion korreliert, das BIS (Behavioural Inhibition System) hingegen ist sensibel für Bestrafung und korreliert mit Neurotizismus (Boksem et al., 2006). Die Neuronen, die im BIS Informationen vermitteln, sind vorwiegend cholinerg, wohingegen im BAS Dopamin als Transmitter fungiert (Gray, 1989). Die Autoren fanden größere ERN-Amplituden bei Probanden mit hohen Werten im BIS und größere Pe-Amplituden bei hohen Werten im BAS. Dies erklären die Autoren durch unterschiedlich motiviertes Verhalten der Versuchspersonen in der Aufgabe. Das Verhalten der Personen mit hohen Scores im BIS ist reaktiv und negativ motiviert im Sinne der Vermeidung negativer Konsequenzen. Vor allem die Angst vor sozialer Bewertung, die im BIS explizit abgefragt wird, steigert das *task engagement*, also das Ausmaß mit welchem der Proband in die Aufgabe involviert ist. Ein Fehler hat bei diesen Probanden einen höheren negativen Wert als bei Personen, die weniger in die Aufgabe involviert sind, und hat deshalb größere ERN-Amplituden zur Folge. Das Verhalten der Extravertierten hingegen ist positiv motiviert und proaktiv. Es stellt den dopaminvermittelten Versuch dar, zukünftige Fehler zu vermeiden und somit den möglichen Gewinn zu maximieren (Boksem et al., 2006). Tops, Boksem, Wester, Lorist & Meijman (2006) fanden in einer Studie zum Zusammenhang zwischen Persönlichkeitseigenschaften und Fehlerverarbeitung, dass ERN-Amplituden und der Cortisolspiegel im Blut mit der Ausprägung der Persönlichkeitseigenschaft Verträglichkeit sowie mit der individuellen Ausprägung von Schamgefühl positiv korrelieren. Der Cortisolspiegel und die Höhe der ERN-Potentiale reflektierten das sogenannte *task engagement* (Mason, Wang, Yehuda, Riney, Charney & Southwick, 2001), welches das Ausmaß beschreibt, mit dem eine Person in die auszuführende

Aufgabe involviert ist und die Mobilisierung von Aufmerksamkeit und anderen Ressourcen beinhaltet, die dafür gebraucht werden. Verträglichkeit sowie Schamgefühl korrelierten im Experiment positiv mit steigender Anspannung der Probanden während der Aufgabendurchführung.

ERN-Größe und Neurotizismus waren im Experiment von Tops et al. (2006) sowie bei Hajcak et al. (2005a) und Pailing & Segalowitz (2004) positiv korreliert. Auch Tucker, Hartry-Speiser, McDougal, Luu & deGrandpre (1999) zeigten, dass Probanden mit höherer Ausprägung negativer Gefühle zumindest zu Beginn ihres Experiments höhere ERN-Amplituden aufwiesen als die mit positiven Gefühlen. Insgesamt schienen sich die Neurotizismus-ähnlichen Persönlichkeitseigenschaften in Form größerer ERN-Amplituden auf die Fehlerverarbeitung auszuwirken, wohingegen positive Gefühle keinen relevanten Einfluss auf die Amplituden zu haben schienen.

Auch Compton, Dainer-Best, Fineman, Freedman, Mutso & Rohwer (2010) zeigten, dass die individuelle Ausprägung von Neurotizismus Fehlerverarbeitung beeinflussen kann. Bei Fehlern zeigten Probanden mit höherer Ausprägung von Neurotizismus die gleiche ERN-Morphologie wie andere Probanden. Wurde bei *false feedback* ein Outcome simuliert, der schlechter war, als erwartet, reagierten ängstlichere Menschen jedoch mit höheren ERN-Amplituden.

Larson, Fair, Good & Baldwin (2009) fanden einen Zusammenhang zwischen ERN-Amplituden in einem Stroop Test und Empathie-Scores von 30 Versuchspersonen im Sinne von größeren ERN-Amplituden bei Personen mit höheren Empathiewerten. Zwischen den erhobenen Persönlichkeitseigenschaften und Pe-Potentialen ließ sich kein Zusammenhang feststellen. In einem späteren Experiment fand sich auch ein Zusammenhang zwischen ERN-Amplituden und Lebenszufriedenheit (Larson, Good & Fair, 2010) im Sinne von kleineren ERN-Amplituden bei Probanden, die angegeben hatten, mit ihrer Lebenssituation zufrieden zu sein. Die Autoren schlossen daraus, Fehler könnten für zufriedene und ausgeglichene Personen weniger bedeutsam sein, weshalb sie im elektrophysiologischen Korrelat kleinere Ausschläge erzeugten. Ähnlich wie bei Empathie (Larson et al, 2009) zeigte sich auch bei Lebenszufriedenheit und den anderen erhobenen positiven Persönlichkeitseigenschaften kein Zusammenhang mit der Pe.

In einem Experiment von Themanson, Hillman, McAuley, Buck, Doerksen, Morris & Pontifex (2008) mit älteren Versuchspersonen wurden Zusammenhänge zwischen

Selbstwirksamkeit und der ERN festgestellt. Wenn Genauigkeit verlangt war, hatten Probanden mit hoher Selbstwirksamkeit höhere ERN- und in diesem Experiment auch höhere Pe-Amplituden. Wenn Geschwindigkeit betont wurde, zeigte sich kein derartiger Effekt.

### 1.8.3. Motivation und Persönlichkeit

Motivationale Faktoren wie Verstärkung oder Bestrafung im Experiment wirken sich auf ERN-Amplituden aus (Gehring & Willoughby, 2002; Holroyd et al., 2006; Nieuwenhuis, Yeung, Holroyd, Schurger, & Cohen, 2004). Dieser Einfluss wird wiederum von Persönlichkeitseigenschaften der Probanden moduliert. Belohnung und Bestrafung haben per se Einfluss auf ERN-Amplituden, jedoch wird dieser wesentlich deutlicher, wenn man Eigenschaften der Probanden berücksichtigt, da je nach Ausprägung eines Persönlichkeitsfaktors die Konsequenz einer Handlung unterschiedliche Auswirkungen auf die ausführende Person hat (Dikman & Allen, 2000; Pailing & Segalowitz, 2004).

Dikman & Allen (2000) untersuchten Probanden mit subklinischer Ausprägung externalisierender Persönlichkeitsstörungen. Die Probanden wurden mit Hilfe des California Psychological Inventory (CPI, Gough, 1957) in hoch sozialisiert und niedrig sozialisiert eingeteilt. Von 2244 Personen wurden die 3% mit dem höchsten bzw. niedrigsten Score ausgewählt, einen Eriksen Flanker Test am PC auszuführen. Alle Versuchsteilnehmer wurden bei einer Hälfte der Trials für falsche Ergebnisse bestraft und bei der anderen Hälfte für korrekte Trials belohnt. Bei wenig sozialisierten Probanden fanden sich signifikant kleinere Amplituden in der Bestrafungsbedingung als in der Belohnungsbedingung, wohingegen die hoch sozialisierte Gruppe lediglich diskrete Unterschiede der ERN-Amplituden in den beiden Bedingungen aufwies. Die Autoren schlossen daraus, dass Persönlichkeitseigenschaften wie soziale Verträglichkeit Einfluss auf die Reaktion auf Fehler und somit auf die Morphologie der ERN haben und dass dies durch den ACC vermittelt wird (Dikman & Allen, 2000).

Auch Pailing & Segalowitz (2004) fanden Belege dafür, dass sich manche Persönlichkeitseigenschaften in der ERN widerspiegeln. Es ist bekannt, dass bei Verstärkung für korrekte Ausführung der Trials größere ERN-Amplituden im Falle eines Fehlers zu erwarten sind (Gehring et al., 1993). Im Experiment von Pailing & Segalowitz (2004) zeigte sich, dass Probanden mit hohen Gewissenhaftigkeitswerten und niedrigen Neurotizismus-Scores weniger von der jeweils gebotenen Belohnung

beeinflusst wurden. Hoch neurotische Probanden zeigten deutlichere Reaktionen auf motivationale Anreize. Sie hatten größere ERN-Amplituden bei Fehlern, wenn Genauigkeit belohnt wurde.

#### 1.8.4. Stimmungseffekte

Es ist bekannt, dass positiver Affekt kognitive Funktionen wie die Gedächtnisleistung und Aufmerksamkeit positiv beeinflussen kann (Wiswede, Münte, Goschke & Rüsseler, 2009a). Um die Auswirkungen der Stimmungslage auf die ERN zu untersuchen, versuchte eine Reihe von Forschern auf verschiedene Weise, in ihren Probanden Stimmungen zu induzieren und beobachtete dann ihre elektrophysiologischen Reaktionen auf Fehler.

Um den Einfluss emotionaler Zustände auf die Fehlerverarbeitung bzw. die ERN beurteilen zu können, wurden in einem Experiment von Larson, Perlstein, Stigge Kaufman, Kelly & Dotson (2006) vor den einzelnen Stimuli eines Flanker Tests angenehme, unangenehme und neutrale Bilder präsentiert, die bekanntlich stimmungsauslösend wirken können (IAPS; Lang, Bradley & Cuthbert, 1995). Hier zeigten sich größere ERN-Amplituden in Trials, bei denen durch die vorherige Präsentation eines positiven Bildes ein kurzfristiger positiver Affekt herbeigeführt worden war. In den Arbeiten von Hajcak, McDonald & Simons (2003, 2004) zeigte sich hingegen, dass Probanden mit längerfristig negativem Affekt deutlich größere ERN-Amplituden als Reaktion auf fehlerhaftes Verhalten aufwiesen, wohingegen sich bei positivem Affekt weniger deutliche Veränderungen in der Morphologie der ERN zeigten. Wiswede et al. (2009a) untersuchten die Auswirkungen von kurzfristig herbeigeführtem Affekt durch die Kopplung von IAPS-Bildern mit Stimuli eines Flanker Tests und fanden ähnlich den Ergebnissen von Hajcak et al. (2003, 2004) größere Amplituden bei negativen Stimuli. Eine Reduktion der ERN-Amplitude nach positiven Bildern wie bei Larson et al. (2006) konnte nicht beobachtet werden. Wiswede et al. (2009a) führten die große Amplitude auf eine verstärkte Aktivität im ACC zurück. In einem weiteren Experiment induzierten Wiswede, Münte & Rüsseler (2009c) positiven und negativen Affekt bei den Probanden, indem sie nach Fehlern entweder abwertendes oder aufbauendes Feedback boten. Abfälliges Feedback versetzte die Teilnehmer im Laufe des Experiments in einen negativen affektiven Zustand, was durch die mehrmalige Erhebung der Stimmung während des

Experiments sichergestellt wurde. Die ERN-Amplituden waren bei den Probanden, die das abfällige Feedback bekommen hatten, signifikant erhöht.

Basierend auf der Theorie des *embodying of emotion* (Niedenthal, 2007) gelang es Wiswede, Münte, Krämer & Rüsseler (2009b) Affekt zu induzieren, indem sie ihre Probanden ein Esstübchen quer in den Mund nehmen ließen, so dass ein grinsender Gesichtsausdruck entstand. Der Theorie zufolge erleben wir zuerst eine Emotion, und in einem zweiten Schritt werden die dazugehörigen Gesichtsmuskeln aktiviert. Der umgekehrte Weg nennt sich "*embodying of emotion*" und funktioniert vermutlich dadurch, dass die Aktivierung von Mustern in einem System (Gesichtsmuskeln) auch zu Aktivierung desselben Musters in anderen Systemen führt (Emotion). In der „smile“-Bedingung zeigten sich kleinere ERN-Amplituden, die vermutlich durch den positiven Affekt und die daraus entstehende erhöhte dopaminerge Aktivität vermittelt waren. Auch Luu et al. (2000b) beschäftigten sich mit der Frage, inwiefern emotionale und motivationale Faktoren exekutive Funktionen wie Fehlermonitoring beeinflussen. Sie erhoben bei ihren Probanden bestimmte Persönlichkeitsdimensionen sowie deren momentane Stimmung. Die Autoren gingen davon aus, dass Probanden mit hohen Werten bei negativem Affekt und bei längerfristiger negativer Emotionalität größere ERN-Amplituden aufweisen sollten, als solche mit positivem Affekt und positiver Emotionalität. Die Ergebnisse bestätigten die Hypothese, wobei kurzzeitiger negativer Affekt stärkere Effekte hervorbrachte als negative Emotionalität.

#### 1.8.5. ERN und sozialer Stress

Nicht nur positiver oder negativer kurzfristiger Affekt, sondern auch sozialer Druck kann Informationsverarbeitung und Reaktionen auf Fehler modulieren und dadurch eine Veränderung der ERN-Amplituden bewirken. Die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrindenachse (HPA-Achse; Dickerson & Kemeny, 2004), deren Endstrecke die Freisetzung von Kortisol ist und die maßgeblich an der Stressreaktion beteiligt ist, kann durch psychologische Faktoren beeinflusst werden. In den Anfängen der Forschung nahm man an, die Kortisolreaktion sei nicht spezifisch und trete in Stresssituationen jedweder Art stets gleichförmig auf (Selye, 1956). Später erwog man, dass nur extreme Stimuli eine Reaktion hervorrufen. Inzwischen ist bekannt, dass verschiedene Stressoren nicht in gleicher Weise Reaktionen erzeugen und die Ausschüttung von Stresshormonen stressorenspezifisch erfolgt (Weiner,

1992). Laut Lazarus (1999) wird nur Kortisol ausgeschüttet, wenn in einer Situation etwas auf dem Spiel steht, das für den Betroffenen von großem Wert ist, oder ein verfolgtes Ziel durch eine Bedrohung nicht erreicht werden kann. Auch nicht-vitale Bedrohungen wie eine Gefährdung des sozialen Selbst können die Ausschüttung von Kortisol zur Folge haben (Dickerson, Gruenewald & Kemeny, 2004). Das soziale Selbst basiert hauptsächlich auf der Wahrnehmung durch andere und deren soziale Bewertung (Gilbert, 1997), eine Bedrohung desselben entsteht am ehesten durch sozial-evaluative Situationen. Hierbei handelt es sich um Situationen, bei denen die Möglichkeit einer negativen Bewertung wichtiger Aspekte der Persönlichkeit des Individuums besteht, z.B. bei der öffentlichen Präsentation von Fähigkeiten, die sein soziales Selbst definieren. Bei Versagen in der Aufgabe ist das soziale Selbst bedroht und es besteht die Möglichkeit der sozialen Ablehnung oder Ausgrenzung, die bei Menschen wie bei Tieren hohe Kortisolspiegel hervorrufen kann (Stroud, Tanofsky-Kraff, Wilfley & Salovey, 2000). In einer Aufgabe zu versagen, die eine gewisse Intelligenz erfordert, stellt in der heutigen Zeit eine potente Bedrohung des sozialen Selbst dar. Eine sozial-evaluative Situation kann durch freies Sprechen oder Rechnen gut unter artifiziellen Bedingungen im experimentellen Setting erzeugt werden und dient in zahlreichen Experimenten zur Erzeugung sozialen Drucks.

Dass die Bewertung durch andere Personen sozialen Stress und die dazugehörigen körperlichen Reaktionen hervorrufen kann, zeigten Dickerson & Kemeny (2004) in einer Meta-analyse von 208 Studien über den Zusammenhang zwischen akuten Stressoren und der Ausschüttung von Cortisol. Sie fanden heraus, dass von allen Stressoren eine sozial-evaluative Situation und als weiterer Faktor die Unkontrollierbarkeit der auszuführenden Aufgabe die höchste Ausschüttung von Cortisol zur Folge haben. Der deutlichste Effekt zeigte sich bei einer Kombination der beiden Stressoren.

Cavanagh & Allen (2008) untersuchten die Auswirkung von Stress auf die kognitive Leistungsfähigkeit, indem sie als entsprechendes Maß die ERN und Pe als Reaktionen auf Fehler in einem Flanker Test benutzten. Zuerst wurde in einem neutralen Durchlauf des Flanker Tests eine Baseline-Messung der ERN-Potentiale erhoben und eine Speichelprobe für die Messung des Kortisolspiegels entnommen. Die Probanden führten einen Intelligenztest und einen Rechentest durch, während dessen Bearbeitung eine Kamera vor ihnen platziert wurde. Die restlichen Fragebögen wurden dem Probanden vom Versuchsleiter vor der vereinbarten Zeit

weggenommen und Überraschung darüber geäußert, dass sie noch nicht fertig ausgefüllt waren. Dies geschah, um eine unkontrollierbare Situation zu schaffen, in der der Proband zusätzlich durch die Kamera sozialer Bewertung und potentiell öffentlichem Versagen ausgesetzt sein sollte. Die Versuchsteilnehmer konnten ihre eigene Leistung in dem Mathematiktest als Perzentile in einem Diagramm am Bildschirm sehen und wurden in den Pausen von den Versuchsleitern nach standardisiertem Schema zu besserer Leistung angehalten. Die ERN-Amplituden aus der Baseline-Messung konnten bei Probanden, die hoch sensibel gegenüber Bestrafung waren und hohe Werte auf der BIS-Skala (Carver & White, 1994) aufwiesen, die späteren ERN-Amplituden unter sozialem Druck vorhersagen. Die ERN im Mathematiktest war bei negativem Affekt kleiner als bei der Baseline-Messung. Probanden mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Bestrafung hatten nach Fehlerfeedback Defizite in ihrer Leistung. Diese Resultate zeigen, dass Probanden mit verschiedenen Ausprägungen von Persönlichkeitsmerkmalen unterschiedliche motivationale und affektive Reaktionen auf eine sozial evaluative Bedrohung aufweisen.

Hajcak et al. (2005b) versuchten ebenfalls herauszufinden, wie soziale Situationen Fehlerverarbeitung beeinflussen. Sie manipulierten den Wert von Fehlern auf zweierlei Arten. Im ersten Experiment gab es monetäre Gewinne bzw. Verluste, im zweiten Experiment wurde die Leistung der Versuchsteilnehmer während der Aufgabe bewertet. Die Probanden wurden vor Beginn des Experiments darüber aufgeklärt, dass ihre Leistung während des Experiments ununterbrochen vom Versuchsleiter beobachtet und hernach mit der Leistung anderer Probanden im selben Experiment verglichen werden würde. Hiermit wurde versucht, den Fehlern einen monetären bzw. sozialen Wert zuzuschreiben. In den Experimenten waren die ERN-Amplituden nach Fehlern in Bedingungen mit hohem monetären Wert bzw. sozialem Feedback höher als bei niedrigem monetären Wert und neutralem Feedback. Dies zeigt, dass soziale Faktoren wie die Erwartung einer Evaluation und der anstehende Vergleich der eigenen Performance mit der Leistung anderer Probanden Einfluss auf die Fehlerverarbeitung haben können. Geschwindigkeit und Genauigkeit unterschieden sich nicht in der Kontrollbedingung ohne sozialen Stimulus, so dass die Autoren davon ausgingen, die ERN sei nicht durch die Variation von Strategien oder Vergleichsprozessen hervorgerufen, sondern durch motivationale, möglicherweise emotionale Faktoren.

### 1.8.6. Facial Feedback

In den meisten bisherigen Studien zur ERN wurden abstrakte Cues als Feedback benutzt, wie z.B. 0 oder X (Holroyd et al., 2006; Miltner et al., 1997) oder andere Zeichen, deren Bedeutung bezüglich des Outcomes vor Beginn des Experiments oder währenddessen noch erlernt werden muss. Andere häufig verwendete Cues wie + und – sind bekannte Zeichen, deren Valenz als Information im Zeichen selbst schon enthalten ist (Holroyd et al., 2006; Hajcak et al., 2007). Ähnlich funktionieren eingeblendete Wörter wie „correct“ und „incorrect“ (Kobza et al., 2011). In Studien, in denen Motivation mit monetären Anreizen evoziert wird, wird oft die Summe des verlorenen oder gewonnenen Geldes präsentiert (Wu & Zhou, 2009).

Eine soziale oder sozial evaluative Situation kann wie in den Experimenten von Cavanagh & Allen (2008), Hajcak et al. (2005b) oder Wiswede (2009c) durch Interaktion mit einem Versuchsleiter erzeugt werden. Alternativ dazu wird im vorliegenden Experiment versucht, durch Präsentation von Feedback in Form von realen Gesichterstimuli auf dem PC-Bildschirm eine soziale bzw. sozial evaluative Situation zu generieren.

Laut den Grundaussagen der Emotionsforschung können Basisemotionen universell und kulturübergreifend dekodiert werden. Der Emotionsausdruck entsteht aus spezifischen Muskelkonfigurationen (Ekman and Friesen, 1971), die „bottom-up“ entschlüsselt werden können (Nakamura, Buck & Kenny, 1990). Diese Theorie existiert seit dem späten 19. Jahrhundert und galt lange Zeit als allgemeingültig (Hassin, Aviezer & Bentin, 2013). Inzwischen gibt es alternative Ansätze, die die Rolle des Kontexts mit einbeziehen. Diesen Theorien zufolge gibt es keine strikte Zuordnung eines Gesichtsausdrucks zu einer Emotion, da abhängig vom Kontext ein Gesichtsausdruck verschiedene Emotionen widerspiegeln kann (Aviezer, Hassin, Bentin & Trope, 2008). Der Kontext kann durch die Präsenz anderer Menschen entstehen (Masuda, Ellsworth, Mesquita, Leu, Tanida & Van de Veerdonk, 2008) oder durch nicht-menschliche Stimuli (Righart & de Gelder, 2008). Auch der Körper, der zum betrachteten Gesicht gehört, und seine Körpersprache sind wichtige Faktoren (Hassin et al., 2013). Über den genauen Ablauf der Gesichtererkennung gibt es verschiedene Theorien. Manche Autoren nehmen an, die einzelnen Teile werden nacheinander und unabhängig voneinander verarbeitet und am Ende zu einem Ganzen zusammengesetzt (Farah, Wilson, Drain & Tanaka, 1998). Laut anderen Autoren wird ein Gesicht im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes von

vornherein als Ganzes wahrgenommen. Da das Ganze dieser Theorie zufolge mehr ist als die Summe seiner Teile, kann aus dem Gesicht mehr Information entnommen werden als aus den einzelnen Teilen (Richler, Cheung & Gauthier, 2011). Man nimmt an, dass Identität und Emotionsausdruck des Gesichts getrennt verarbeitet werden, wobei im zeitlichen Ablauf zuerst Emotion verarbeitet wird und dann die Identität (Haxby, Hoffman & Gobbini, 2000). Zheng, Mondloch & Segalowitz (2012) untersuchten den zeitlichen Ablauf elektrophysiologischer Parameter bei der individuellen Gesichtererkennung. Laut den Autoren involviert die Unterscheidung von gesichtsähnlichen Stimuli und richtigen Gesichtern verschiedene Hirnareale wie den Gyrus fusiformis, den inferioren occipitalen Gyrus und den Sulcus temporalis superior. Auch laut einer fMRT-Studie von Kanwisher, McDermott & Chun (1997) reagiert der fusiforme Cortex selektiv auf Gesichtsstimuli. In einer weiteren fMRT-Studie zur Gesichterwahrnehmung in Abhängigkeit von der sexuellen Präferenz fand Ishai (2007) Aktivität im visuellen Cortex, im limbischen System und bei attraktiven Gesichtern vor allem im mediodorsalen Nucleus des Thalamus und medialen orbitofrontalen Cortex. Im präfrontalen Cortex werden Identität und variable Faktoren wie Blickrichtung und Gesichtsausdruck separat verarbeitet (Hoffman & Haxby, 2000), im Belohnungssystem findet die Verarbeitung von Attraktivität statt (O'Doherty, Winston, Critchley, Perrett, Burt & Dolan, 2003). Laut Vuilleumier & Pourtois (2007) spielen Amygdala, Insula und ventraler präfrontaler Cortex bei der Verarbeitung eine Rolle. Die einzelnen Bestandteile des verteilten Netzwerks zur Gesichtererkennung funktionieren dabei nicht getrennt voneinander, sondern wirken zusammen und beeinflussen einander gegenseitig.

Der zeitliche Ablauf der Gesichtererkennung ist wie die neuroanatomische Lokalisation aufgeteilt. Für verschiedene Emotionen existieren verschiedene Zeitverläufe der elektrophysiologischen Parameter nach Präsentation eines Stimulus. Weit verbreitet ist die Auffassung, dass sich ungefähr 150–200 ms nach Stimulus-Onset Aktivität zeigt, die mit der Verarbeitung des Stimulus in Verbindung gebracht wird. Dies schlägt sich in der gesichtsselektiven N170 im occipito-temporal abgeleiteten EEG nieder (Bentin, Allison, Puce, Perez & McCarthy, 1996). Bei intrakranieller Ableitung kann zusätzlich eine N200 im inferioren lateralen temporalen Cortex gesehen werden (McCarthy, Puce, Belger & Allison, 1999). Spätere Potentiale, die mehr als 400 ms nach Stimulus-Onset intrakraniell abgeleitet werden, stammen aus dem limbischen System, vor allem aus der Amygdala (Morris, Frith,

Perrett, Rowland, Young & Calder, 1996). Die Amygdala steht besonders mit der Verarbeitung von Gesichtsstimuli in Verbindung, die einen ängstlichen Ausdruck zeigen (Vuilleumier, Richardson, Armony, Driver & Dolan, 2004).

Bisher gibt es nur wenige Studien zur ERN, die Gesichtsstimuli als Feedbackreize benutzen (Pfabigan, Alexopoulos, Bauer, Lamm & Sailer, 2011; Zhang, Li, Qian & Zhou, 2012; Schreiner, 2009). Ziel unserer Studie war es, eine sozial-evaluative Situation zu erzeugen, ohne dabei durch Präsentation eines realen Menschen als Bewerter sozialen Druck aufzubauen, der eine Cortisolreaktion zur Folge haben würde: Wir wollten Verhalten in einer sozialen Situation ohne eine Stresskomponente betrachten.

In einem derartigen experimentellen Setting sind gewisse Vor- und Nachteile zu bedenken. Selbst bei vorgegebenem standardisiertem Text und Verhalten eines Versuchsleiters muss immer berücksichtigt werden, dass individuelle Unterschiede in der Wahrnehmung der Versuchsleiter durch die Probanden bestehen müssen. Sozialpsychologische Effekte von Attraktivität und Geschlecht sind in einem solchen Setting nicht zu kontrollieren und können sich störend auf die Effekte auswirken. Wie in der realen Situation können sich allerdings auch bei Präsentation von Bildern Geschlechtseffekte ergeben. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die bloße Präsentation von Fotos realer Personen nicht ausreicht, um eine sozial-evaluative Situation zu erzeugen. Dennoch besteht im Gegensatz zur realen Situation bei Präsentation von Bildern am PC der Vorteil der besseren Standardisierung und der Wegfall sozialen Drucks.

Fehlermonitoring ist eine menschliche Basisfunktion, die durch Detektion von Inkongruenzen zwischen unseren Absichten und Handlungen Informationen liefert, die wichtig für unsere Verhaltensanpassung ist. Nicht alle Menschen tun dies in ähnlicher Weise. Manche sind besser im Vermeiden eines Fehlers, andere lassen sich durch das Auftreten eines Fehlers eher stören als andere. Diese Unterschiede werden von Facetten unserer Persönlichkeit in hohem Maße beeinflusst. In unserer Studie zum Fehlermonitoring sollen die Zusammenhänge zwischen Fehlerverarbeitung und Persönlichkeit in Abhängigkeit von sozialem Feedback hervortreten. Die kognitive und emotionale Verarbeitung von Fehlern in sozialem Kontext und die Interaktion mit Persönlichkeitsmerkmalen ist unseres Wissens bis jetzt noch nicht in dieser Form untersucht worden.

## 2. Fragestellung und Hypothesen

Seit mehr als 20 Jahren werden die Fehlerpotentiale der ERN/Ne und der Pe intensiv beforscht. Inzwischen hat man herausgefunden, dass verschiedene emotionale und motivationale sowie Persönlichkeitsfaktoren Einfluss auf die ereigniskorrelierten Potentiale haben. Soziale Faktoren wurden hierbei ebenfalls zum Teil bereits berücksichtigt. Während bereits in einigen Studien mit Versuchen gearbeitet wurde, in denen eine soziale Situation durch die Interaktion eines Probanden mit einem Versuchsleiter erzeugt wurde (z.B. Cavanagh & Allen, 2008), ist der Einsatz von emotionalen Gesichtern zur Schaffung einer standardisierten sozial evaluativen Situation bisher wenig verbreitet.

Ziel dieser Studie ist die Beleuchtung des Zusammenhangs zwischen Auftreten und Morphologie der ERN und der sozialen Situation während der Versuchsdurchführung. Durch die Präsentation von Gesichtern mit verschiedenen Gesichtsausdrücken als Feedback-Stimuli wird im Labor kurzfristig eine sozial-evaluative Situation generiert (Dickerson & Kemeny, 2004; Hajcak et al., 2005b). Durch die Präsentation der sozialen Stimuli als Fotos erreichen wir einen höheren Grad der Standardisierung als in Experimenten mit realen Personen. In bisherigen Experimenten fanden sich größere ERN-Amplituden bei abfälligem verbalem Feedback (Wiswede et al., 2009c) und wenn Probanden wussten, dass sie während des Versuchs von realen Personen bewertet wurden (Hajcak et al., 2005b). Daher erwarten wir in der sozial evaluativen Situation größere ERN-Amplituden als in der Bedingung mit neutralem Feedback:

***H0a:*** Die Amplituden der ERN unterscheiden sich in einer Bedingung mit sozialen Feedbackreizen nicht von Amplituden der ERN unter neutralen Feedback-Bedingungen.

***H1a:*** Die Amplituden der ERN sind in einer Bedingung mit sozialen Feedbackreizen größer als Amplituden der ERN unter neutralen Feedback-Bedingungen.

Die Amplituden werden für die normale (*response-locked*) ERN und für die Feedback-ERN getrennt betrachtet:

**H0b:** Die Amplituden der FRN unterscheiden sich in einer Bedingung mit sozialen Feedbackreizen nicht von Amplituden der FRN unter neutralen Feedback-Bedingungen.

**H1b:** Die Amplituden der FRN sind in einer Bedingung mit sozialen Feedbackreizen größer als Amplituden der FRN unter neutralen Feedback-Bedingungen.

Weiterhin wird die Auswirkung der augenblicklichen Stimmung auf die ERN-Amplituden betrachtet. Aufgrund der Forschungsergebnisse zahlreicher Autoren konnte gezeigt werden, dass Affekt Fehlermonitoring im Sinne von größeren ERN-Amplituden bei negativem Affekt beeinflussen kann (Hajcak et al., 2003, 2004; Luu et al., 2000b). Dies zeigte sich unter anderem in Experimenten mit emotionalen Bildern (Wiswede et al., 2009a) und Manipulation von Gesichtsausdrücken (Wiswede et al., 2009b) und wird durch verstärkte Aktivität im ACC erklärt (Wiswede et al., 2009a). Auch nach Induktion negativer Stimmung durch abwertendes verbales Feedback konnte eine Zunahme der ERN-Amplituden beobachtet werden (Wiswede et al. 2009c). Wir gehen daher davon aus, dass auch in unserer Stichprobe bei Probanden mit schlechterer Stimmung größere ERN-Amplituden zu finden sind. Im Experiment wird die Stimmung der Probanden mit der *Positive and Negative Affect Schedule* erfasst (PANAS; Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A., 1988; deutsche Übersetzung: Krohne, Egloff, Kohlmann & Tausch, 1996). Hohe Scores bei den negativen PANAS-Items sollten demnach mit höheren ERN-Amplituden einhergehen:

**H0c:** Es besteht kein Zusammenhang zwischen den Amplituden der ERN und der durch die PANAS erhobenen Stimmung der Probanden während des Experiments.

**H1c:** Die Größe der ERN-Amplituden steht in positivem Zusammenhang mit dem Ausmaß der negativen Stimmung von Probanden gemessen durch die PANAS.

Zuletzt sollen die Auswirkungen von Persönlichkeitsvariablen und deren Interaktion mit sozialen Kontextreizen auf die Morphologie der ERN untersucht werden. In bisherigen Studien wurde gefunden, dass Personen mit hohen Scores im BIS (Boksem et al., 2006; Carver & White, 1994) vermittelt über *task engagement* höhere ERN-Amplituden nach Fehlern aufweisen als Personen mit niedrigeren Scores. Dasselbe gilt für Personen mit hohen Ausprägungen der

Persönlichkeitseigenschaften Verträglichkeit (Tops et al., 2006; Dikman & Allen, 2000). sowie Neurotizismus (Tops et al., 2006; Hajcak et al., 2005a; Pailing & Segalowitz, 2004; Tucker et al., 1999; Compton et al., 2010). Wir erwarten also bei Personen mit hohen BIS-Scores und ausgeprägter Verträglichkeit und Neurotizismus höhere ERN-Amplituden als bei Probanden mit niedrigen Scores:

**H0d:** *ERN-Amplituden nach Fehlern von Probanden mit hohen Scores bei Verträglichkeit/BIS/Neurotizismus unterscheiden sich nicht von denen mit niedrigen Scores.*

**H1d:** *ERN-Amplituden nach Fehlern von Probanden mit hohen Scores bei Verträglichkeit/BIS/Neurotizismus sind größer als die von denen mit niedrigen Scores.*

Die ERN-Amplituden sind bei Personen mit dem eben genannten Persönlichkeitsprofil nicht nur prinzipiell erhöht. Vielmehr scheinen auch die Auswirkungen von sozialem Stress, ähnlich wie motivationale Faktoren (Pailing & Segalowitz., 2004), bei Probanden mit extremen Werten auf spezifischen Persönlichkeitsskalen deutlicher als bei Probanden mit niedrigeren Punktwerten auszufallen (Vgl. Cavanagh & Allen, 2008), d.h. es gibt Hinweise auf eine Interaktion zwischen der Verarbeitung sozialer Hinweisreize oder Stressoren und bestimmten Personenparametern. Daher wird erwartet, dass die Präsentation von sozialem Feedback bei Personen mit dem eben genannten Persönlichkeitsprofil stärkere Auswirkungen auf die Amplituden der ERN hat als bei Werten im Normbereich:

**H0e:** *Die Veränderung der ERN-Amplituden in einer sozial-evaluativen Situation (im Vergleich zu einer neutralen Feedback-Situation) unterscheidet sich nicht zwischen Probanden mit hohen vs. niedrigen Punktwerten auf Skalen zu Verträglichkeit/BIS/Neurotizismus.*

**H1e:** *Die Veränderung der ERN-Amplituden in einer sozial-evaluativen Situation (im Vergleich zu einer neutralen Feedback-Situation) fällt bei Probanden mit hohen Punktwerten auf Skalen zu Verträglichkeit/BIS/Neurotizismus signifikant stärker aus als bei Probanden mit niedrigen Punktwerten auf den genannten Skalen.*

Unsere Hauptparameter in den Hypothesen und Analysen zum Fehlermonitoring im Zusammenhang mit sozialem Kontext und Persönlichkeitseigenschaften waren die Morphologien der ERN und FRN. Obwohl auch die Pe Gegenstand der Forschung zur Fehlerverarbeitung ist, konzentrierten wir uns auf eine hypothesengeleitete Auswertung bezüglich der ERN und FRN, während zur Pe explorative Analysen durchgeführt wurden. Auch bezüglich der Latenzen der Komponenten wurden keine gezielten Hypothesen formuliert.

## 3. Methoden

### 3.1. Variablen

#### 3.1.1. Abhängige Variablen

Die primäre abhängige Variable der vorliegenden Studie war die Amplitude der ERN-Potentiale im EEG. Die Potentialänderungen der ERN-Potentiale können bis zu 10  $\mu$ V betragen und erreichen 80 bis 100 Millisekunden nach einem Fehler ihr Maximum (Falkenstein et al., 1991; Gehring et al., 1993; Dehaene et al., 1994; Bernstein et al., 1995). Da auch die Feedback-gebundene ERN untersucht wurde, benutzten wir als zweite abhängige Variable die Amplitude der FRN entsprechend der Literatur (Gehring & Willoughby, 2002; Miltner et al., 1997) im Zeitraum von 250 bis 400 ms nach dem Feedbackreiz. Insgesamt wurden im aktuellen Experiment Potentiale von 100 ms vor der Reaktion bzw. dem Feedback-Stimulus bis 750 ms nach der Reaktion bzw. 850 ms nach dem Feedback-Stimulus berücksichtigt (vgl. 4.1).

#### 3.1.2. Unabhängige Variablen

Inhalt des Experiments ist die Auswirkung sozialer Stimuli auf das Fehlermonitoring. Die Art des gegebenen Feedbacks in den beiden experimentellen Bedingungen diente als unabhängige Variable: neutral vs. sozial (zweistufig). In der neutralen Bedingung wurde Feedback über den Ausgang eines Versuchsdurchganges in Form von abstrakten Zeichen (korrekt: „+“; Fehler: „-“; zu langsam: „!“) gegeben. In der sozialen Bedingung wurden als Feedback emotionale Gesichter auf dem Bildschirm präsentiert (vgl. 3.5).

Als weitere unabhängige Variable ging die Korrektheit der Reaktion für jeden Aufgabendurchgang in die Analysen ein. Hierbei handelte es sich um einen dreistufigen Faktor mit den Ausprägungen „korrekt“, „fehlerhaft“ und „zu langsam“.

Eine weitere unabhängige Variable war die Ausprägung verschiedener Persönlichkeitseigenschaften bei den Probanden. Da von Interesse ist, inwiefern Persönlichkeitseigenschaften die Fehlerverarbeitung beeinflussen, betrachteten wir die Scores der Skalen Verträglichkeit und Neurotizismus im NEO-Five Factor Inventory (NEO-FFI; Costa & McCrae, 1992), sowie die Scores im BIS (Boksem et al., 2006; Carver & White, 1994). Diese Variablen wurden für einen Teil der Analysen zweistufig in hohe und niedrige Werte eingeteilt (Mediansplit).

Als letzte unabhängige Variable diente die Stimmung der Probanden gemessen durch die PANAS (Watson et al., 1988). Auch hier wurde zum Teil mit einer Einteilung in zwei Stufen (hoch oder niedrig) gearbeitet, um herauszufinden, wie Affekt die Morphologie der ERN im Rahmen der experimentellen Manipulation beeinflusst.

### 3.2. Versuchsplan

Hinsichtlich der Untersuchung der Hauptfragestellung (Einfluss des sozialen Kontextes auf die Amplitude der ERN/FRN) wurde mit einem *Within-Groups Design* gearbeitet. Alle 56 Teilnehmer beider Geschlechter durchliefen beide experimentellen Bedingungen (soziales vs. neutrales Feedback). Jeder Proband absolvierte 4 Aufgabenblöcke zu je 200 Trials: 2 Blöcke zu je 200 Trials in der Experimentalbedingung und 2 Blöcke zu je 200 Trials in der neutralen Bedingung. Die Reihenfolge der Bedingungen war dabei ausbalanciert: Abwechselnd begannen die Probanden den Versuch entweder mit den Blöcken der Bedingung 1 (*neutral*) oder der Bedingung 2 (*face*). Zu Beginn erfolgte ein Übungsblock mit 40 Probetrials, der neben der Gewöhnung des Probanden an die Aufgabe auch zur Bestimmung der mittleren Reaktionszeit des Probanden diente. Vom Median der Reaktionsgeschwindigkeit bei korrekten Reaktionen (in Millisekunden; die ersten 10 Trials wurden für diese Berechnung verworfen) wurden 5% abgezogen und der neue Wert als Grenzwert benutzt, bei dessen Überschreitung eine Reaktion im Hauptversuch als zu langsam gewertet wurde. Eine schematische Übersicht des Versuchsplans bietet Abbildung 3:

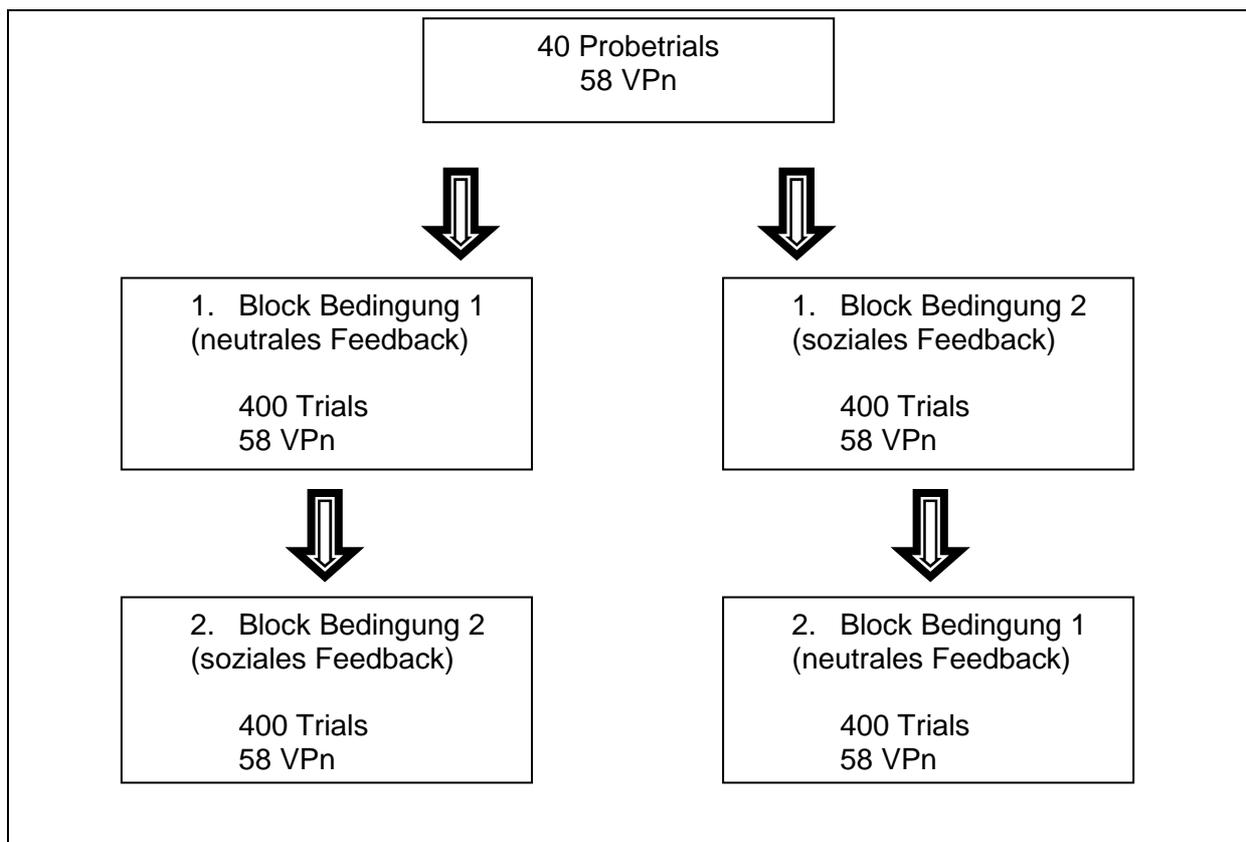


Abb. 3: Versuchsplan

### 3.3. Versuchsteilnehmer

Die Datenerhebung fand im Labor für Psychophysiologie und funktionelle Bildgebung an der Universitätsklinik Würzburg statt. Die Stichprobe bestand aus 56 gesunden Versuchspersonen (26 Frauen, 5 Linkshänder, kein umgelernter Linkshänder) im Alter zwischen 20 und 48 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 27.09 Jahren (Standardabweichung 4.866). Ein Teil der Probanden nahm unentgeltlich an der Untersuchung teil (Kollegen und Freunde der Versuchsleiterin), ein Teil wurde über Annoncen rekrutiert und erhielt für seine Teilnahme an der Studie eine Aufwandsentschädigung von 20 EUR. Die meisten Probanden waren Studenten und hatten demzufolge Abitur, lediglich 4 Probanden gaben als höchsten Schulabschluss einen Realschulabschluss an.

Einschlusskriterien waren die körperliche Gesundheit der Probanden, die Freiheit von neurologischen und psychiatrischen Vorerkrankungen, keine Einnahme von ZNS-wirksamen Medikamenten und eine ausreichend korrigierte Sehschärfe. Ein Proband wurde von der Auswertung ausgeschlossen, da er lediglich 5 Fehler gemacht hatte, was für eine zuverlässige Auswertung der ERN nicht genügte. Wegen technischer

Probleme während der EEG-Ableitung mussten insgesamt 18 Probanden aus der Analyse ausgeschlossen werden, so dass letztendlich die Datensätze von 40 Versuchspersonen verwertet werden konnten. Alle Versuchsteilnehmer wurden ausführlich über Ablauf und Methodik der Studie aufgeklärt und unterschrieben eine Einverständniserklärung sowohl für das Experiment am PC mit gleichzeitiger EEG-Ableitung als auch für die venöse Blutentnahme, die nach dem Experiment von der Versuchsleiterin bei jedem Probanden durchgeführt wurde und die zur Gewinnung genetischen Materials für eine weitere Studie diente, die in einer gesonderten Arbeit behandelt wird.

### 3.4. Versuchsablauf

Alle 56 Messungen wurden von derselben Versuchsleiterin durchgeführt. Zu Beginn des Experiments wurden die Probanden begrüßt und in groben Zügen über den Ablauf des Experiments informiert. Sie wurden dann gebeten, sich zu setzen und die Einverständniserklärung zu unterschreiben, die uns erlaubte, sowohl das Experiment incl. EEG als auch die Blutentnahme für eine genetische Studie mit Ihnen durchzuführen. Die Probanden wurden davon in Kenntnis gesetzt, dass sie das Experiment jederzeit abbrechen könnten. Dann erfolgte das Kleben der EEG-Elektroden, wofür ca. 30 bis 40 Minuten Zeit benötigt wurden. Während des Vermessens des Schädels und des Klebens der Elektroden wurden die Probanden bereits dazu aufgefordert, die ihnen vorliegenden demographischen und psychometrischen Fragebögen auszufüllen. Hierbei handelte es sich um die BIS/BAS-Skala (Carver & White, 1994), das NEO-Five Factor Inventory (NEO-FFI; Costa & McCrae, 1992) sowie die PANAS (Watson et al., 1988). Die momentane Stimmungslage gemessen durch die PANAS wurde hier zum 1. Mal erhoben und nach den beiden Versuchsblöcken wiederholt, um die Entwicklung der Stimmungsmaße beurteilen zu können. Nach dem Kleben der Elektroden wurde das EEG-Signal auf seine Qualität hin beurteilt (u.a. durch Überprüfung der Elektrodenwiderstände) und locker sitzende oder beschädigte Elektroden entfernt bzw. neu angebracht. Vor Beginn des Experiments wurde der Versuchsperson ihr eigenes EEG demonstriert und sie gebeten, sich etwas zu bewegen, so dass die Auswirkungen von Bewegungsartefakten offensichtlich wurden. Die Versuchsperson wurde dann instruiert, während des Experiments still zu sitzen, so dass ein möglichst artefaktfreies EEG produziert werden konnte. Während des Experiments saß die

Versuchsperson auf einem Schreibtischstuhl vor einem PC. Nach rechts und links war ein Sichtschutz angebracht und das Licht wurde gedimmt, so dass eine ungestörte Konzentration auf den Versuch ermöglicht wurde. Nach schriftlicher Instruktion am Bildschirm und ausführlicher mündlicher Instruktion mit der Möglichkeit, Fragen zu stellen, begann das Experiment mit einem Probedurchlauf aus 42 Probetrials. Die Probanden wurden darüber informiert, dass die Versuchsleiterin das EEG und die Leistung im Experiment durchgehend beobachten könne, und wurden instruiert, möglichst schnell und korrekt zu arbeiten. Zwischen Probetrials und Beginn des Experiments hatte die Versuchsperson die Möglichkeit, Fragen zu stellen, um letzte Unklarheiten zu beseitigen. Dann begann das Experiment mit dem ersten Durchlauf von 100 Trials. Bei ausbalancierter Reihenfolge begannen die Probanden abwechselnd entweder mit dem sozialen oder neutralen Feedback-Block. Nach 100 Trials erschien am Bildschirm die Information, dass nun eine Pause gemacht werden könne, sowie die Aufforderung, noch schneller und besser zu werden. Die Versuchsperson konnte durch Druck auf die Leertaste selbst bestimmen, wann sie das Experiment fortsetzen wollte. Nach weiteren 100 Trials war die erste Versuchsbedingung absolviert und die Versuchsperson wurde instruiert, ein weiteres Set von Fragebögen auszufüllen. Es handelte sich hierbei erneut um die PANAS (Watson et al., 1988) zur Beurteilung von Stimmungseffekten, zusätzlich wurden zwei Leistungstests mit den Probanden durchgeführt, deren Anforderungen sich von den Anforderungen der bisherigen Aufgabe stark unterschieden. Es handelte sich dabei um den Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest (MWT-B; Lehrl, 2005) sowie den Zahlenverbindungstest (ZVT; Oswald & Roth, 1979). Die beiden Leistungstests wurden in der Pause zwischen den beiden experimentellen Bedingungen durchgeführt, um die Versuchspersonen durch die völlig anderen Anforderungen vom ersten Teil des Versuchs zu distanzieren, so dass sie nach der Pause ohne Übertragungseffekte mit dem zweiten Teil und somit der jeweils noch fehlenden Versuchsbedingung beginnen konnten. Beim MWT-B erreichten die Pbn Werte von 25 bis 37 Punkten (Mittelwert 31,82  $\pm$  2,846). Die Ergebnisse für die vier Durchgänge des ZVT sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1

*Mittelwerte und Standardabweichungen ZVT in Sekunden*

Durchgang	1	2	3	4
MW	56,86	54,84	56,29	56,50
SD	6,969	12,304	8,223	8,288

*Anmerkung. MW= Mittelwert. SD=Standardabweichung*

Dann folgte der zweite Teil des Experiments mit der gleichen Anzahl von Trials und Blöcken sowie Pausen, deren Länge wieder selbst bestimmt werden konnte. Nach Abschluss des 2. Teils wurde zum letzten Mal der Stimmungsfragebogen PANAS (Watson et al., 1988) ausgefüllt und die EEG-Elektroden vom Kopf der Versuchsperson entfernt. Dann erfolgte die Aufklärung über das Ziel des Experiments sowie die Blutentnahme. Die Versuchspersonen, die über Annoncen rekrutiert worden waren, erhielten eine Aufwandsentschädigung von 20 EUR, dann war das Experiment beendet. Der genaue zeitliche Ablauf kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2

*Zeitlicher Ablauf des Experiments*

	Zeit in Minuten
1. Begrüßung und Unterschreiben der Einverständniserklärung	10
2. Kleben der Elektroden Fragebögen: BIS/BAS und NEO-FFI	30
3. PANAS 1	5
4. Flanker-Task/EEG: 2 Blöcke (Feedback-Bedingung 1)	30
5. PANAS 2	5
6. ZVT und MWT-B	10
7. Flanker-Task/EEG: 2 Blöcke (Feedback-Bedingung 2)	30
8. PANAS 3	5
9. Blutentnahme und Entfernung der Elektroden	10
10. Aufklärung und Verabschiedung	10

*Anmerkung. BIS/BAS=Behavioural Activation/Inhibition System (Carver & White, 1994), NEO-FFI=NEO-Five Factor Inventory (Costa & McCrae, 1992), PANAS=Positive and Negative Affect Schedule (Watson et al., 1988), ZVT=Zahlenverbindungstest (Oswald & Roth, 1979), MWT-B=Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest (Lehrl, 2005)*

### 3.4. EEG

Im Experiment wurde die Hirnaktivität mittels eines 21-Kanal-EEG gemessen. Das EEG misst die Aktivität zerebraler Neurone durch die Detektion von Spannungsschwankungen an der Schädeloberfläche. Die Verteilung der Hirnaktivität kann durch die Elektroden an den Ableitpunkten bestimmt werden. Die Bestimmung der Ableitpunkte und Platzierung der Elektroden erfolgte nach dem internationalen 10/20 System (Jasper, 1958). Hierzu wird der Schädel des Probanden vermessen (d.h. in 10 und 20% Abschnitte unterteilt) und vorerst 21 Elektroden frontal (F), temporal (T), parietal (P) und occipital (O) platziert. Es sind dies: Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, T3, T4, C3, C4, T5, T6, P3, P4, O1, O2, Fpz, Fz, Cz, Pz und Oz. Zum Herausfiltern von Artefakten durch Augenbewegungen wurden zusätzlich jeweils eine Elektrode lateral des rechten und linken Auges und eine dritte Elektrode unterhalb

des rechten Auges angebracht. Die Referenzelektrode wurde zwischen der Fz und Cz Elektrode platziert, die Erdungselektrode zwischen Fpz und Fz. Die maximale Impedanz lag bei 5 k $\Omega$ , die Datenfilterung erfolgte mit einem Bandpassfilter von 0,1 – 100 Hz. Nach der Impedanzprüfung und gegebenenfalls Korrektur der Elektroden, bei denen der Widerstand zu hoch war, wurde ein Ruhe-EEG geschrieben. Hierbei wurde den Probanden demonstriert, wie Bewegungsartefakte entstehen und sie wurden gebeten, solche möglichst zu vermeiden. Dann erfolgten die Aufgabeninstruktion, der Probedurchgang und anschließend das eigentliche Experiment. Während der EEG-Ableitung saßen die Probanden in einem abgedunkelten, ruhigen Raum ca. 120 cm von einem PC-Monitor entfernt.

### 3.5 Elektrodenposition

Da in verschiedenen Studien zur ERN und FRN die Potentiale an unterschiedlichen Ableitelektroden betrachtet wurden, war es nicht möglich, im Vorfeld bezüglich der Lokalisation genaue Hypothesen zu formulieren. Insgesamt sind die Ableitelektroden Fz, FCz, und Cz häufig untersuchte Ableitungsstellen für die von uns untersuchten EKPs. Da in anderen Untersuchungen ähnliche Elektrodenpositionen benutzt wurden, wurden die Amplituden der reaktionsgebundenen ERN an Position FCz (Aarts & Pourtois, 2010) und an Position Cz (Themanson, Rosen, Pontifex, Hillman & McAuley, 2012) betrachtet und die der Feedback-ERN an Fz, Cz (Holroyd & Coles, 2002) sowie FCz (Stürmer, Nigbur, Schacht & Sommer, 2011). Zur Beurteilung des Pe-Potentials wurde Elektrode Cz herangezogen, da das Pe-Maximum weiter posterior und zentraler lokalisiert ist (Aarts & Pourtois, 2010; Suárez-Pellicioni, Núñez-Peña & Colomé, 2013).

### 3.6 Eriksen Flanker Test

Als Paradigma diente ein modifizierter Flanker Task, der auf dem klassischen Eriksen Flanker Task (Eriksen & Eriksen, 1974) beruht. Der Ziel-Stimulus bestand aus Pfeilen, die horizontal und entweder kongruent (<<<<<) oder inkongruent (<<><<) angeordnet waren (Ridderinkhof, Band & Logan, 1999). Die 5 Pfeile wurden 150 ms lang auf dem Bildschirm präsentiert, wobei die Richtung ausschlaggebend war, in die der mittlere Pfeil zeigte. Auf die Richtung dieses Pfeils hatte der Proband innerhalb von 1000 ms mit einem entsprechenden Tastendruck (entweder nach rechts oder nach links) zu reagieren. Im darauffolgenden Intervall von 750 ms wurde

der Proband durch einen Feedbackstimulus darüber informiert, ob die Aufgabe richtig oder falsch ausgeführt wurde, oder ob er/sie zu langsam reagiert hatte. In der neutralen Versuchsbedingung wurde bei richtiger Reaktion ein Plus-Zeichen (+), bei falscher Reaktion ein Minus-Zeichen (-) und bei zu langsamer Reaktion ein Ausrufezeichen (!) präsentiert. In der experimentellen Bedingung wurde bei einer richtigen Reaktion ein lachendes/freundliches Gesicht, bei einer falschen Reaktion ein trauriges Gesicht und bei einer zu langsamen Reaktion ein neutrales Gesicht dargeboten. Dann folgte eine Pause von 1500 ms, nach der wiederum für 150 ms ein Flankerreiz präsentiert wurde. Die Bilder, die als Stimuli benutzt wurden, befinden sich in Abbildung 4 und 5, der genaue Ablauf mit positivem Feedback in neutraler und sozialer Bedingung als Beispiel ist Abbildung 6 zu entnehmen (für weibliche Stimuli).

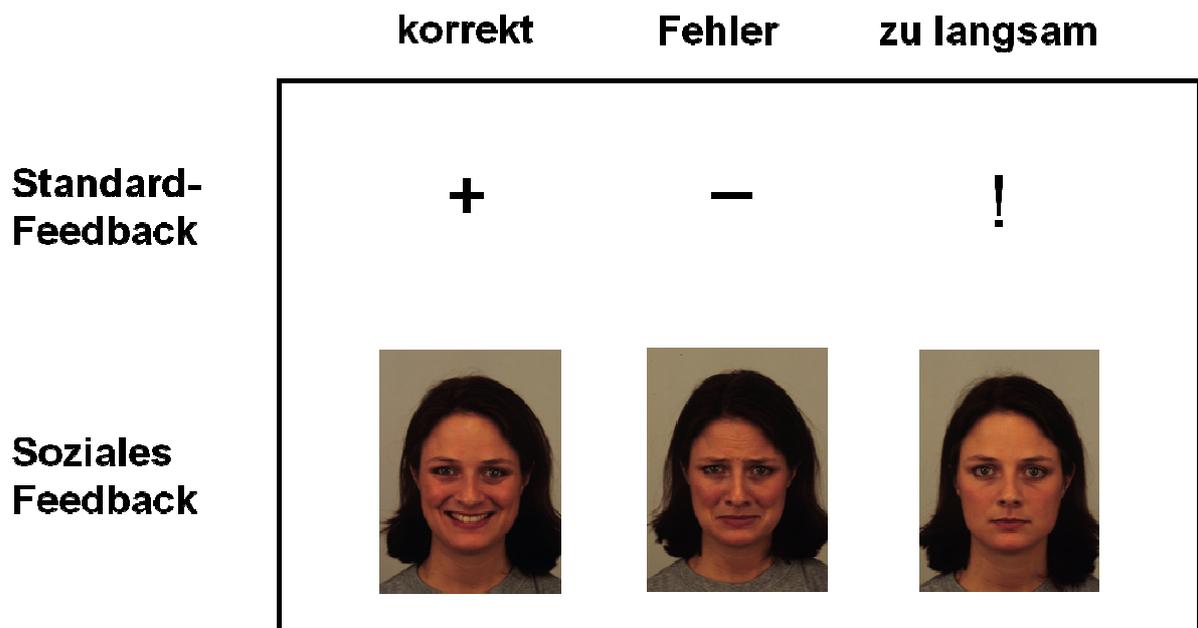


Abb. 4: Feedback-Stimuli weiblich

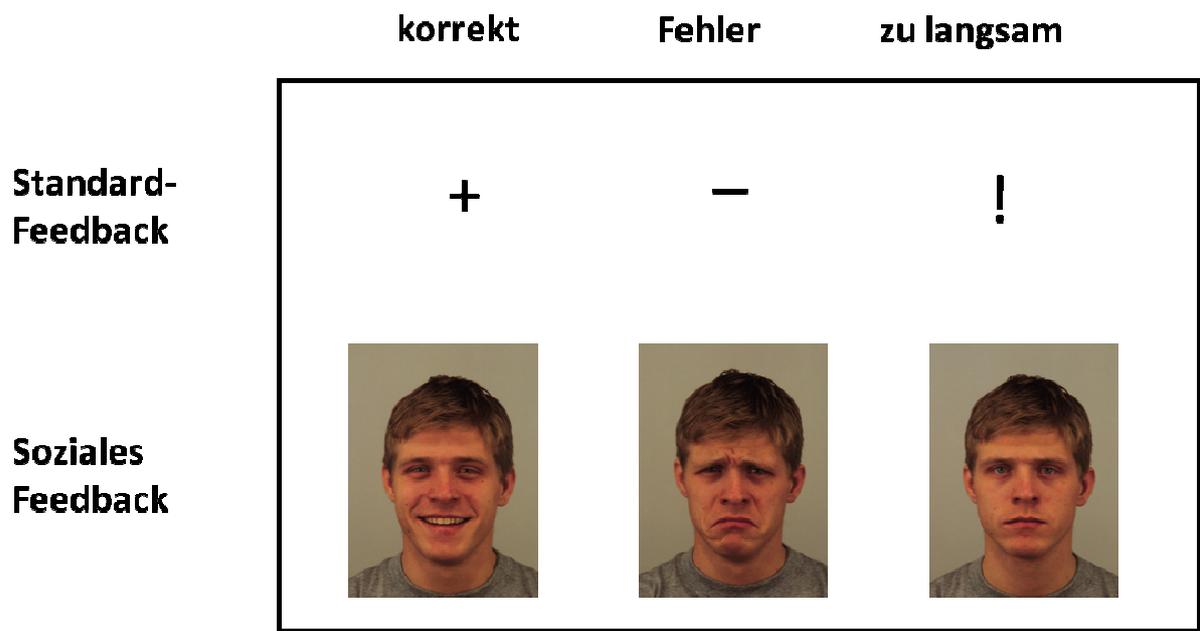


Abb. 5: Feedback-Stimuli männlich

Die genaue zeitliche Abfolge der einzelnen Stimuli in der sozialen Bedingung (Abb. 6) und in der neutralen Bedingung (Abb. 7) ist in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt:

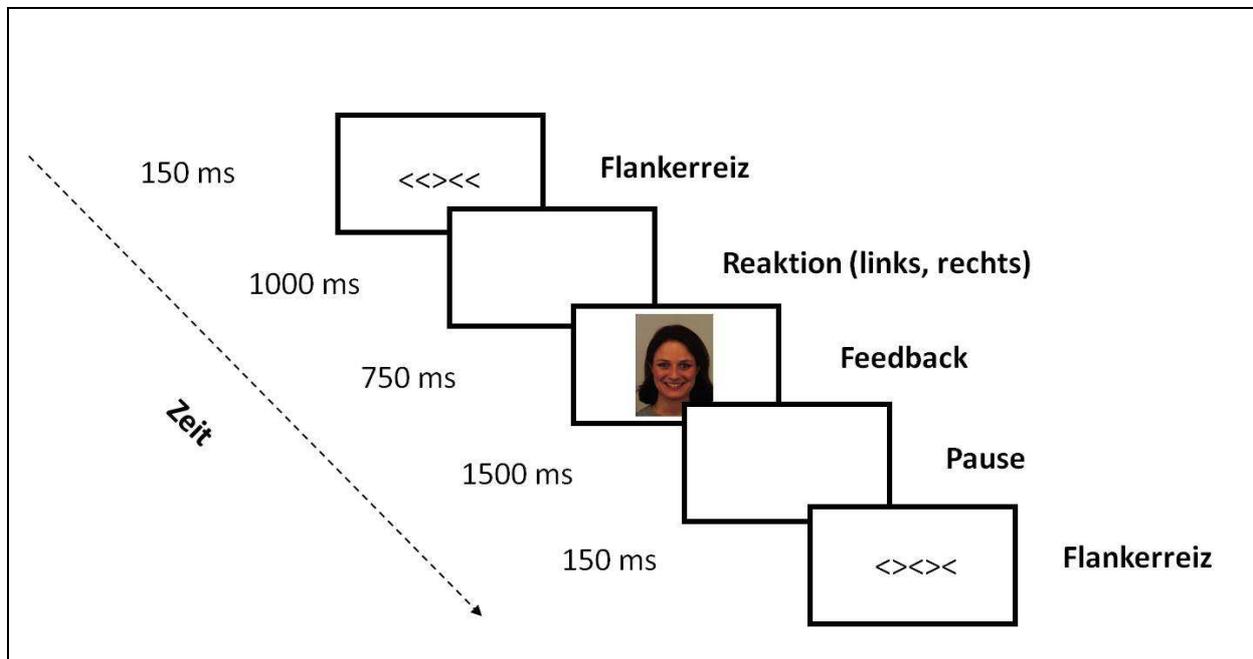


Abb. 6: Eriksen Flanker Test, soziales positives Feedback

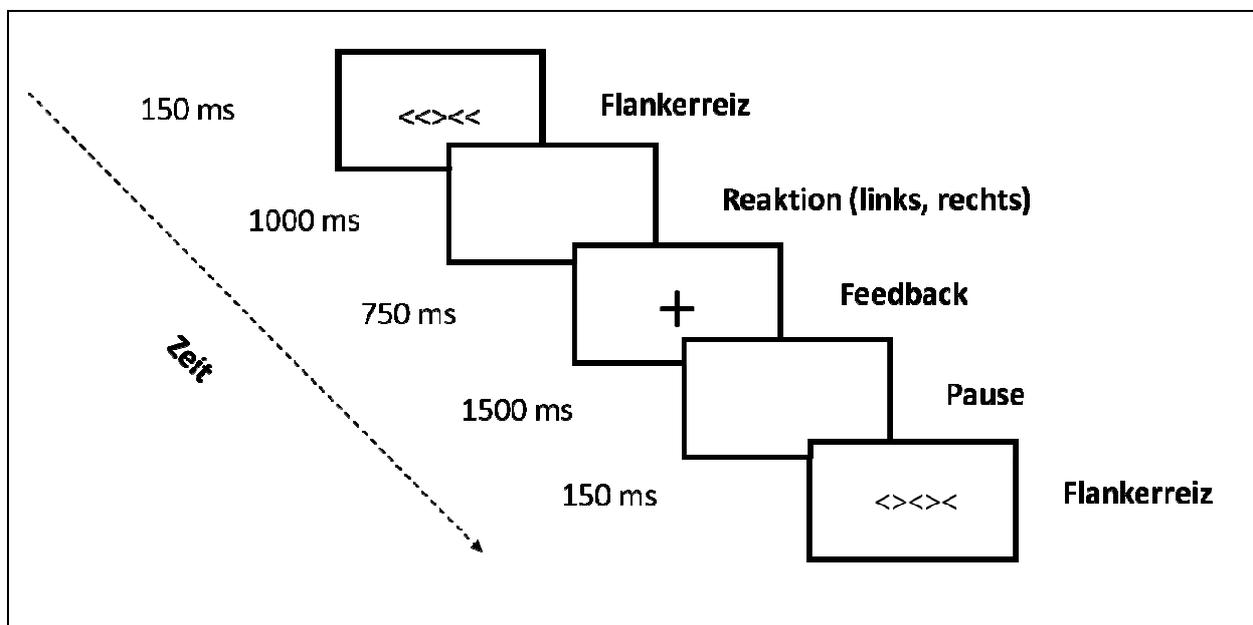


Abb. 7: Eriksen Flanker neutrales positives Feedback

Die Gesichterstimuli für die soziale Bedingung wurden dem Karolinska Directed Emotional Faces (KDEF) Katalog entnommen (Lundqvist, Flykt & Öhman, 1998). Es handelt sich dabei um eine Sammlung von 4900 Bildern, die Emotionsausdrücke menschlicher Gesichter zeigen. Die Sammlung wurde zu Forschungszwecken von

der Abteilung für klinische Neurowissenschaft des Karolinska Instituts in Schweden entwickelt. Alle Bilder wurden mit derselben Beleuchtung, den selben umgebenden Farben und begleitenden Faktoren sowie den gleichen Winkeln und Positionen aufgenommen, um eine standardisierte Sammlung von Stimuli zur Verwendung in experimentellen Settings mit Präsentation von Gesichtern zu erzeugen.

Wir wählten für unsere Zwecke die Fotos eines Mannes und einer Frau, die auf den Fotos einen freudigen vs. traurigen vs. neutralen Gesichtsausdruck zeigten. Den weiblichen Versuchspersonen wurde als Feedbackstimulus die Frau, den männlichen Versuchspersonen der Mann präsentiert. Wir versuchten dadurch, eventuelle Effekte gegengeschlechtlicher Attraktivität zu vermeiden, die die Effekte unserer eigenen experimentellen Manipulation stören könnten.

Dass sexuelle Attraktivität die Verarbeitung von Gesichtstimuli modulieren kann, zeigte Ishai (2007) in einer fMRT-Studie zur Gesichterwahrnehmung. 40 homo- und heterosexuellen Männern und Frauen wurden Fotos von Gesichtern präsentiert, deren Attraktivität beurteilt werden sollte. Die Autoren fanden einen Zusammenhang zwischen Geschlecht des Stimulus und sexueller Präferenz im mediodorsalen Nucleus des Thalamus und medialen orbitofrontalen Cortex, bei dem vor allem bei attraktiven Gesichtern viel Aktivierung zu sehen war. Heterosexuelle Männer und homosexuelle Frauen reagierten viel deutlicher auf Frauen und vice versa. Die Autoren schlossen daraus, dass sexuelle Präferenz die Aktivierung des Belohnungssystems bei der Gesichterwahrnehmung moduliert. Da wir davon ausgingen, dass der größte Anteil der Versuchspersonen heterosexuell ist, benutzten wir die gleichgeschlechtlichen Stimuli als soziale Feedbackreize, um eventuelle Interferenzen mit dem Belohnungssystem zu minimieren.

### 3.5. Erhebungsinstrumente

#### 3.5.1. Fragebogen für Probandendaten

Der zuerst ausgehändigte Fragebogen diente zur Erhebung demographischer Daten wie Alter, Geschlecht, Zahl absolvierter Schuljahre und höchster Schulabschluss. Da im Experiment mit rechter und linker Hand auf Stimuli reagiert werden sollte, erhoben wir auch die dominante Hand der Probanden (Rechts- oder Linkshänder) und ob ein Proband umgelernter Linkshänder war. Des Weiteren wurde nach der regelmäßigen Einnahme von Medikamenten sowie nach Nikotin-, Koffein- und Alkoholkonsum

gefragt. Auch die Menge und wann die Substanzen zuletzt eingenommen wurden, wurde erfasst.

### 3.5.2. Screening Fragebogen

Der Screening-Fragebogen wurde abteilungsintern erstellt und an das Screening-Instrument des Strukturierten Klinischen Interviews für DSM-IV (SKID; Wittchen, Zaudig & Fydrich, 1997) angelehnt. Es handelt sich um ein Verfahren zur Diagnostik psychischer Störungen nach dem Diagnosemanual DSM-IV. Der Fragebogen dient zur orientierenden Beurteilung, ob bei einem Probanden schwerwiegendere psychische Störungen vorliegen (siehe Anhang).

### 3.5.3. Positive and Negative Affect Schedule

(PANAS, Watson et al., 1988; deutsche Übersetzung: Krohne et al., 1996). Die Skala dient zur kurzen und einfachen Beurteilung von lang- und kurzfristigem positivem und negativem Affekt. Laut Watson et al. (1988) beschreibt positiver Affekt (PA) das Ausmaß, in welchem eine Person sich im betreffenden Zeitrahmen enthusiastisch, aktiv und wach fühlt. Hoher PA zeichnet sich durch Energie und Konzentrationsfähigkeit aus, wohingegen niedriger PA von Traurigkeit und Lethargie gezeichnet ist. Hoher negativer Affekt (NA) bedeutet subjektiv empfundenes Leid und geht mit vielerlei aversiven Gefühlen wie Ärger, Ekel, Schuld, Angst und Nervosität einher. Niedriger NA hingegen zeichnet sich durch Ruhe und Gelassenheit aus.

Die PANAS ist ein überschaubares Instrument mit wenigen Items, die möglichst stark auf dem einen (PA) und kaum auf dem anderen Faktor (NA) laden. Der Fragebogen wurde bezüglich verschiedener Zeitrahmen (von dem aktuellen Moment bis zum Zeitraum von einem Jahr) an großen Stichproben normiert. Die interne Konsistenz betrug für die englische Version .86 bis .90 für PA und .84 bis .87 für NA. Die Korrelationen zwischen NA und PA waren sehr niedrig. Die Retest-Reliabilität stieg mit der Länge des beurteilten Zeitraums und betrug .54 für PA und .45 für NA bezogen auf den aktuellen Moment und .63 für PA und .60 für das vergangene Jahr (Watson et al., 1988). Die PANAS ist bezüglich des kurzfristigen Affekts veränderungssensitiv und kann Stimmungswechsel (auch durch experimentelle Manipulation) abbilden, wohingegen sie bei den längeren Zeiträumen große Stabilität, ähnlich stabilen Persönlichkeitseigenschaften zeigt. Dies bestätigt die Auffassung, dass positiver und negativer Affekt als State Variablen mit den

dazugehörigen Trait Variablen (positive und negative Emotionalität) verknüpft sind. Zur Beurteilung der Validität wurde die Skala mit anderen gängigen Messinstrumenten ähnlicher Konstrukte korreliert. Es zeigten sich hohe Korrelationen mit der Hopkins Symptom Checklist (HSCL; Derogatis, Lipman, Rickels, Uhlenhuth & Covi, 1974), dem Beck Depression Inventory (BDI; Beck, Ward, Mendelson, Mock & Erbaugh, 1961), und dem State-Trait Anxiety Inventory State, Anxiety Scale (A-State; Spielberger, Gorsuch, & Lushene, 1970).

In der deutschen Version (Krohne, Egloff, Kohlmann & Tausch, 1996) müssen die Versuchspersonen beurteilen, inwiefern 20 verschiedene Attribute wie „freudig erregt“, „stolz“, „begeistert“ (für PA) und „verärgert“, „erschrocken“, „durcheinander“ (für NA) im Moment auf sie zutreffen. Antwortmöglichkeiten sind „ganz wenig oder gar nicht“, „ein bisschen“, „einigermaßen“, „erheblich“ und „äußerst“. Die interne Konsistenz beträgt ähnlich der englischen Version .85. Die Retest-Reliabilität für die Trait-Form beträgt .66 (PA) und .54 (NA). Die im Versuch benutzte Version ist eine modifizierte Version mit 25 Items. Die Bearbeitungszeit beträgt 3-4 Minuten (Hoyer & Margraf, 2004).

#### 3.5.4. Behavioural Activation/Inhibition System

(BIS/BAS; Carver & White, 1994, deutsche Version: Strobel, Beauducel, Debener & Brocke, 2001). Das Verhaltenshemmsystem (Behavioral Inhibition System, BIS) und das Verhaltensaktivierungssystem (Behavioral Activation System, BAS) beruhen auf der biopsychologischen Theorie von Gray (1981, 1987, 1989) und spielen eine wichtige Rolle bei Angststörungen und Verhaltenshemmung. Falls Bestrafung oder Wegnahme eines positiven Stimulus drohen, kommt es zu einer Aktivierung. Die BIS Aktivierung hat eine Verhaltenshemmung zur Folge und geht mit autonomer Erregung einher, die die Aufmerksamkeit des Individuums auf neue und bedrohende Reize lenkt. Dadurch kann Angst entstehen. Die dominierenden Verhaltensweisen beim BIS sind passives Vermeiden und Exstinktion von nicht adaptivem Verhalten. Als neuroanatomische Strukturen sind vor allem das septo-hippocampale System, sowie der ACC und der präfrontale Cortex involviert, dominierende Neurotransmitter sind Serotonin und Noradrenalin (Amelang, Bartussek, Stemmler & Hagemann, 2006). Das BAS hingegen reagiert auf Belohnung und Nichtbestrafung und führt ebenfalls zu einer Verhaltensaktivierung, die jedoch mit Annäherungsverhalten und mit positiven Emotionen assoziiert ist. Die beteiligten Strukturen sind die

Basalganglien sowie das ventrale und dorsale Striatum. Es existieren Verbindungen zum präfrontalen Cortex und dopaminvermittelt zum mesolimbischen System. Eine direkte Operationalisierung geschah durch die BIS/BAS Scales von Carver und White (1994), die in unserem Experiment als Erhebungsinstrument dienten:

Die Skala von (1994) und White beinhaltet vier Skalen (BIS, *BAS Fun Seeking*, *BAS Drive* und *BAS Reward Responsiveness*). Die englische Version zeigt eine interne Konsistenz mit Cronbach's Alpha von .74 für BIS, .73 für *BAS reward responsiveness*, .76 für *BAS drive* und .66 für *BAS Fun seeking*. Die Retest Reliabilität nach 8 Wochen betrug .66 für BIS, .66 für *Drive*, .59 für *Reward responsiveness* und .69 für *Fun seeking*. Die deutsche Version von Strobel et al. (2001), die im Experiment benutzt wird, enthält 24 Items in Form von kurzen Aussagen wie z.B. „ich handle oft so, wie es mir gerade in den Sinn kommt“ oder „Ich habe Angst, Fehler zu machen“. Das Zutreffen der Items müssen die Probanden auf einer Skala von „trifft gar nicht zu“, „trifft eher nicht zu“, „trifft eher zu“ bis „trifft genau zu“ beurteilen. Laut Strobel et al. (2001) ist auch die deutsche Version von zufriedenstellender Reliabilität und Validität.

### 3.5.5. Sensitivity of Punishment and Sensitivity of Reward Questionnaire

(SPSRQ, Torrubia, R., Avila, C., Molto, J. & Caseras (2001). Ähnlich wie die BIS/BAS Skalen von Carver & White (1994) basiert die Skala auf der biopsychologischen Theorie von Gray (1981, s.o.). Diese Theorie beinhaltet die beiden entgegengesetzten Systeme BIS und BAS, von denen eines Verhalten hemmt, das mit Bestrafung in Verbindung steht, und eines Verhalten aktiviert, das zu Verstärkung führen kann. Die beiden Systeme, denen bestimmte neuroanatomische Strukturen und Transmitter zugeordnet sind, sind weiter oben genauer beschrieben. Ursprünglich entwickelten Torrubia & Tobeña (1984) zur Erfassung der Ausprägung der beiden Systeme ein Instrument namens *Susceptibility to Punishment scale*. Zum gleichen Zweck folgten später die Skalen von Carver & White (1994, s.o.). Trotz ständiger Weiterentwicklung waren Torrubia et al. (2001) der Meinung, die bisherigen Skalen bildeten das BIS/BAS System nicht erschöpfend ab, so dass der neue Fragebogen entwickelt wurde. Dieser besteht aus zwei Subskalen: Sensitivity to Punishment (SP) und Sensitivity to Reward (SR). Die SP-Subskala ist die modifizierte ursprüngliche *Susceptibility to Punishment scale* (Torrubia & Tobeña, 1984). Die Skalen enthalten jeweils 24 Items, die aus kurzen Sätzen bestehen, deren

Zutreffen die Versuchsperson dichotom mit Ja oder Nein beantworten muss. In der Reihenfolge wechseln sich SR und SP Items ab. Der Fragebogen wurde in seiner katalanischen Version an einer katalanischen Stichprobe getestet (Torrubia et al., 2001). Für die Skala SP zeigten sich interne Konsistenzen von .83 für Männer und .82 für Frauen. Für die SR-Skala betragen die internen Konsistenzen .78 für Männer und .75 für Frauen. Die Retest-Reliabilität nach 3 Monaten betrug bei Männern .89 und .87 bei Frauen. Nach einem Jahr waren die Werte .74 und .69 und nach 3 Jahren zeigte sich noch eine Korrelation von .57 bei Männern und .61 bei Frauen. Auch die Validität wurde umfassend durch Korrelation mit anderen gängigen Fragebögen und Persönlichkeitsinventaren überprüft. Für die SP-Skala zeigte sich eine positive Korrelation zu Neurotizismus und eine negative zu Extraversion gemessen durch die spanische Version des Eysenck Personality Questionnaire (EPQ; Eysenck & Eysenck 1975; spanische Version: Eysenck, Garcia-Sevilla, Torrubia, Ávila & Ortet, 1992) sowie eine positive Korrelation mit der spanischen Version des STAI-T (Seisdedos, 1982). Die SR-Skala zeigte sich positiv korreliert mit Extraversion und Neurotizismus (Eysenck et al., 1992).

### 3.5.6. NEO-Fünf-Faktoren-Inventar

(NEO-FFI; Costa & McCrae, 1992; deutsche Version: Borkenau & Ostendorf, 1993). Der NEO-FFI ist die Kurzversion des ursprünglich aus 240 Items bestehenden Revised NEO-Personality Inventory (NEO-PI-R; Costa & McCrae, 1992). Das Inventar enthielt als Skalen erst nur Neurotizismus und Extraversion und wurde wenig später um Offenheit für Erfahrungen erweitert. Da dies laut den Autoren selbst noch nicht genügend Aspekte einer Persönlichkeit abbilden konnte, wurden weiterhin die Faktoren Verträglichkeit und Gewissenhaftigkeit hinzugefügt (Costa & McCrae, 2008). Es handelt sich bei dem Inventar und seiner kürzeren Version um bedeutsame Messinstrumente der Persönlichkeitsforschung. Die Ausprägung der 5 Persönlichkeitsfaktoren wird im NEO-FFI mittels 60 Items erfasst. Die Items bestehen aus 12 kurzen Sätzen pro Faktor, deren Richtigkeit von den Versuchspersonen beurteilt werden muss. Die abgestuften Aussagen zur Korrektheit der einzelnen Items sind „starke Ablehnung“, „Ablehnung“, „neutral“, „Zustimmung“, „starke Zustimmung“. Die internen Konsistenzen der einzelnen Faktoren betragen laut Costa & McCrae (1992) .79 (Neurotizismus), .79 (Extraversion), .80 (Offenheit), .75 (Verträglichkeit) und .83 (Gewissenhaftigkeit). Die Retest-Reliabilität betrug .83

(Neurotizismus), .82 (Extraversion), .83 (Offenheit), .63 (Verträglichkeit) und .79 (Gewissenhaftigkeit). In einer kürzlich durchgeführten iranischen Studie mit College-Studenten fanden die Autoren (Anisi, Majdiyan, Joshanloo & Ghoharikamel, 2011) interne Konsistenzen von .83 für Gewissenhaftigkeit und .80 für Neurotizismus sowie .60 für Verträglichkeit und .58 für Extraversion. Die interne Konsistenz für den Faktor Offenheit für Erfahrungen betrug lediglich .39. Bezüglich der Validität fanden sie Korrelationen von .68 zwischen Neurotizismus gemessen durch den NEO-FFI und gemessen durch das Eysenck Personality Inventory für Erwachsene (Eysenck & Eysenck, 1975). Die Korrelation für Extraversion gemessen durch die beiden Inventare betrug .47.

### 3.5.7. Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest

(MWT-B; Lehrl. Balingen: Spitta Verlag, 2005). Der MWT-B dient der Erfassung der allgemeinen, kristallinen Intelligenz. Bei jedem der 37 Items werden dem Probanden fünf Wörter präsentiert, von denen er dasjenige ankreuzen soll, welches ihm am ehesten bekannt vorkommt, bzw. welches seiner Meinung nach am ehesten ein Wort darstellt. Die 4 Distraktoren sind Neologismen. Mit fortlaufendem Test steigt der Schwierigkeitsgrad. Vorteile des Tests sind die schnelle Durchführbarkeit und die Robustheit gegenüber Störeffekten. Der Test kann einzeln oder in Gruppen durchgeführt werden. Allerdings ist es notwendig, die deutsche Sprache zu beherrschen, des Weiteren ergeben sich Probleme bei Legasthenikern, bei Probanden unter 20 oder über 65 und bei Probanden mit schwerwiegenden psychischen Störungen (Satzger, Fessmann & Engel, 2002). Zur Überprüfung der Validität wurde der MWT-B mit dem Hamburg Wechsler Intelligenztest für Erwachsene-Revision (HAWIE-R; Tewes, 1994) verglichen. Durchschnittlich bekamen die Probanden durch den MWT-B einen Intelligenzquotienten zugeordnet, der um ca. 17 Punkte höher war als der HAWIE-R Verbal-IQ. Der MWT-B IQ lag außerdem 16 IQ-Punkte höher als der HAWIE-R Gesamt-IQ. Bei einem großen Teil der gesunden Probanden war daher der IQ gemessen durch den MWT-B um mehr als eine Standardabweichung höher als der HAWIE-R Verbal-IQ, was die Messgenauigkeit des Tests in Frage stellt (Satzger, Fessmann & Engel, 2002). Weitere Daten zu Reliabilität und Validität sind Metzler & Schmidt (1992) zu entnehmen.

### 3.5.8. Zahlenverbindungstest

(ZVT; Oswald & Roth, 1979). Es handelt sich um einen sprachfreien, milieuunabhängigen Intelligenztest, der die kognitive Leistungsgeschwindigkeit erfassen soll. Im Gegensatz zum MWT-B misst er fluide Intelligenz. Der Test kann ab 8 Jahren über alle Altersstufen durchgeführt werden und ist mit wenig Aufwand in 5 bis 10 Minuten durchführbar. Beim Zahlen-Verbindungs-Test sind auf den Aufgabenblättern die Zahlen von 1 bis 100 abgebildet und von kleinen Kreisen umrahmt. Die Anordnung der Zahlen ist systematisch, die nächsthöhere Zahl befindet sich immer in unmittelbarer Nachbarschaft der Vorausgegangenen. Der Proband muss mit einem Bleistift möglichst schnell die einzelnen Zahlen der Reihe nach verbinden. Dabei wird die Zeit gestoppt, die der Proband für 4 Parallelversionen benötigt und der Durchschnitt aus den 4 Werten errechnet. Die IQ-Werte können Tabellen entnommen werden. Die Retest-Reliabilität beträgt .86 (Vernon, 1993). Bezüglich der Validität wurde der Test mit anderen gängigen Verfahren zur Intelligenzmessung korreliert. Oswald & Roth (1987) fanden hier Korrelationen von .40 bis .83 mit einigen traditionellen Verfahren zur Intelligenzmessung (Rammsayer & Stahl, 2007).

## 4. Datenauswertung

### 4.1 Vorverarbeitung der EEG-Daten

Die Aufbereitung der EEG-Daten erfolgte mit dem Programm „Vision Analyzer“. In einem ersten Arbeitsschritt wurden die EEG-Daten der Mastoid-Elektroden verworfen. Mit dem *raw data inspector* wurden Datenstrecken mit Pausen im Paradigma, in denen keine Stimuli dargeboten wurden, sowie große Artefakte entfernt.

Im Rahmen der Daten-Vorbereitung erfolgte zunächst eine Filterung der Daten mit einem Bandpassfilter von 0,1 bis 100 Hz mit einem *notch Filter* bei 50 Hz, um das 50 Hz-Netzrauschen zu entfernen. Die Augen-Artefaktkorrektur (Korrektur von Blinzelartefakten und Augenbewegungen) erfolgte nach einem Algorithmus von Gratton und Coles (Gratton & Coles, 1989) in allen Kopfelektroden. Es erfolgte außerdem eine Re-Referenzierung der Daten mit dem Durchschnitt der Daten aller Elektroden, der sogenannten *Average Reference*. Damit werden die Einzelelektroden gegen die Summe bzw. den Mittelwert aller Elektroden aufgerechnet, der asymptotisch gegen 0 strebt (bei Erfüllung aller Vorannahmen). Anschließend erfolgte die Segmentierung der Daten, wobei insgesamt 12 Segmenttypen unterschieden wurden: Nach jedem Stimulus konnte eine falsche (-), richtige (+) oder zu langsame (!) Reaktion erfolgen, wobei zusätzlich die Feedback-Bedingung (Gesicht [Face] vs. neutraler Stimulus [noFace]) mit bei der Segmentierung berücksichtigt wurde. Außerdem erfolgte die Segmentierung getrennt für die Reaktion selbst (response-getriggerte Segmente; orientiert am Moment des Tastendrucks) und für den Feedback-Stimulus (*face* vs. *no face*). Für response-getriggerte Epochen wurde die Segmentlänge von 100 ms vor der Reaktion bis 750 ms danach festgelegt. Das Intervall für die Feedback-Stimuli wurde etwas länger gewählt (bis 850 ms nach Stimulus-Präsentation), da die Feedback-ERN mit längerer Latenz als die reaktions-gemittelte ERN auftritt.

Bei der automatischen Artefaktkorrektur, durch die artefaktbelastete Segmente vor der weiteren Datenanalyse verworfen wurden, wurde zunächst einmal ein Amplitudenkriterium verwendet, durch das Segmente mit Absolutamplituden größer bzw. kleiner  $\pm 70$  mV eliminiert wurden. Das 2. angewandte Kriterium (Gradientenkriterium) betraf Amplitudensprünge von mehr als 70  $\mu$ V von einem Abtastpunkt zum nächsten, da diese mit großer Wahrscheinlichkeit nicht

physiologischen Ursprungs sind und deswegen nicht in die Auswertung mit eingehen sollten. In die individuell und pro Bedingung gemittelten Segmente (*Averages*) sowie die spätere Mittelung über alle Personen (*Grand Average*) gingen nur nach o.g. Kriterien artefaktfreie Segmente ein. Der Referenzzeitraum für die in den gemittelten Segmenten durchgeführte Baseline-Korrektur (*Baseline Correction*-) war bei -100 bis -50 ms (bezogen auf den Tastendruck bzw. Feedback-Stimulus) festgesetzt. Die Peak-Bestimmung (*Peak Detection*) der ERP-Komponenten (ERN, FRN) erfolgte semi-automatisch, wobei zunächst die relativen Minima automatisch in festgelegten Intervallen (ERN: -25–125 ms; FRN: 200–450 ms) vom Programm markiert wurden. Nach visueller Inspektion aller Peaks erfolgte falls nötig noch eine manuelle Korrektur der Daten. Bei der ERN wird außerdem in der Regel nicht die absolute Negativität der Amplituden gemessen, sondern das Verhältnis vom vorhergehenden Peak zum tiefsten Punkt, also der relative Abfall (*Peak-zu-Tal Analyse*). Daher wurde sowohl für die ERN als auch für die FRN zusätzlich zum relativen Minimum im jeweiligen Segment der vorhergehende positive Peak bestimmt und ein entsprechendes Differenzmaß gebildet (ERN bzw. FRN – vorherige Positivierung). Bei der Pe konnte dieses Verfahren jedoch nicht angewandt werden. Da sie ein relativ breites Potential darstellt, dessen Peak u.U. schlecht bestimmbar ist, wurde hier stattdessen die *area under the curve* (AUC) im Zeitbereich von 100 bis 250 ms nach der korrekten oder fehlerhaften Reaktion berechnet. Während die Amplituden der ERN und Pe jeweils für korrekte, fehlerhafte und zu langsame Reaktionen bestimmt wurden, erfolgte die Detektion der FRN in Differenzkurven, die sich aus der Subtraktion des Potentials nach korrektem vom Potential nach Fehlerfeedback ergaben (vgl. Talmi, Atkinson & El-Deredy, 2013; Hajcak et al., 2007). Die ERN wurde an der Elektrode Cz und an der ursprünglichen Referenzelektrode FCz bestimmt, die Pe an Elektrode Cz. Die Feedback-ERN wurde an den fronto-zentralen Elektrodenpositionen Fz, FCz und Cz bestimmt (vgl. Aarts & Pourtois, 2010; Suárez-Pellicioni et al., 2013; Themanson et al., 2012; Stürmer et al., 2011). Nur Probanden mit mehr als 8 auswertbaren Epochen pro Bedingung konnten in die Analyse mit einbezogen werden. Aufgrund von technischen Problemen während der EEG-Ableitung (n=1) bzw. einer zu geringen Anzahl artefaktfreier Epochen in mindestens einer der Fehlerbedingungen (n=10) mussten insgesamt 11 Probanden aus der Analyse ausgeschlossen werden. Weitere 5 Probanden zeigten ein atypisches Reaktionsverhalten, das entweder eine Anzahl korrekter Reaktionen im Bereich der Ratewahrscheinlichkeit (n=3) oder fast

ausschließlich Reaktionen außerhalb des Reaktionszeitkriteriums ( $n=2$ ) aufwies. Letztendlich konnten somit die Daten von 16 Probanden nicht bei der Analyse berücksichtigt werden, so dass 40 Datensätze in die Endauswertung mit eingingen.

## 4.2 Statistik

Die Auswertung erfolgte mit SPSS 18. Für den Vergleich zwischen den experimentellen Bedingungen (soziales vs. neutrales Feedback) wurden für alle drei Potentiale (ERN, Pe, FRN) zunächst Varianzanalysen gerechnet, die den Innersubjektfaktor „Correctness“ (Potentiale nach richtigen vs. falschen vs. zu langsamen Antworten) und „Feedback“ (soziales vs. neutrales Feedback) sowie den Innersubjektfaktor „Elektrodenposition“ einschlossen. Zur Analyse des Einflusses der genannten Persönlichkeitsmerkmale (vgl. Abschnitt 2) wurden außerdem Varianzanalysen mit den zusätzlichen Zwischensubjektfaktoren „BIS-Score“, „Verträglichkeit“ bzw. „Neurotizismus“ berechnet (nach einem vorherigen Mediansplit bzgl. der verschiedenen Skalenwerte). Bei signifikanten Haupteffekten oder Interaktionen wurden anschließend Post-hoc Analysen mit univariaten Varianzanalysen und t-Tests für gepaarte oder unabhängige Stichproben durchgeführt. Wurde durch einen signifikanten Chi-Quadrat Wert im Mauchly-Test ( $p < .1$ ) eine Verletzung der Sphärizitätsannahme offensichtlich, so erfolgte eine entsprechende Korrektur der Freiheitsgrade der F-Statistik. Betrug das Huynh-Feldt Epsilon  $\geq 0.75$ , wurde die Huynh-Feldt Korrektur verwendet. Bei einem Huynh-Feldt Epsilon von  $< 0.75$  wurde die Greenhouse-Geisser Korrektur eingesetzt (Quintana und Maxwell, 1994).

Zur Überprüfung auf Normalverteilung der Daten wurde der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest angewandt. Bei Verletzungen der Normalverteilungsannahme ( $p < .1$ ) wurden post-hoc Analysen mit nicht-parametrischen Verfahren durchgeführt (betroffene Variablen: negativer PANAS-Score nach beiden Aufgabenblöcken; Amplitude der Feedback-ERN nach Gesichter-Feedback an FCz und Cz;  $0.007 < p < 0.075$ ). Hierbei wurde beim Vergleich zweier unabhängiger Stichproben der Mann-Whitney U-Test eingesetzt, bei abhängigen Stichproben der Wilcoxon-Test.

Um Veränderungen psychometrischer Daten (z.B. Stimmung) im Verlauf der Zeit zu bewerten, wurden Varianzanalysen mit Messwiederholung (Innersubjektfaktor „Messzeitpunkt“ mit drei Erhebungszeitpunkten) gerechnet. Auch hier wurden bei signifikanten Effekten Post-hoc Analysen mit t-Tests für gepaarte Stichproben

durchgeführt. Bei Verletzung der Sphärizitätsannahme oder der Normalverteilung wurde entsprechend korrigiert. Bei Mittelwertsvergleichen zwischen zwei Gruppen wurden t-Tests für unabhängige Stichproben genutzt. Um den Zusammenhang zwischen Persönlichkeitsmerkmalen bzw. Stimmung und ERP-Potentialen direkt zu beurteilen, kamen Korrelationen zum Einsatz. Da wir aufgrund der Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests teilweise nicht von einer Normalverteilung ausgehen konnten (negativer PANAS-Score, s.o.) und somit ein nonparametrisches Verfahren notwendig war, benutzten wir hier Spearman's Rho. Das  $\alpha$ -Niveau wurde auf 0.05 festgelegt. Das Signifikanzniveau muss bei multiplem Testen durch z.B. Bonferroni-Korrekturen korrigiert werden, um eine Kumulierung des alpha-Fehlers zu verhindern. Wir führten im Rahmen aller post-hoc sowie multiplen Korrelationsanalysen entsprechende Adjustierungen durch.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 ERN und Einfluss des Feedbacks

Wir rechneten eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung um festzustellen, ob sich die Potentiale nach Fehlern, richtigen Antworten und zu langsamen Antworten an sich und in Abhängigkeit von Feedback-Art und Elektrodenposition in ihrer Amplitude unterschieden. Faktor 1 „*correctness*“, der sich auf die Richtigkeit der Reaktionen auf die Aufgaben bezog, hatte 3 Abstufungen: „richtig“, „falsch“ und „zu langsam“. Faktor 2 „*feedback*“ hatte 2 Abstufungen: „*noface*“ und „*face*“, wobei ersteres die Bedingung mit neutralem Feedback bezeichnete, letzteres die Bedingung mit *facial feedback*. Faktor 3, „*position*“, bezeichnete die Elektrode, an der die jeweiligen Potentiale abgeleitet wurden. In dieser Studie wurden die ERN-Amplituden – in Übereinstimmung mit der Literatur – ausschließlich an Position Cz und Position FCz beurteilt, so dass zwei Stufen des Faktors vorlagen.

Der Haupteffekt „*correctness*“ wurde signifikant ( $F_{1, 54} = 63.301, p < 0.001$ ). Im Einzelnen hatten die Potentiale über beide Elektroden und Bedingungen hinweg nach falschen Antworten einen stärker negativen Ausschlag als nach richtigen Antworten ( $t_{39} = 10.154, p < 0.0167$  [Bonferroni-korrigierte Signifikanzschwelle]) und nach zu langsamen Antworten ( $t_{39} = -6.047, p < 0.0167$ ). Potentiale nach zu langsamen Antworten waren wiederum negativer als nach richtigen Antworten ( $t_{39} = 6.317, p < 0.0167$ ).

Der Faktor „*position*“ wurde ebenfalls signifikant ( $F_{1, 39} = 4.853, p = 0.034$ ), was bedeutet, dass sich die ERN-Amplituden prinzipiell zwischen den beiden Elektrodenpositionen unterschieden, wobei an Position Cz insgesamt stärkere Negativierungen erfasst wurden.

Der Faktor „*feedback*“ lag in den Ausprägungen „*noface*“ (neutrales Feedback) und „*face*“ (*facial feedback*) vor. Der Haupteffekt „*feedback*“ wurde nicht signifikant ( $p = .975$ ). Auch die Interaktionen „*correctness* \* *feedback*“ ( $p = .489$ ), „*position* \* *feedback*“ ( $p = .475$ ) sowie „*feedback* \* *position* \* *correctness*“ ( $p = .917$ ) erreichten keine statistische Signifikanz. Dies ist in Abb. 8 verdeutlicht:

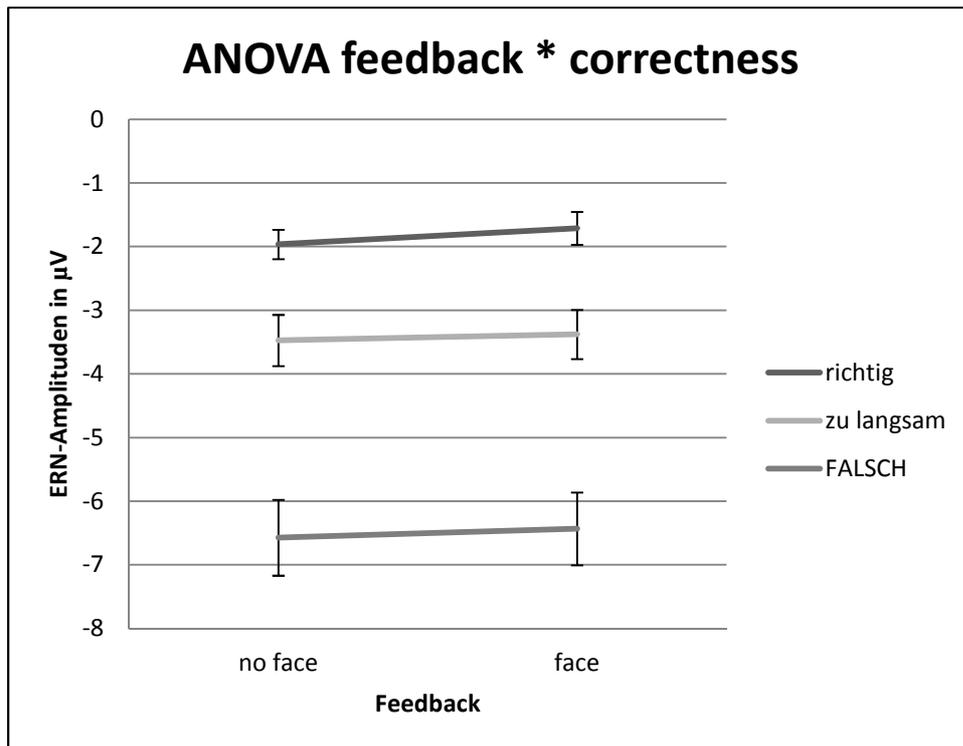


Abb. 8: Ergebnis ANOVA feedback \* correctness für Elektroden Cz und FCz: Mittelwerte der ERN-Amplituden bei richtigen, falschen und zu langsamen Reaktionen (correctness) in Abhängigkeit von sozialem vs. neutralem Feedback (feedback) mit Standardfehler über alle Pbn gemittelt

Zusammenfassend hatten Potentiale, die nach Fehlern auftraten, die größten negativen Ausschläge, gefolgt von Amplituden nach zu langsamen und zuletzt nach korrekten Reaktionen. Im Grand Average (Abb. 9 bis 12) wird dies durch ein deutliches negatives ERN-Potential nach falschen Antworten offenbar. Wie den Abbildungen 9 bis 12 zu entnehmen ist, war es dabei für die Amplituden der ERN unerheblich, ob neutrales oder faziales Feedback geboten wurde.

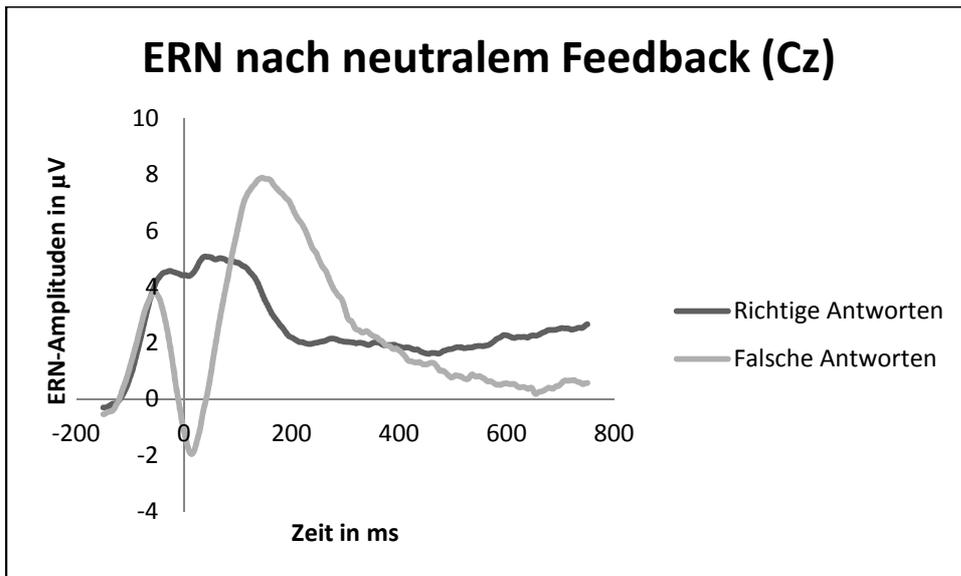


Abb. 9: Grand-Average Kurvenverlauf für die ERN und Pe nach neutralem Feedback an Cz

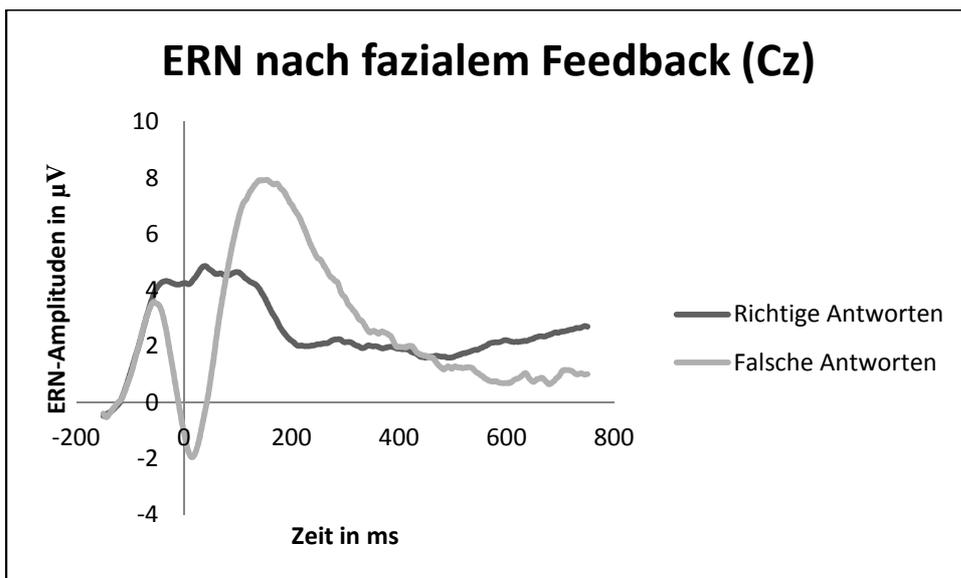


Abb. 10: Grand-Average Kurvenverlauf für die ERN und Pe nach fazialem Feedback an Cz

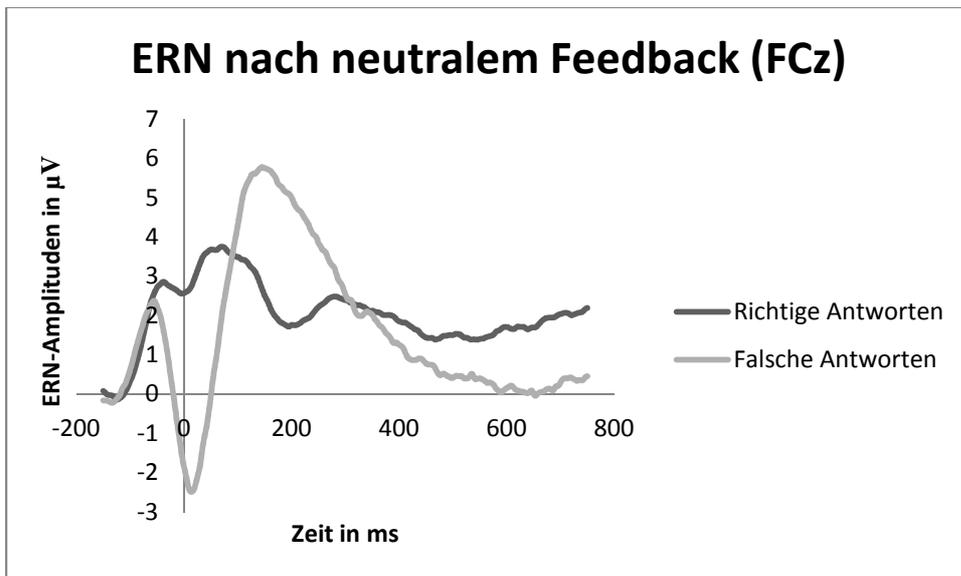


Abb. 11: Grand-Average Kurvenverlauf für die ERN und Pe nach neutralem Feedback an FCz

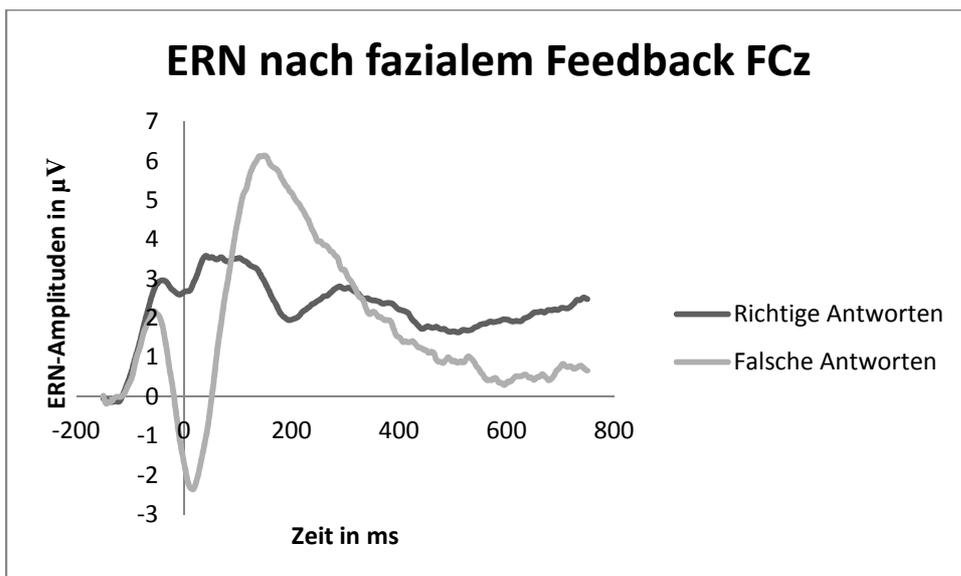


Abb. 12: Grand-Average Kurvenverlauf für die ERN und Pe nach fazialem Feedback an FCz

## 5.2. FRN und Einfluss des Feedbacks

Bei der ERN unterschieden sich die Potentiale nach Reaktionen der Probanden bei *facial feedback* nicht von denen bei neutralem Feedback. Um herauszufinden, ob es bei der Feedback-ERN einen Unterschied der Amplituden bei richtigen, falschen und zu langsamen Antworten in Abhängigkeit von der Feedbackmodalität gibt, wurden Varianzanalysen mit den Innersubjektfaktoren „*feedback*“ (*face* vs. *noface*) und „*position*“ (Fz, FCz, Cz) berechnet (s.o.). Die FRN als Reaktion auf Feedback wurde

im Gegensatz zur reaktionsgebundenen ERN in Differenzkurven bestimmt, die sich aus der Subtraktion des Potentials nach korrektem vom Potential nach Fehlerfeedback ergeben, daher wurde der Faktor „correctness“ hier überflüssig.

Hierbei ergaben sich signifikante Haupteffekte der Faktoren „position“ ( $F_{2, 72} = 8.946$ ,  $p < 0.001$ ) sowie „feedback“ ( $F_{2, 39} = 4.439$ ,  $p < 0.05$ ), wobei signifikant größere FRN-Amplituden nach fazialem ( $-4.452 \pm 2.057 \mu\text{V}$ ) im Vergleich zu neutralem Feedback ( $-3.879 \pm 1.82 \mu\text{V}$ ) auftraten. Außerdem waren die Amplituden an FCz und Cz insgesamt negativer als an der frontalen Elektrodenposition (Fz;  $p < 0.0167$  [Bonferroni-korrigierte Signifikanzschwelle]). Die Varianzanalyse für beide Feedbackmodalitäten an allen drei Elektrodenpositionen ist in Abbildung 13 zu sehen:

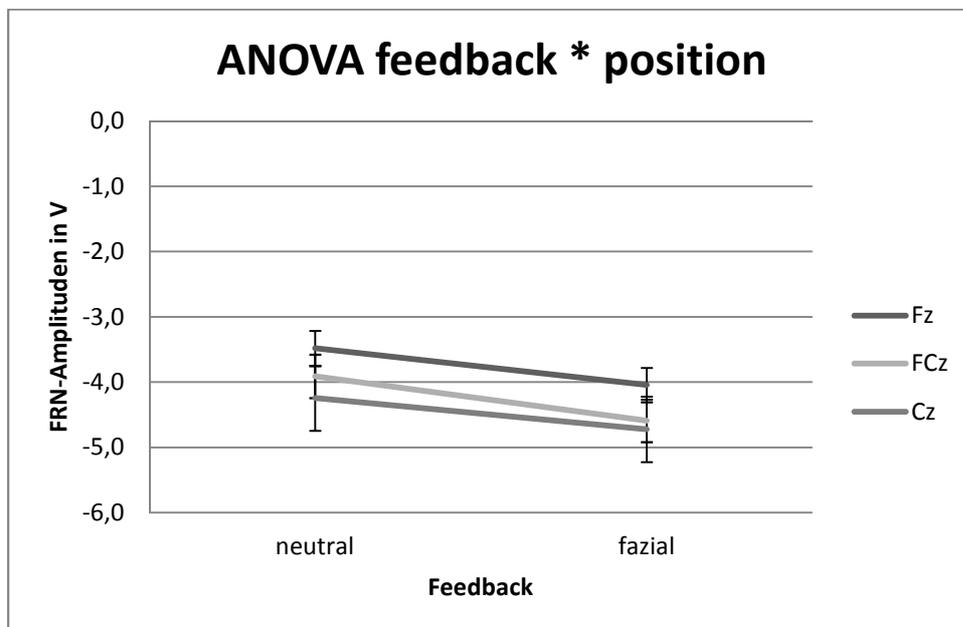


Abb. 13: Ergebnis ANOVA feedback \* position: Mittelwerte der FRN-Amplituden an den drei Elektrodenpositionen (position) in Abhängigkeit von sozialem vs. neutralem Feedback (feedback) mit Standardfehler über alle Pbn gemittelt

Auch den Grand Average Kurvenverläufen der FRN an den verschiedenen Elektrodenpositionen in Abb. 14 bis 16 ist zu entnehmen, dass es bezüglich der FRN einen deutlichen Einfluss des Feedbacks gab:

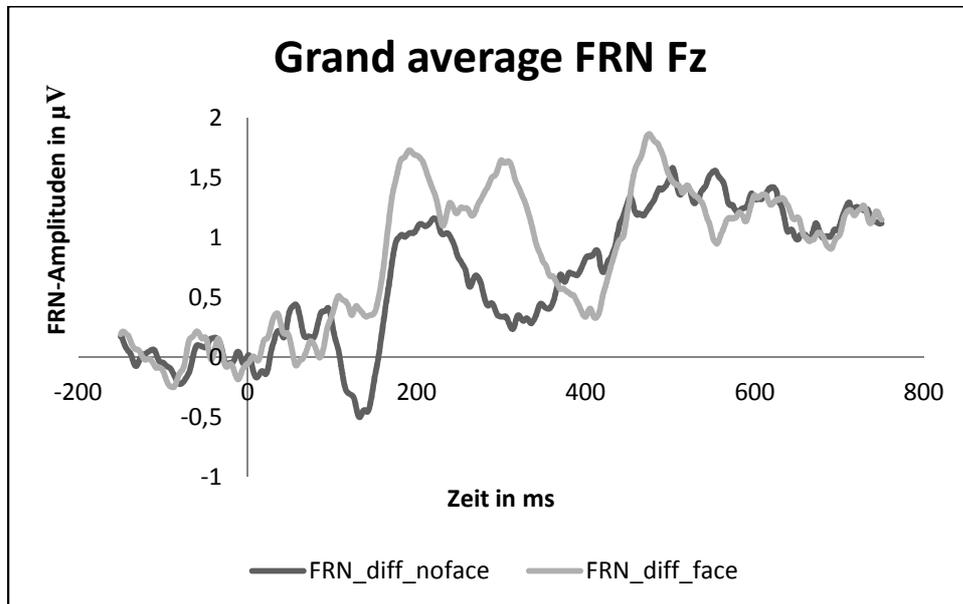


Abb. 14: Grand-Average Kurvenverlauf für die ERN nach neutralem (noface) und fazialem Feedback (face) an Fz

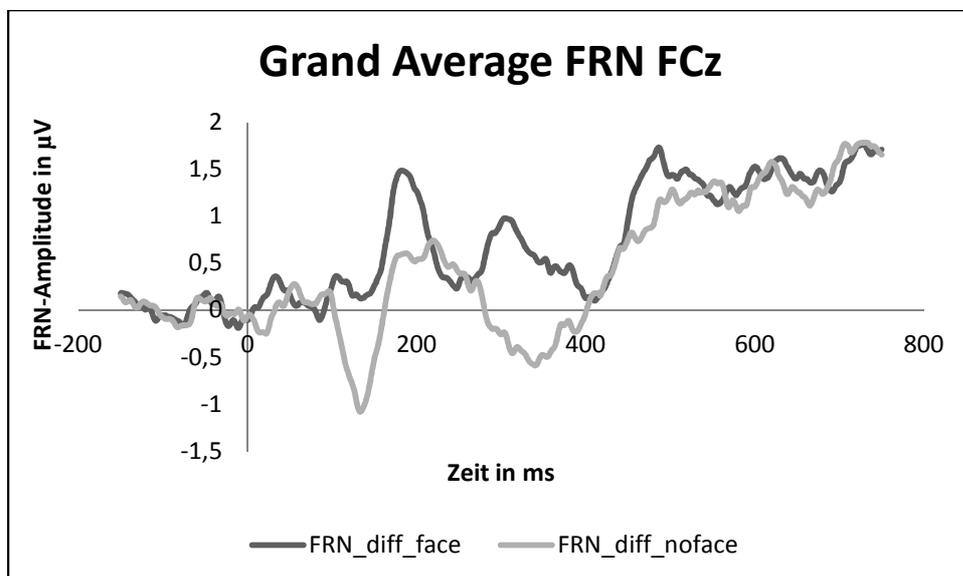


Abb. 15: Grand-Average Kurvenverlauf für die ERN nach neutralem (noface) und fazialem Feedback (face) an FCz

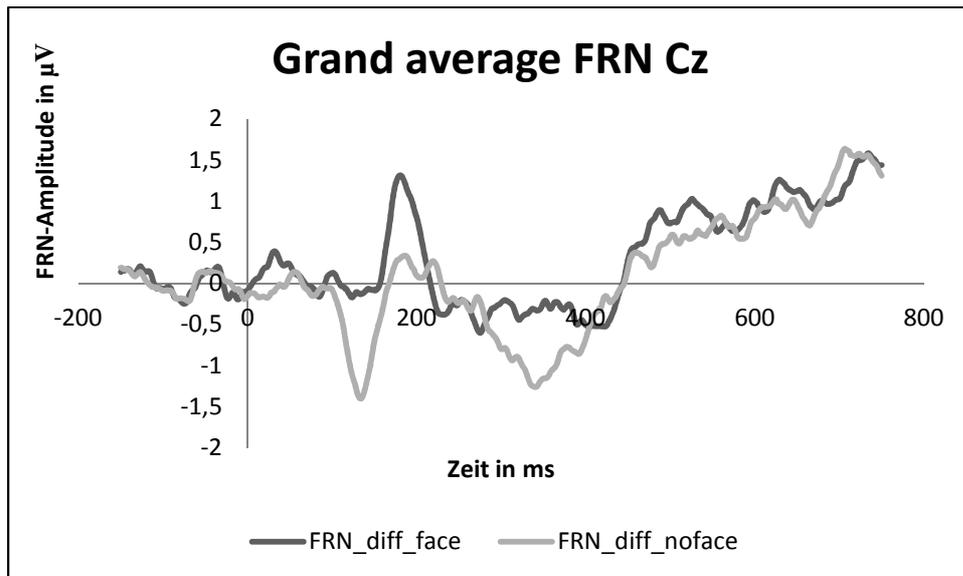


Abb. 16: Grand-Average Kurvenverlauf für die FRN nach neutralem (noface) und fazialem Feedback (face) an Cz

### 5.3 Zusammenhang der ERPs mit Persönlichkeit

Zur Prüfung o.g. Hypothesen zum Einfluss der Persönlichkeits- bzw. motivationalen Variablen „Neurotizismus“, „Verträglichkeit“ und „BIS-Score“ wurden um einen jeweils entsprechenden Zwischensubjektfaktor erweiterte Varianzanalysen berechnet. Da das prinzipielle Auftreten der Fehlerpotentiale speziell nach fehlerhaften Reaktionen in o.g. Analysen bereits wiederholt gezeigt wurde, wurde in diesem Zusammenhang auf den Innersubjektfaktor „correctness“ verzichtet und es wurden ausschließlich die Amplituden nach fehlerhaften Reaktionen in der Analyse berücksichtigt.

Mittelwerte und Standardabweichungen der 5 Faktoren des NEO-FFI und der BIS/BAS Skala sind Tabelle 3 und 4 zu entnehmen:

Tabelle 3

*Mittelwerte und Standardabweichungen für NEO-FFI*

	Neurotizismus	Extraversion	Offenheit	Verträglichkeit	Gewissenhaftigkeit
MW	31.38	41.10	42.20	43.08	45.70
MD	29.00	41.00	40.50	43.50	46.00
SD	5.70	7.83	6.15	6.15	5.28

Anmerkung. MW= Mittelwert. SD=Standardabweichung. MD=median

Tabelle 4

*Mittelwerte und Standardabweichungen für BIS/BAS*

	BIS	BAS total	BAS D	BAS F	BAS R
MW	2.82	3.04	2.99	2.88	3.22
MD	2.79	3.08	3.00	2.75	3.20
SD	.53	.35	.54	.49	.31

Anmerkung. MW= Mittelwert. SD=Standardabweichung. MD=median. D=drive. F=funseeking. R=reward responsiveness

## 5.3.1 Zusammenhang ERN und Persönlichkeit – Verträglichkeit

Bei der Analyse des Einflusses der Verträglichkeit auf die Amplitude der ERN ergab sich in der daraus resultierenden ANOVA – neben dem bereits bekannten Positionseffekt – eine signifikante Interaktion der Faktoren „Feedback-Bedingung“ und „Verträglichkeit“ ( $F_{1, 38} = 4.607$ ,  $p = 0.038$ ), die auf einen prinzipiell gegenläufigen Einfluss des Feedback-Faktors in beiden Verträglichkeitsgruppen (Mediansplit: hohe vs. niedrige Verträglichkeitswerte) zurückzuführen war (vgl. Abbildung 17). Obwohl sich in post-hoc Analysen beide Gruppen weder in der „face“ ( $t_{38} = 1.064$ ,  $p = 0.294$ ) noch in der „no face“ Bedingung ( $t_{38} = -0.438$ ,  $p = 0.664$ ) signifikant hinsichtlich ihrer

ERN-Amplituden unterschieden, und obwohl in keiner der beiden Gruppen ein signifikanter Effekt der Feedbackmodalität nachzuweisen war ( $t < 1.6$ ,  $p > 0.1$ ), unterschied sich das Ausmaß der *Veränderung* der ERN-Amplitude in Abhängigkeit von der Feedbackbedingung zwischen beiden Gruppen doch signifikant ( $p < 0.05$ ).

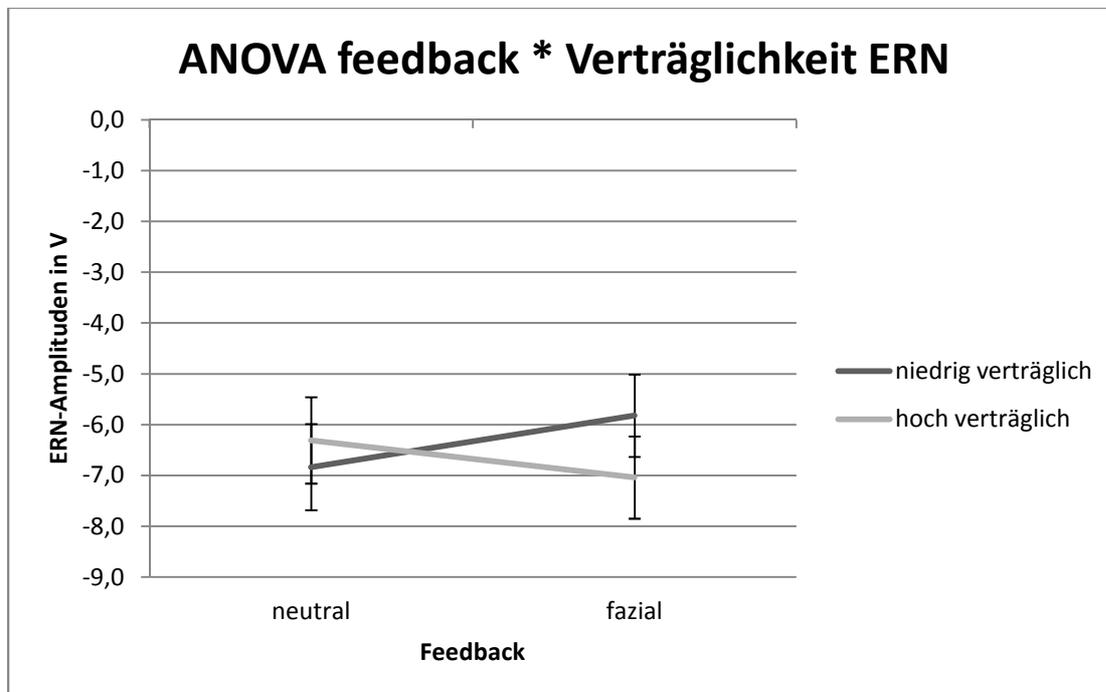


Abb. 17: Ergebnis ANOVA feedback \* Verträglichkeit für Elektroden FCz und Cz: Mittelwerte der ERN-Amplituden hoch und niedrig verträglichen Pbn (verträglichkeit) in Abhängigkeit von sozialem vs. neutralem Feedback (feedback) mit Standardfehler über alle Pbn gemittelt

### 5.3.2 Zusammenhang ERN und Persönlichkeit – Neurotizismus

Bei der Analyse des Neurotizismus-Einflusses auf die Amplitude der ERN zeigte sich neben dem bekannten Positionseffekt (s.o.) lediglich eine marginal signifikante Interaktion der Faktoren „Feedback-Bedingung“, „Position“ und „Neurotizismus“ ( $F_{1, 34} = 2.042$ ,  $p = 0.057$ ). Bei der weiteren Analyse dieser Interaktion zeigte sich, dass es zu einem tendenziellen Bedingungseffekt lediglich an Position FCz und nur in der Probandengruppe mit hohen Neurotizismuswerten kam, der allerdings einer Bonferroni-Korrektur nicht standhielt ( $t_{17} = 1.861$ ,  $p = 0.08$ ; alle anderen  $t < 1$ ,  $p > 0.35$ ).

### 5.3.3 Zusammenhang ERN und Persönlichkeit – BIS

Unter Aufnahme der BIS-Mediangruppen in o.g. Varianzanalyse zu den Amplituden der ERN fand sich schließlich – neben dem bereits mehrfach erwähnten Positionseffekt – eine signifikante Interaktion der Faktoren „*position*“ und „*Verträglichkeit*“ ( $F_{1, 38} = 4.693$ ,  $p = 0.037$ ) sowie ein signifikanter Haupteffekt des Faktors „*BIS-Gruppe*“ ( $F_{1, 38} = 4.727$ ,  $p = 0.036$ ). Diese Befunde waren auf signifikant höhere (d.h. negativere) ERN-Amplituden in Mediengruppe 1 (geringe BIS-Werte;  $-7.632 \pm 3.976 \mu\text{V}$ ) im Vergleich zu Mediengruppe 2 ( $-5.371 \pm 3.323 \mu\text{V}$ ) zurückzuführen, wobei dieser Gruppenunterschied insbesondere an Elektrodenposition Cz nachweisbar war ( $t_{38} = 2.418$ ,  $p < 0.025$  [Bonferroni-korrigierte Signifikanzschwelle]) (vs. FCz:  $t_{38} = 1.714$ ,  $p > 0.025$ ).

### 5.3.4 Zusammenhang FRN und Persönlichkeit – Verträglichkeit

Für den Zusammenhang zwischen Persönlichkeit und Amplituden der FRN wurde genauso verfahren: Bei der Analyse des Einflusses von Verträglichkeit auf die Amplitude der FRN ergab sich erneut der signifikante Positionseffekt ( $F_{2, 37} = 410.822$ ,  $p = 0.000$ ). Auch der Haupteffekt der Feedback-Art war signifikant ( $F_{1, 38} = 5.026$ ,  $p = 0.031$ ). Des weiteren fand sich eine signifikante Interaktion der Faktoren „*feedback*“ und „*Verträglichkeit*“ ( $F_{1, 38} = 6.154$ ,  $p = 0.018$ ), Mediansplit: hohe vs. niedrige Verträglichkeitswerte) (vgl. Abbildung 18).

In post-hoc Analysen unterschieden sich beide Gruppen weder in der „*face*“ ( $t_{38} = 1.424$ ,  $p = 0.163$ ) noch in der „*no face*“ Bedingung ( $t_{38} = -0.940$ ,  $p = 0.353$ ) signifikant hinsichtlich ihrer ERN-Amplituden.

Es zeigte sich ein signifikanter Effekt der Feedbackmodalität bezüglich der FRN-Amplituden der hoch verträglichen Personen ( $t_{38} = 3.840$ ,  $p = 0.001$ ). Die Mittelwerte waren bei neutralem Feedback kleiner ( $-3.601 \pm 1.816 \mu\text{V}$ ) als bei fazialem Feedback ( $-4.808 \pm 1.516 \mu\text{V}$ ). Bei den niedrig verträglichen Probanden sah man diesen Effekt nicht ( $t_{38} = -0.151$ ,  $p = 0.881$ ).

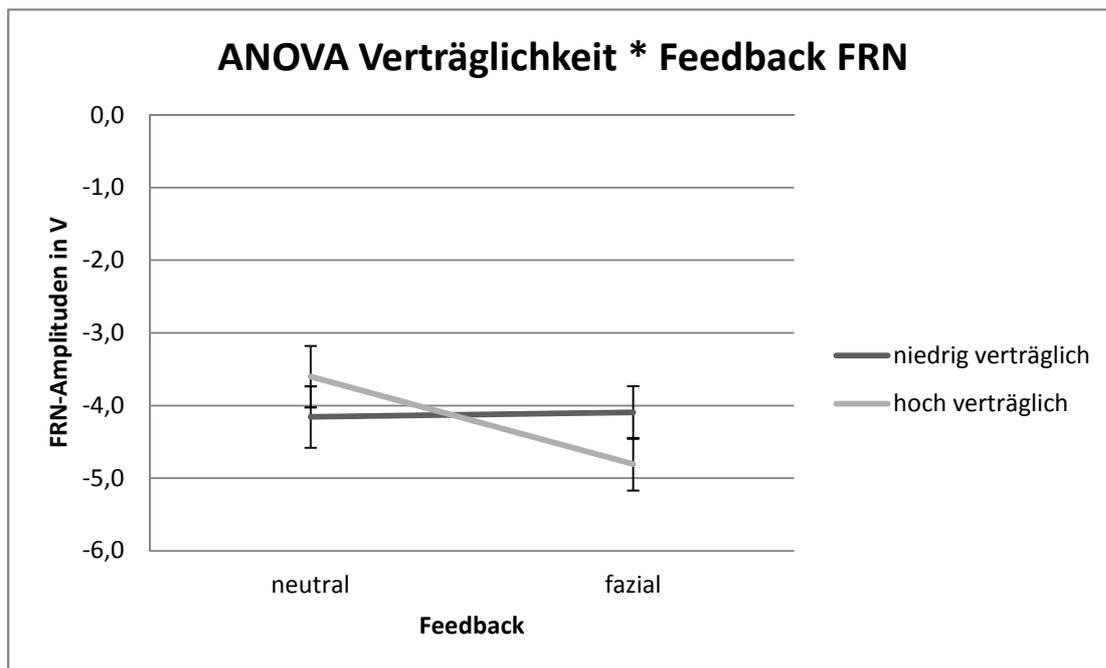


Abb. 18: Ergebnis ANOVA feedback \* Verträglichkeit für Elektroden Fz, FCz und Cz: Mittelwerte der FRN-Amplituden hoch und niedrig verträglichen Pbn (Verträglichkeit) in Abhängigkeit von sozialem vs. neutralem Feedback (feedback) mit Standardfehler über alle Pbn gemittelt

### 5.3.5 Zusammenhang FRN und Persönlichkeit – Neurotizismus

Bei der Analyse des Faktors „Neurotizismus“ wurde nur die Hauptwirkung des Faktors „position“ signifikant ( $F_{1, 38} = 6.391$ ,  $p = 0.003$ ).

### 5.3.6 Zusammenhang FRN und Persönlichkeit – BIS

Bei der Varianzanalyse zur Beurteilung der FRN-Amplituden in Abhängigkeit der BIS-Mediangruppenzugehörigkeit und des Feedbacks an den drei Elektrodenpositionen Fz, FCz, und Cz fand sich wiederum ein signifikanter Effekt des Faktors „position“ ( $F_{2, 37} = 9.247$ ,  $p = 0.000$ ). Es gab ebenfalls entsprechend unseren Vorbefunden einen Haupteffekt des Feedbacks ( $F_{1, 38} = 4,361$ ,  $p = 0.044$ ), so lagen in der Bedingung mit neutralem Feedback deutlich kleinere FRN-Amplituden vor ( $-3.897 \pm 2.025 \mu\text{V}$ ) als in der Bedingung mit sozialem Feedback ( $-4.452 \pm 2.734 \mu\text{V}$ ). Der Haupteffekt des Faktors „BIS-Gruppe“ wurde nicht signifikant ( $F_{1, 38} = 0.005$ ,  $p = 0.945$ ), ebenso wenig die Interaktionen mit den anderen Faktoren.

## 5.4 Einfluss der Stimmung auf die ERPs

### 5.4.1 Einfluss der Stimmung auf die ERN-Amplituden

Zur Bewertung der Veränderung der Stimmung während des Experiments wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung über die drei MZP gerechnet, zu denen die PANAS (Watson et al., 1988) ausgefüllt wurde: Vor Beginn des Experiments, nach dem ersten Block und nach dem zweiten Block. Die Berechnungen wurden getrennt für die positiven und negativen Items der PANAS durchgeführt. Alle Probanden, deren EEG-Daten auswertbar waren, wurden in die Varianzanalyse miteinbezogen, wobei die Reihenfolge, in der die zwei Versuchsbedingungen („face“ und „noface“) durchlaufen wurden, in dieser Analyse nicht berücksichtigt wurde.

#### Positive Items der PANAS:

Der Haupteffekt „Zeit“ war signifikant ( $F_{2,60} = 16.055, p < .001$ ). Es zeigte sich eine signifikante Abnahme des positiven Affektwertes vom 1. bis zum 3. MZP ( $p < 0.0167$  [Bonferroni-korrigierte Signifikanzschwelle]). Auch zwischen 1. und 2. MZP und zwischen 2. und 3. MZP zeigte sich eine signifikante Abnahme der positiven Stimmung ( $p < 0.0167$ ). Die Ergebnisse werden in Abb. 19 verdeutlicht:

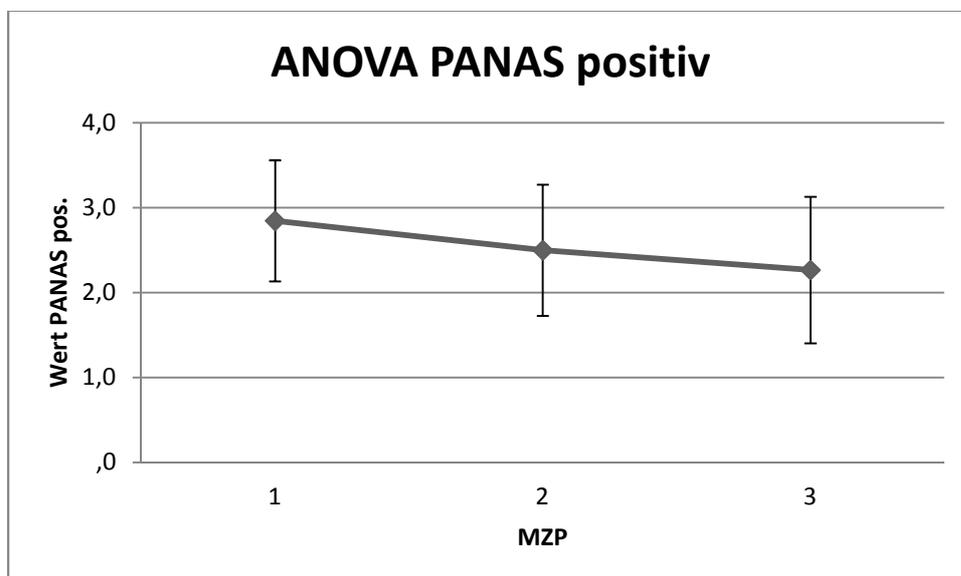


Abb. 19: Ergebnisse der ANOVA mit Messwiederholung für positive Items der PANAS mit Standardabweichung

### Negative Items der PANAS:

Hinsichtlich der Items der PANAS, die negativen Affekt erheben, fand sich lediglich ein tendenzieller Haupteffekt „Zeit“ ( $F_{2,64} = 2.700$ ,  $p = 0.085$ ) im Sinne einer Abnahme der Werte der Negativ-Items vom 1. bis zum 3. Messzeitpunkt, wobei die einzelnen post-hoc Vergleiche einer Bonferroni-korrigierten Signifikanzprüfung jedoch nicht standhielten (alle  $p > 0.0167$ ).

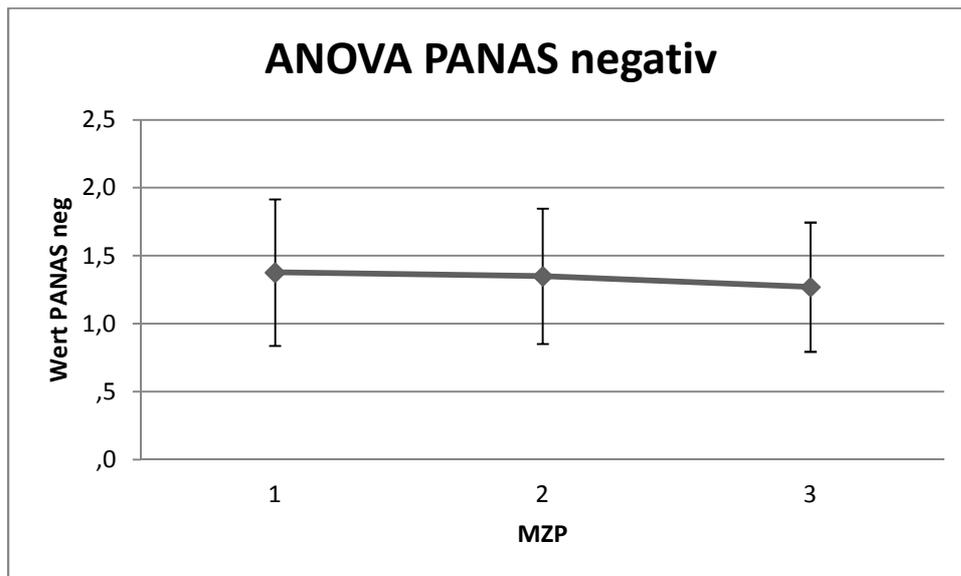


Abb. 20: Ergebnisse der ANOVA mit Messwiederholung für negative Items der PANAS mit Standardabweichung

Um die Stimmung der Probanden mit der Amplitude der EKPs in Beziehung zu setzen, wurden Korrelationen gerechnet. Wir korrelierten die Werte der Probanden in den positiven und negativen PANAS-Skalen nach dem fazialen bzw. neutralen Feedbackblock mit den Amplituden der Pe (an Cz) und ERN (an Cz und FCz) des entsprechenden Durchgangs jeweils ausschließlich nach falschen Antworten. Bei jeweils 6 resultierenden Korrelationen für die positiven und negativen PANAS-Werte ergab sich hierbei ein Bonferroni-korrigiertes Alpha-Niveau von  $p = 0.0083$ .

Für die positiven PANAS-Werte zeigten sich keine signifikanten Korrelationen mit der Amplitude der ERN oder der Pe nach neutralem oder fazialem Feedback ( $Rho < 0.28$ , alle  $p > 0.09$ ). Für die negativen PANAS-Werte fand sich hingegen eine signifikant positive Korrelation mit der ERN-Amplitude nach neutralem Feedback an FCz ( $Rho = 0.456$ ,  $p < 0.003$ ) und ein entsprechend marginal signifikanter Effekt auch an Cz ( $Rho = 0.408$ ,  $p = 0.009$ ).

#### 5.4.2 Einfluss der Stimmung auf die FRN-Amplituden

Mit der Feedback-ERN wurde genauso verfahren. An keinem der Ableitpunkte bestanden bezüglich der positiven und negativen Items der PANAS signifikante Zusammenhänge mit FRN-Amplituden ( $Rho < 0.286$ , alle  $p > 0.07$ ).

#### 5.5 PE und Einfluss des Feedbacks

Die Datenanalyse zur Pe erfolgte rein exploratorisch, da der Focus dieser Arbeit auf der ERN und FRN liegt und somit auch keine gerichteten Hypothesen für die Pe formuliert wurden.

Bei der Auswertung der EEG-Daten bezüglich der Pe wurde ähnlich vorgegangen wie bei der ERN. Entsprechend der Auswertung für die ERN-Potentiale hatte Faktor 1 „*correctness*“ die 3 Abstufungen „richtig“, „falsch“ und „zu langsam“ und Faktor 2 „*face*“ die Abstufungen: „face“ und „noface“. Das Pe Potential wurde nur an Elektrode Cz ausgewertet. Dadurch ergab sich eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung. Auch hier wurde der Haupteffekt „*correctness*“ signifikant ( $F_{2,59} = 99.322$ ,  $p < 0.001$ ). Im Einzelnen unterschieden sich die Potentiale nach richtigen von denen nach falschen ( $t_{39} = -7.580$ ,  $p < 0.0167$  [Bonferroni-korrigierte Signifikanzschwelle]) und nach zu langsamen Antworten ( $t_{39} = 9.437$ ,  $p < 0.0167$ ). Außerdem unterschieden sich die Potentiale nach falschen Antworten von denen nach zu langsamen Antworten ( $t_{39} = 11.398$ ,  $p < 0.0167$ ). Die Potentiale mit dem größten positiven Ausschlag traten nach falschen Antworten auf. Richtige Antworten erzeugten deutlich weniger positive Potentiale und Potentiale nach zu langsamen Antworten betragen unter einem  $\mu V$  und waren somit signifikant kleiner als die anderen Potentiale. Der Haupteffekt „*face*“ ( $p = .952$ ) sowie die Interaktion „*correctness*“ \* „*face*“ ( $p = .543$ ) wurden nicht signifikant. Wie Abb 21 zu entnehmen ist, lag – insbesondere nach fehlerhaften Reaktionen – also eine deutliche Pe vor, auf die die Art des Feedbacks (sozial vs. neutral) jedoch keinen Einfluss hatte. Dies ist auch aus den Grand average Graphiken Abb 9 bis 12 ersichtlich.

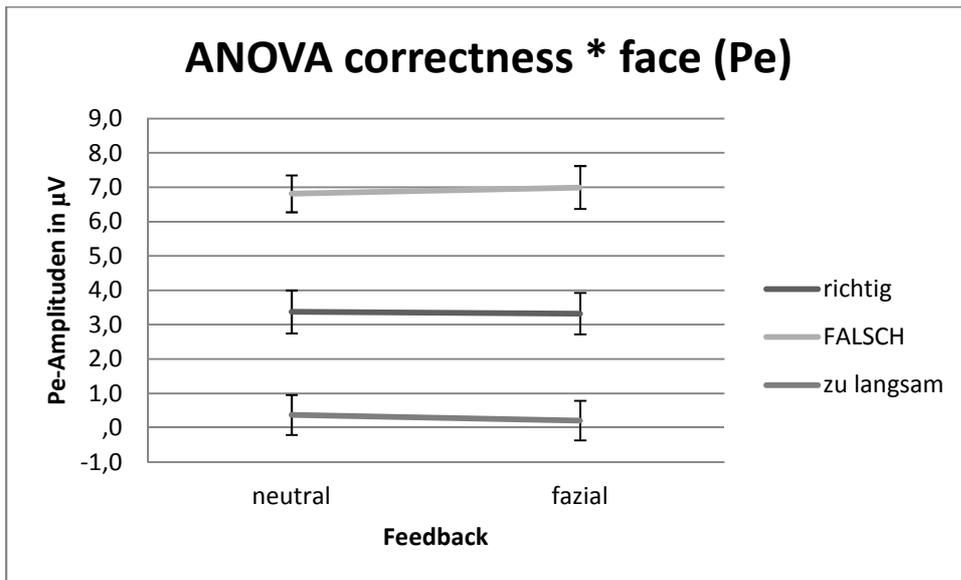


Abb. 21: Ergebnis ANOVA correctness \* face für die Pe: Mittelwerte der Pe-Amplituden bei richtigen, falschen und zu langsamen Reaktionen in Abhängigkeit von sozialem vs. neutralem Feedback an Elektrode Cz mit Standardfehler

## 6. Diskussion

Bezüglich der ERN zeigten sich bei den Probanden nach Fehlern in der Testaufgabe wesentlich negativere Potentiale als nach zu langsamen und richtigen Antworten, so dass sich in den Grand average Graphiken gemäß unseren Erwartungen eine deutliche ERN nach Fehlern darstellte. Die ERN war an der Ableitelektrode FCz und mit noch deutlicheren Negativierungen an Cz zu sehen. Ein ähnliches Muster zeigte sich bei einer Studie von Ehlis et al. (2005). Die Ergebnisse des Experiments bezüglich der ERN bestätigen auch die Ergebnisse zahlreicher anderer Studien (Gehring et al., 1993; Dehaene et al., 1994; Bernstein et al., 1995; Falkenstein et al., 1990), die sich mit Existenz, zeitlichem Ablauf und Lokalisation der ERN beschäftigten.

Analog zu den Befunden bezüglich der ERN konnten wir mit unserem Experiment auch die Existenz einer FRN an den Ableitpunkten Fz, FCz und Cz bestätigen (Gehring & Willoughby, 2002; Miltner et al., 1997). Die Potentiale zeigten sich an an der frontalen Elektrodenposition Fz und noch deutlicher an FCz und Cz.

### 6.1 Einfluss sozialen Feedbacks

#### 6.1.1 Einfluss sozialen Feedbacks auf die ERN

Die zentrale Hypothese des vorliegenden Experiments war, dass sich die Art des dargebotenen Feedbacks auf die Amplituden der ERPs auswirken würde. In der Literatur gab es Hinweise darauf, dass negative soziale Bewertung der Performance der Probanden zu größeren ERN- und FRN-Amplituden führen würde. Um zu testen, ob eine soziale Komponente beim Feedback die Fehlerverarbeitung beeinflussen würde, wählten wir als Feedback menschliche Gesichter, die bei Fehlern einen traurigen Gesichtsausdruck zeigten und so den Probanden suggerieren sollten, dass ihre fehlerhafte Leistung von anderen sozialen Wesen als schlecht beurteilt werden könnte.

Entgegen unseren Erwartungen konnte bei der reaktionsgebundenen ERN an keiner der Ableitelektroden ein Einfluss des dargebotenen Feedbacks beobachtet werden: Ob die Probanden nach Begehen eines Fehlers neutrale oder faziale Stimuli als Fehlerfeedback dargeboten bekamen, war für das Auftreten der reaktionsgebundenen ERN und die Höhe ihrer Amplituden völlig unerheblich. Die

reaktionsgebundene ERN beginnt etwa zeitgleich mit der Reaktion des Probanden (Miltner, 1997). Wie bereits weiter oben ausführlich behandelt, ist nicht abschließend geklärt, welchen zugrundeliegenden Prozess das ERN-Potential widerspiegelt, da eine bewusste Verarbeitung von Sinneseindrücken, die signalisieren, dass die Handlung falsch war, zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt sein kann. Es kann sich dabei um einen Fehlersuch- oder Korrekturmechanismus handeln, der Vergleichsprozesse zwischen verschiedenen Repräsentationen von möglichen Antworten beinhaltet (Gehring et al. 1993, Bernstein et al., 1995) oder um ein allgemeines, unabhängiges System der Fehlersuche (Miltner, 1997). In vielen früheren Studien zur ERN wird betont, dass es sich um ein sehr robustes Phänomen handelt, das von Faktoren wie der Modalität der eingesetzten Stimuli oder der Antwortmodalität kaum beeinflusst wird (Bernstein et al., 1995; Miltner et al., 1997). Dass jedoch die Art des Feedbacks modulierenden Einfluss auf ERPs haben kann, ist aus Studien bekannt, die sich größtenteils auf die FRN und weniger auf die reaktionsgebundene ERN beziehen, und in denen mit zumeist monetären Anreizen gearbeitet wird, bei denen das Feedback Informationen über Gewinn und Verlust und dessen jeweilige Höhe enthält (Hajcak et al., 2006; Yeung & Sanfey, 2004; Wu & Zhou, 2009; Doñamayor et al., 2011). Es existieren allerdings auch Studien zur ERN und deren Abhängigkeit vom dargebotenen Feedback bei Fehlern: Hajcak et al. (2005) ließen ihre Probanden glauben, deren Leistung in einer Aufgabe werde während des Experiments von einem Versuchsleiter beurteilt, und Wiswede et al. (2009c) präsentierten ihren Probanden abfälliges verbales Feedback bei fehlerhaften Reaktionen auf einen Aufgabenstimulus. In beiden Experimenten hatte das gebotene Feedback in der Experimentalgruppe eine deutliche soziale Komponente und es traten negativere ERN-Amplituden auf als in den Kontrollgruppen mit nicht-sozialem Feedback. Als Grund für das Ausbleiben des Effekts bei der ERN in unserem Experiment muss deswegen die Möglichkeit, dass die Art des Feedbacks beim Begehen eines Fehlers grundsätzlich keinen Einfluss auf die Amplitude der ERN hat, ausgeschlossen werden. Auch die Unwirksamkeit der Manipulation durch soziales Feedback wird durch die beiden genannten Experimente widerlegt. Als Grund für das Nichtauftreten des Effekts in unserem Experiment müssen daher andere Erklärungsmöglichkeiten herangezogen werden.

Eine mögliche Begründung für das Ausbleiben eines Effekts in unserem ERN-Experiment ist die Möglichkeit, dass die experimentelle Manipulation durch die

alleinige Präsentation von statischen Bildern menschlicher Gesichter nicht ausgereicht haben könnte, um eine soziale oder sozial-evaluative Situation zu erzeugen. In anderen ERN-Studien, die Verhalten in sozial-evaluativen Situationen untersuchten, wurde häufig nicht mit Bildern als Feedback gearbeitet, sondern die Situation durch Interaktion der Versuchspersonen mit einem Versuchsleiter erzeugt (Hajcak et al., 2005; Wiswede et al., 2009c; Cavanagh & Allen, 2008). In einer Studie von Boksem, Ruys & Aarts (2011), die sich mit den Auswirkungen verschiedener Gesichtsausdrücke auf ERN-Amplituden beschäftigten, wurden jedoch ebenfalls lediglich Fotos von emotionalen Gesichtern präsentiert und es zeigte sich ein modulierender Einfluss von fazialen Aufgabenstimuli bzw. Feedback auf ERN-Amplituden. Die Probanden mussten das Geschlecht von Personen erraten, deren Fotos rechts- oder linksbündig auf einem Bildschirm präsentiert wurden und entsprechend mit einem Tastendruck reagieren. Es gab jeweils drei Aufgabenblöcke mit fröhlichen Gesichtern als Aufgabenstimuli, die Zustimmung signalisieren sollten, missbilligenden, die Ablehnung signalisieren sollten, und traurigen Gesichtern. Beurteilt wurden die ERN-Amplituden nach Fehlertrials in den verschiedenen Versuchsbedingungen. Ein Feedback über die Korrektheit der ausgeführten Handlung wurde am Ende auch gegeben, wobei die Aufgabe jedoch für die Probanden einfach genug war, um sie einen Fehler bemerken zu lassen. Derselbe Performancefehler rief in der Bedingung mit dem missbilligenden Gesicht als Aufgabenstimulus eine stärkere Reaktion hervor als in den anderen beiden Bedingungen, sichtbar in höheren ERN-Amplituden. Bei fröhlichen und traurigen Gesichtern gab es keine Unterschiede bezüglich der Amplitudenhöhe. Die Autoren schlossen hieraus, dass für das Gehirn Fehler, die mit sozialer Zurückweisung vergesellschaftet sind, motivational salient sind und die Notwendigkeit der Mobilisierung kognitiver Ressourcen zur zukünftigen Vermeidung des Fehlers signalisieren. Aus der Studie von Boksem et al. (2011) kann abgeleitet werden, dass auch die bloße Präsentation von Fotos emotionaler Gesichter durchaus Einfluss auf die reaktionsgebundene ERN haben kann. Obwohl in dem Experiment die Gesichter nicht als Feedback benutzt wurden, sondern als Aufgabenstimuli, war dies offensichtlich ausreichend, um den beschriebenen Effekt hervorzurufen. Als Grund für den ausbleibenden Effekt in unserer Studie könnte in Erwägung gezogen werden, dass die Feedback-Stimuli in unserem Experiment eher einen traurigen Gesichtsausdruck aufwiesen als einen bösen oder missbilligenden. Ein trauriger

Gesichtsausdruck hatte weder im Experiment von Boksem et al. (2011) noch in unserem Experiment einen Einfluss auf die ERN-Amplituden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass ein trauriger Gesichtsausdruck lediglich eine negative Emotion verkörpert, die durchaus vom Probanden wahrgenommen werden kann, aber offensichtlich keine Modifikation des Fehlermonitorings hervorruft. Ein missbilligender Gesichtsausdruck hingegen könnte in sozialem Kontext anders interpretiert und von der Versuchsperson auf sich selbst bezogen werden. Hier wird eher soziale Zurückweisung signalisiert als bei einem traurigen Gesichtsausdruck und möglicherweise ist es die wahrgenommene soziale Zurückweisung und nicht die reine negative Emotion, die sich sichtbar durch die veränderte ERN-Morphologie auf das Fehlermonitoring auswirkt.

#### 6.1.2 Einfluss sozialen Feedbacks auf die FRN

Im Gegensatz zur ERN zeigte sich bei der FRN der Einfluss der Feedback-Art durch deutlich höhere Amplituden bei fazialem Feedback als bei neutralem Feedback. Dies entspricht Forschungsergebnissen aus der bisherigen Literatur, in denen sich ebenfalls abhängig vom Feedback deutlich modulierte FRN-Morphologien zeigten (Hajcak et al., 2006; Yeung & Sanfey, 2004; Wu & Zhou, 2009; Doñamayor et al., 2011). Studien mit nicht-monetärem Feedback sind dabei eher selten. Anders als in den meisten FRN-Studien mit monetären und dadurch motivationalen Anreizen wurde in einer Studie von Zeiler (2012) wie in unserem Experiment ohne Verstärkung, dafür mit Gesichterstimuli versus abstrakten Zeichen als Feedback gearbeitet. Nach negativem Outcome zeigten sich in der Studie von Zeiler (2012) größere FRN-Amplituden, die Amplituden waren jedoch im Gegensatz zu unseren Ergebnissen bei Präsentation abstrakter Zeichen tendenziell größer als bei fazielen Stimuli. Zu Ergebnissen, die den unseren ähnlich waren, kamen hingegen Kim, Liss, Rao, Singer & Compton (2012) mit einer FRN-Studie zur Einschätzung von Attraktivität, in der ebenfalls mit statischen Fotos von emotionalen Gesichtern gearbeitet wurde. In der Testaufgabe gab es keine richtigen oder falschen Antworten. Die Autoren wollten wissen, ob FRN-Potentiale auch bei einer durch den Probanden selbst als falsch wahrgenommenen Antwort in einer sozialen Aufgabe hervorgerufen werden können oder ob sie nur auftreten, wenn zwischen einer richtigen und einer falschen Antwort deutlich unterschieden werden kann. Nach Abgabe einer eigenen Einschätzung zur Attraktivität der am PC-Bildschirm dargebotenen Personen wurde

den Probanden Feedback in Form einer Zahl dargeboten, die ihnen zeigte, wie weit ihre eigene Einschätzung von der einer Vergleichsgruppe entfernt war. Bei der Hälfte der Trials wurde angezeigt, dass der Proband besser bewertet hatte und bei der anderen Hälfte, dass er schlechter bewertet hatte als die Vergleichsgruppe, wobei die dargebotenen Zahlen je nach Entfernung vom Durchschnitt gestaffelt waren. Es zeigten sich FRN-Potentiale bei Bildern, die von der Versuchsperson anders als von der angeblichen Vergleichsgruppe eingeschätzt wurden, wobei die Auslenkung der Amplituden direkt proportional zum rückgemeldeten Ausmaß des „Fehlers“ war. Hieraus ist zu erkennen, dass FRN-Potentiale und deren Morphologien bei Reaktion auf Feedback sich bei sozialen und kognitiven Aufgaben ähneln. Aus unseren Ergebnissen und denen von Kim et al. (2012) ist zu schließen, dass soziale Aufgaben offensichtlich genau wie nicht-soziale Tasks Fehlermonitoring aktivieren. Im Gegensatz zu der reaktionsgebundenen ERN ist bei der FRN keine Suggestion sozialer Zurückweisung durch Feedback notwendig, es reicht bereits die rückgemeldete neutrale Information, dass man sich in sozialer Hinsicht von einer Vergleichsgruppe unterscheidet, um das Fehlermonitoring zu beeinflussen.

In unserem Experiment wurde im Rahmen eines *within-designs* bei der Untersuchung der ERN exakt der gleiche Versuchsaufbau wie bei der FRN benutzt und das gleiche Feedback geboten. Fraglich bleibt, warum derselbe Fehler bei der ERN keine Auswirkungen hatte, wohl aber bei der FRN. Sicherlich spielt hier der zeitliche Zusammenhang der Präsentation bzw. der Wahrnehmung des Feedbacks durch den Probanden eine Rolle. Die FRN entsteht temporal gesehen als direkte Reaktion auf Feedback, wobei offensichtlich selbst rein informatives Feedback eine Modulation der Amplituden, also eine Beeinflussung des Fehlermonitorings hervorrufen kann (Kim et al., 2012). Die genaue Entstehung der ERN ist nicht abschließend geklärt, sie stellt jedoch keine direkte Reaktion auf Feedback dar, sondern eine Reaktion auf einen soeben begangenen Fehler, in der Erwartung eines Feedbacks, das schon bei den letzten Fehlern geboten wurde. Um eine Auswirkung auf die ERN-Amplituden wie bei der FRN zu erzielen, muss wie im Experiment von Boksem et al. (2011) während des Versuchs bereits vorher ein Feedback mit deutlicher negativer sozialer Komponente geboten worden sein. Eine Veränderung der ERN-Amplituden kommt dann möglicherweise durch Antizipation des bekannten aversiven Feedbacks zustande.

Insgesamt ist es durchaus möglich, dass von den beiden Korrelaten des Fehlermonitorings die FRN durch den zeitlichen Zusammenhang oder durch andere, bisher noch unklare Gründe stärker durch die Art des Feedbacks beeinflussbar ist als die ERN.

## 6.2 Zusammenhang der ERPs mit Persönlichkeitsvariablen

Unterschiede in der individuellen Fehlerwahrnehmung und -verarbeitung werden von Persönlichkeitseigenschaften in hohem Maße beeinflusst. Aus der Literatur zur ERN und FRN sind zahlreiche Studien bekannt, die Korrelate von Fehlermonitoring mit Persönlichkeitseigenschaften in Beziehung setzen. Viele dieser Experimente beinhalten motivationale Anreize, die selbst mit Persönlichkeitseigenschaften interagieren. Hierbei zeigte sich, dass beispielsweise der Grad der Sozialisierung (Dikman et al., 2000), Gewissenhaftigkeit und Neurotizismus (Pailing et al., 2004, Compton et al., 2010), Punktwerte im BIS/BAS (Boksem et al., 2006) sowie Verträglichkeit (Tops et al., 2006; Hajcak et al., 2005; Pailing & Segalowitz, 2004) mit oder ohne motivationale Anreize Einfluss auf ERN- und FRN-Amplituden haben können. Insbesondere hohe Werte im BIS (Carver & White, 1994) sowie hohe Ausprägungen von Verträglichkeit und Neurotizismus hatten bei Fehlern höhere ERP-Amplituden zur Folge (Boksem et al., 2006; Tops et al., 2006). Nicht nur Feedback über Gewinn und Verlust, sondern auch soziales Feedback kann moduliert durch Persönlichkeitseigenschaften Einfluss auf Korrelate der Fehlerverarbeitung haben. So beschäftigte sich eine FRN-Studie von Pfabigan et al. (2011) wie wir mit dem Zusammenhang von sozialem Feedback und Persönlichkeitseigenschaften unter Benutzung fazieller Stimuli: In einer Gruppe von gesunden männlichen und weiblichen Versuchspersonen präsentierten die Autoren Feedback über den Ausgang eines Wettspiels einmal in Form von Gesichtern und einmal in Form einer Zahl, die das Ausmaß des Gewinns oder Verlustes anzeigte. Die FRN-Amplituden waren wie in vielen anderen Untersuchungen zuvor nach negativem Feedback größer. Unter den Versuchspersonen hatten die Probanden mit antisozialen Tendenzen höhere FRN-Amplituden bei monetärem Feedback als bei sozial-emotionalem Feedback, was einen deutlichen Einfluss von Persönlichkeitseigenschaften bei der Verarbeitung von sozialem Feedback nahelegt. Zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen Persönlichkeitsmerkmalen der Probanden und der Ausprägung der ERPs an sich und in Abhängigkeit sozialen

Feedbacks wurden in der aktuellen Studie die Probanden hinsichtlich ihrer Ausprägung (hoch oder niedrig) der zu untersuchenden Persönlichkeitsvariablen in Gruppen eingeteilt. Es wurde dann mittels Varianzanalysen untersucht, ob sich die Amplituden der ERPs abhängig von Persönlichkeitseigenschaften bei sozialem bzw. fazialem Feedback unterscheiden. Wir erwogen, dass soziale Verträglichkeit und Neurotizismus die Reaktion auf Fehler dahingehend beeinflussen könnten, dass Fehler von hoch verträglichen und hoch neurotischen Personen eher ernst genommen werden und intensiver emotional verarbeitet werden müssen als von Personen mit weniger extremen Ausprägungen dieser Eigenschaften. Vor allem in einer sozialen Situation, für die die Probanden mit hohen Ausprägungen der genannten Persönlichkeitseigenschaften besonders sensibel sein müssten, müsste sich dies durch deutlichere ERP-Potentiale bemerkbar machen. Das gleiche nahmen wir für Personen mit einem zurückhaltenden, inhibierten Persönlichkeitstypus an, der sich durch hohe Punktwerte im BIS (Carver & White, 1994) auszeichnet. Wir vermuteten, dass die Überzeugung (ERN) bzw. die Rückmeldung (FRN), einen Fehler gemacht zu haben, auf eine Person mit hoher Ausprägung von sozialer Verträglichkeit und Inhibition vor allem in einer sozialen Situation stärker wirken würde, weshalb wir mit besonderem Interesse die Interaktion zwischen den Persönlichkeitseigenschaften und sozialem Feedback betrachteten.

#### 6.2.1 Zusammenhang ERN/FRN und Verträglichkeit

Das Verhalten von hoch verträglichen Personen im Umgang mit anderen Individuen zeichnet sich durch Nachgiebigkeit, Freimütigkeit, Bescheidenheit und Kooperationsbereitschaft aus. Weiterhin sind die Individuen mit hoher Ausprägung dieser Eigenschaft geprägt von Vertrauen und Altruismus gegenüber anderen. Personen mit niedrigen Verträglichkeitswerten zeichnen sich eher durch kompetitives als kooperatives Verhalten auf. Sie neigen zu Misstrauen gegenüber anderen Menschen und zu Egozentrismus (Amelang & Bartussek, 2001).

Entsprechend einer unserer Haupthypothesen ergab sich sowohl für die ERN als auch für die FRN eine signifikante Interaktion der Feedback-Bedingung mit der Persönlichkeitseigenschaft Verträglichkeit: Es bestand ein gegenläufiger Einfluss des Feedback-Faktors zwischen den hoch und den niedrig verträglichen Probanden. In der Gruppe der hoch verträglichen Probanden zeigte sich der Einfluss sozialen Feedbacks im Sinne von stärker negativen ERN- und FRN-Amplituden deutlicher als

bei den wenig verträglichen. Dies bedeutet, dass sich Personen, die bestrebt sind, sich in ihrem sozialen Umfeld möglichst ohne Konflikte zu bewegen, im Vergleich zu Personen, die dem indifferenten gegenüberstehen, von sozialem Feedback wesentlich mehr beeinflussen lassen als von neutralem Feedback. Es untermauert die Ergebnisse von Pfabigan et al. (2012), die in ihrem Experiment bei Versuchspersonen mit antisozialen Tendenzen höhere FRN-Amplituden bei monetärem Feedback als bei sozial-emotionalem Feedback fanden. Antisoziale Personen verfügen höchstwahrscheinlich nicht über ein hohes Maß an sozialer Verträglichkeit, so hatte es offensichtlich weniger Einfluss auf das Fehlermonitoring der wenig verträglichen Personen, wenn durch Fotos menschlicher Gesichter sozial-emotionales Feedback geboten wurde, als wenn sie einen monetären Verlust erlitten. Zu beachten ist, dass sich dieser Effekt nicht nur bei der FRN, sondern auch bei der ERN zeigte, bei der sich anfangs für die Gesamtgruppe ohne Berücksichtigung von Persönlichkeitseigenschaften kein Unterschied der Amplituden bei sozialem vs. abstraktem Feedback gezeigt hatte. Es liegt also im aktuellen Experiment ein deutlicher Einfluss der Feedback-Art auf die Amplituden beider ERPs in Abhängigkeit der Persönlichkeitseigenschaft Verträglichkeit vor, was bedeutet, dass soziales Feedback bei Personen mit hoher Ausprägung einer sozialen Persönlichkeitseigenschaft deutlich mehr Einfluss auf die Verarbeitung begangener Fehler hat.

#### 6.2.2 Zusammenhang ERN/FRN und Neurotizismus

Neurotizismus oder emotionale Labilität beschreibt einen Persönlichkeitstypus, der sich durch Ängstlichkeit, Traurigkeit und Unsicherheit auszeichnet. Geprägt ist das Verhalten hoch neurotischer Personen durch Irritierbarkeit, Impulsivität und Vulnerabilität. Durch Cattell wurde der Faktor als Angstfaktor bezeichnet (Henning, 2005).

Für die FRN zeigte sich lediglich ein Effekt der Elektrodenposition. Die Amplituden unterschieden sich an den verschiedenen Elektrodenpositionen, es zeigten sich jedoch keine Einflüsse der Feedback-Art, der untersuchten Persönlichkeitseigenschaft oder Interaktionen der beiden Variablen. Bei der ERN fand sich neben dem Positionseffekt ein tendenzieller Effekt der Feedbackbedingung an einer der beiden Elektrodenpositionen in der Probandengruppe mit hoher

Ausprägung von Neurotizismus. Nach Bonferroni-Korrektur war dieser Effekt aber nicht mehr signifikant.

Neurotizismus hat eine weniger soziale Komponente als Verträglichkeit. Bei unseren theoretischen Überlegungen erwarteten wir, dass sich ein Einfluss des Feedbacks zeigen könnte, weil hoch neurotische Personen eine schlechte Bewertung durch andere soziale Wesen fürchten. Offensichtlich reagierten sie aber in der gleichen Art und Weise wie auch bei abstraktem Feedback. Weiterhin zeigten sich zumindest in unserem Experiment bei hoch neurotischen im Gegensatz zu wenig neurotischen Personen keine höheren ERN- oder FRN-Amplituden nach Fehlern. Im Grunde passt diese Erkenntnis zu unseren vorherigen Ergebnissen, da die Persönlichkeitseigenschaft Verträglichkeit einen viel stärkeren Bezug zu interpersonellem und sozialem Verhalten hat als Neurotizismus, der sich eher auf Eigenschaften bezieht, die das Individuum selbst betreffen. Unser Experiment hat gezeigt, dass hochgradig soziale Menschen empfänglicher für Feedback mit sozialen Stimuli sind. Ein Neurotiker kann also durchaus eine schlechte Bewertung fürchten und mit erhöhten ERP-Amplituden auf einen Fehler reagieren, dies geschieht aber unabhängig vom Feedback, da es nicht auf seine Persönlichkeitseigenschaften zugeschnitten ist.

### 6.2.3 Zusammenhang ERN/FRN und BIS

Für die ERN zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt der Gruppenzugehörigkeit. Hier waren signifikant höhere ERN-Amplituden in der Gruppe mit geringen BIS-Werten nachzuweisen als in der Gruppe mit hohen BIS-Werten. Dies war an Elektrodenposition Cz besonders deutlich. Dieser Effekt war deutlich signifikant und steht unseren Erwartungen bezüglich der Ergebnisse konträr gegenüber. Wir hatten ursprünglich erwartet, dass Personen mit hohem BIS-Punktwert bei Fehlern höhere ERPs aufweisen würden als die mit niedriger Ausprägung und dass dies noch von sozialem Feedback verstärkt werden würde. Unsere Erwartung basierte auf den Ergebnissen einer Studie von Boksem et al. (2006), die bei hoch-BIS Probanden höhere ERN-Amplituden fanden und dies auf eine Dominanz reaktiver Kontrolle zurückführten. Laut den Autoren erhöht bei Menschen mit hoher negativer Affektivität und hoher Bestrafungssensitivität die Angst vor sozialer Bewertung task engagement (Tops et al., 2006) und führt dadurch zu höheren Amplituden. Da wir auf Grundlage dieses Ansatzes eine unserer Haupthypothesen bildeten, ist dieses Ergebnis eher

überraschend. Eine Interaktion zwischen Ausprägung der Persönlichkeitseigenschaft und ERN trat nicht auf.

Bei der FRN zeigte sich kein Unterschied der Amplituden abhängig von der Ausprägung der untersuchten Persönlichkeitseigenschaft. Hier fand sich lediglich der bereits bekannte Effekt der Feedback-Art, der in der neutralen Versuchsbedingung deutlich kleinere FRN-Amplituden hervorrief als in der Bedingung mit Gesichterfeedback. Eine Interaktion der Feedback-Art mit der individuellen Ausprägung der Persönlichkeitseigenschaft so wie bei der Untersuchung der Variable Verträglichkeit fand sich wie bei der ERN auch hier nicht.

## 6.3 Einfluss der Stimmung auf die Maße der Fehlerverarbeitung

### 6.3.1 Entwicklung der Stimmung im Experiment

Zur Bewertung des Einflusses der Stimmung während des Experiments wurden die Ergebnisse der PANAS zu den drei Messzeitpunkten (MZP) vor Beginn des Experiments, nach dem ersten Block und nach dem zweiten Block herangezogen. Es zeigte sich eine signifikante Abnahme positiver Stimmung vom ersten zum zweiten und vom zweiten bis zum dritten MZP. Auch an Verhalten und Kommentaren der Probanden nach dem Experiment war zu merken, dass der relativ lange Versuch mit einer repetitiven Aufgabe von den Teilnehmern als aversiv empfunden wurde und zu einer deutlichen Eintrübung möglicherweise zuvor vorhandener positiver Stimmung führte. Auch bei negativer Stimmung, gemessen durch die negativen Items der PANAS, zeigte sich eine tendenzielle Abnahme der Werte, die jedoch bei Notwendigkeit der Anpassung des Signifikanzniveaus keine Signifikanz erreichte. Hieraus ist zu schließen, dass die Abnahme positiver Stimmung nicht mit einer Zunahme negativer Stimmung einherging. Eine mögliche Erklärung für die Abnahme der positiven Stimmung bei gleichbleibender bzw. tendenziell abnehmender negativer Stimmung wäre die Entwicklung einer gewissen Gleichgültigkeit gegenüber der Testsituation und möglicherweise auch die Ermüdung der Probanden durch die repetitive Testaufgabe (*task disengagement*, Tops et al., 2006). ERN- und FRN-Experimente beinhalten meist lange Versuche mit wenig abwechslungsreichen Aufgaben und sind für die Probanden anstrengend, weswegen die Reduktion ausgeprägter positiver oder negativer Gefühle und die Entwicklung von Indifferenz nicht verwunderlich ist.

### 6.3.2 Zusammenhang zwischen Stimmung und Maßen der Fehlerverarbeitung

In verschiedenen Experimenten, in denen die Autoren beispielsweise durch die Präsentation von emotionalen Bildern oder auf andere Art und Weise (Wiswede, 2009a, 2009b, 2009c) negativen und positiven Affekt in ihren Probanden induziert hatten, fanden sich höhere ERN-Amplituden nach Fehlern, die in negativer Stimmung und bei längerfristig negativem Affekt begangen wurden (Hajcak, McDonald & Simons, 2003a; 2004). Auch Luu et al. (2000) fanden höhere ERN-Amplituden bei negativem Affekt und negativer Emotionalität. Im Einklang mit der Studienlage ergab sich in unserem Experiment ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen der Amplitudenhöhe der ERN und negativer Stimmung nach abstraktem Feedback an beiden betrachteten Elektrodenpositionen. Schlechte Stimmung und Fehlermonitoring waren hier also miteinander verknüpft. Bei der FRN trat dieser Effekt nicht auf. Erstaunlich ist, dass der Zusammenhang lediglich für das neutrale Feedback zu beobachten war und nicht für das faziale. Bei fazialem Feedback waren schlechte Stimmung und ERN-Amplituden bei Fehlern unabhängig voneinander, die Probanden reagierten unabhängig von ihrer Stimmung auf die Stimuli. Wie bereits weiter oben berichtet, hatte faziales Feedback höhere FRN-Amplituden zur Folge als neutrales. Für die ERN konnte dies nicht beobachtet werden, hier unterschieden sich die Amplituden nach fazialem und abstraktem Feedback nicht. Möglicherweise wird ein modulierender Effekt bei der ERN erst nach Berücksichtigung der Stimmung offenbar. Dieser bezieht sich allerdings lediglich auf das neutrale Feedback, wobei wir aufgrund der bereits gewonnenen Erkenntnisse eher einen Effekt sozialen Feedbacks erwartet hätten, so wie er sich bei der FRN gezeigt hat. Möglicherweise hat bei schlechter Stimmung ein Minuszeichen doch andere bzw. stärkere Auswirkungen auf das Fehlermonitoring als ein Gesicht. Weder in der Kontroll- noch in der Experimentalbedingung ergaben sich signifikante Korrelationen zwischen positiver Stimmung und den ERN-Amplituden, was nahelegt, dass in schlechter Stimmung Fehlermonitoring anders funktioniert als in guter und dass faziales Feedback anders wirkt als neutrales. Das gleiche galt für beide Subskalen der PANAS und die FRN-Amplituden. Auch zwischen PANAS-Scores und Pe zeigten sich keinerlei Zusammenhänge.

Insgesamt hatte die Stimmung der Probanden keinerlei Auswirkungen auf FRN und Pe. Einerseits widerspricht dies unseren hypothetischen Überlegungen und der bisherigen Studienlage. Andererseits zeigt es, dass schlechte Stimmung durch die

langweilige Aufgabe oder durch andere, vom Experiment unabhängige Einflüsse zumindest im aktuellen Experiment bezüglich FRN und Pe keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte und man den Effekt der von uns experimentell manipulierten Einflüsse auf die FRN ohne den störenden Einfluss der Stimmung beurteilen kann. Auch Müdigkeit und Distanzierung der Probanden vom Versuch, die sich durch die Abnahme positiver wie negativer PANAS Scores zeigte, haben offensichtlich keinen Einfluss auf diese Testergebnisse. Dies bestätigt die Robustheit und Reproduzierbarkeit der FRN als Korrelat des Fehlermonitorings, die bereits von anderen Autoren beschrieben wurde (Weinberg & Hajcak, 2011; Segalowitz et al., 2010).

## 6.4 Methodische Probleme

### 6.4.1 Geschlechtseffekte

In unserem Experiment wurden in der Testaufgabe emotionale Gesichter von Vertretern beider Geschlechter als faziale Stimuli präsentiert. Frauen bekamen weibliche Stimuli und männliche Versuchspersonen männliche Gesichter als Feedback dargeboten. Auf diese Art und Weise versuchten wir, Geschlechtseffekte und Effekte von Attraktivität zu vermeiden. Wenn allerdings nicht für alle getesteten Personen mit dem gleichen Stimulus gearbeitet wird, beeinträchtigt dies sowohl Standardisierung als auch interne Validität des Experiments. In zukünftigen Studien könnten beiden Geschlechtern abwechselnd weibliche und männliche Gesichter, oder möglicherweise mehrere verschiedene Gesichtsstimuli beider Geschlechter präsentiert werden, um sicher zu stellen, dass Effekte durch die experimentelle Manipulation, und nicht durch spezielle Eigenschaften bestimmter Gesichter oder durch Geschlechtseffekte hervorgerufen werden.

### 6.4.2 Sozial-evaluative Situation

Ob eine soziale-evaluative Situation wirklich durch die reine Präsentation von Fotos generiert werden kann, ist bereits von vielen Autoren diskutiert worden. In verschiedenen Studien fand man Ergebnisse, die darauf schließen lassen, dass dies funktioniert (z.B. Kim et al., 2011). Ein realistischeres Setting wird selbstverständlich, wie schon in der Einleitung erwähnt, durch die Anwesenheit einer realen Person gebildet. Hier muss allerdings auch beachtet werden, dass Interaktion mit einem

Versuchsleiter selten in einer wirklich komplett standardisierten Art und Weise ablaufen kann.

#### 6.4.3 Länge des Versuchs

Für die statistischen Auswirkungen ist eine gewisse Anzahl von Trials notwendig. Insgesamt dauerte unser Experiment bis zu 2 Stunden, in denen die Versuchspersonen neben der repetitiven Aufgabe die Prozedur der Anbringung der EEG-Elektroden und eine Blutentnahme über sich ergehen lassen mussten. Erstaunlicherweise hatte dies nur wenige Auswirkungen auf die Entwicklung negativer Stimmung, vor allem bei der FRN. Natürlich ist die Betrachtung der Zusammenhänge der ERN-Amplituden mit der Stimmung der Versuchspersonen im vorliegenden Experiment von speziellem Interesse, allerdings könnte man durch eine Verkürzung der Versuchszeit Ergebnisse erhalten, die weniger von *task disengagement* und Langeweile beeinflusst sind.

#### 6.5 Fazit

Insgesamt wird durch die Ergebnisse unserer Studie deutlich, dass auch soziale Stimuli Informationen über Leistungen vermitteln können und von den Individuen teilweise sogar stärker wahrgenommen werden als Feedback durch abstrakte Zeichen. Die Bewertung der individuellen Leistung, die aus den Gesichtern gelesen werden konnte, rief offensichtlich bei den Versuchspersonen eine Veränderung ihrer Fehlerverarbeitung hervor. Unter Berücksichtigung bestimmter Persönlichkeitseigenschaften zeigte sich dies sogar noch deutlicher, was impliziert, dass individuelles Feedback bei den passenden Empfängern auf fruchtbaren Boden fällt: Sozial verträgliche Menschen reagierten in unserem Experiment deutlich mehr auf soziales Feedback als weniger sozial verträgliche. Bei hohen Ausprägungen von Neurotizismus, einer Eigenschaft, die weniger Bezug zu interpersonellem Verhalten hat, zeigte sich dies nicht. Auch bei Probanden mit einer hohen Sensitivität Bestrafung, einer Eigenschaft, die hoch mit Neurotizismus korreliert (Boksem et al., 2006) und sich ebenfalls nur in geringem Maße auf interpersonelles Verhalten bezieht, hatte soziales Feedback keinen speziellen Einfluss.

Diese Ergebnisse implizieren, dass es sinnvoll ist, bei der Gabe von Feedback Persönlichkeitseigenschaften zu berücksichtigen. Individualisiertes Feedback, das zu den Persönlichkeitseigenschaften eines Individuums passt, kann Fehlermonitoring

positiv beeinflussen, welches essentiell für menschliche Verhaltensanpassung und die Vermeidung zukünftiger Fehler, also für das Lernen aus Fehlern ist.

In zukünftigen Studien müsste bei Fehlern individualisiertes und zu Persönlichkeitseigenschaften passendes Feedback geboten werden und überprüft werden, ob dies nicht nur zu verändertem, sondern zu besserem Fehlermonitoring und somit zu besserem Lernen und einer Reduktion von Fehlern führt.

## 7. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie war es, durch Betrachtung ereigniskorrelierter Potentiale in einer sozial-evaluativen Situation herauszufinden, welchen Einfluss der soziale Kontext auf die kognitive und emotionale Verarbeitung von Fehlern hat, und wie dieser Einfluss durch Persönlichkeitsmerkmale moduliert wird.

*Action monitoring* ist ein Aspekt kognitiver Kontrolle, als dessen elektrophysiologische Korrelate u.a. die *Error-related negativity* (ERN) und die *Feedback related negativity* (FRN) gelten. Es handelt sich um negative Potentialänderungen nach Fehlern in EEG-Experimenten. Als Ursprung der Potentiale gilt der Anteriore Cinguläre Cortex (ACC), wobei auch der Supplementär motorische Cortex (SMA), der präfrontale Cortex und die Basalganglien bei der Entstehung involviert sind. Die funktionelle Bedeutung der ERN ist nicht abschließend geklärt. Sie wird von einigen Autoren als Korrelat eines allgemeinen Fehlererkennungssystems (*generic error detection system*) und von anderen als Mechanismus zur Fehler- oder Antwortkonfliktsuche und zur Fehlerkorrektur interpretiert. Die *Reinforcement Learning Theory* bringt die ERN mit der Aktivität des mesencephalen Dopaminsystems in Zusammenhang. Modulierenden Einfluss auf die Amplituden der ERPs haben z.B. psychiatrische Erkrankungen (Depression, Schizophrenie, Angst-, Zwangs-, und antisoziale Störungen) sowie die momentane Stimmung der Probanden. An Persönlichkeitseigenschaften haben laut Studienlage u.a. ein zurückhaltender Persönlichkeitstypus und eine hohe Ausprägung von Neurotizismus sowie von Verträglichkeit höhere Amplituden von ERPs zur Folge. Motivationale Anreize wirken in Interaktion mit diesen Persönlichkeitseigenschaften. Im vorliegenden Experiment wurden soziale Stimuli als Feedback genutzt, um die Testsituation mit einer sozial-evaluativen Komponente zu versehen. Im Gegensatz zu bisherigen Studien wurde diese nicht durch Interaktion mit einem Versuchsleiter sondern durch Präsentation von Fotos emotionaler Gesichter generiert. Wir erwarteten höhere ERP-Amplituden bei sozialem als bei abstraktem Feedback. Dies sollte sich vor allem bei hoch sozial verträglichen und neurotischen Probanden mit hoher Bestrafungssensibilität zeigen. Weiterhin erwarteten wir einen Einfluss der momentanen Stimmung der Versuchspersonen im Sinne von höheren Amplituden in negativer Stimmung.

56 gesunde Versuchspersonen (26 Frauen) im Alter zwischen 20 und 48 Jahren führten einen modifizierten Flanker Task am PC aus, bei dem nach Fehlern in der neutralen Versuchsbedingung abstrakte Zeichen (richtig: +, falsch: –, zu langsam: !) und in der experimentellen Bedingung Fotos emotionaler Gesichter (richtig: lachendes/freundliches Gesicht, falsch: trauriges Gesicht, zu langsam: neutrales Gesicht) als Feedback präsentiert wurden. Das Geschlecht des Stimulus entsprach dem Geschlecht der jeweiligen Versuchsperson. Es wurde mit einem within-groups design gearbeitet. Abhängige Variablen waren die Amplituden der ERN-Potentiale im EEG an Position FCz und Cz (ERN) und an Fz, Cz sowie FCz (FRN). Potentialänderungen in der Zeit von 100 ms vor der Reaktion bis 850 ms danach wurden berücksichtigt. Unabhängige Variablen waren die Punktwerte der Probanden in den Skalen *Verträglichkeit* und *Neurotizismus* im NEO-FFI und im Behaviour Inhibition System (BIS) sowie deren momentane Stimmung. Wir rechneten Varianzanalysen, um den Zusammenhang zwischen ERP-Amplituden, Feedback und Persönlichkeitseigenschaften zu beleuchten und Varianzanalysen mit Messwiederholung, um die Entwicklung der Stimmung zu beurteilen. Teilweise wurde mit Mediansplits gearbeitet. Das  $\alpha$ -Niveau wurde auf 0.05 festgelegt.

Es zeigten sich deutliche ERN- und FRN-Potentiale nach Fehlern. Bei der ERN gab es keine Auswirkungen des Feedbacks auf die Amplituden, bei der FRN waren die Amplituden wie erwartet nach fazialem Feedback größer als bei neutralem. Bei beiden ERPs zeigte sich gleichermaßen eine signifikante Interaktion der Faktoren *Feedback* und *Verträglichkeit*. Neurotizismus und der Punktwert im BIS zeigten entgegen unseren Erwartungen keinen Zusammenhang mit ERP-Amplituden. Der positive Affektwert nahm während des Experiments signifikant ab, für die negativen PANAS-Werte zeigte sich eine signifikant positive Korrelation mit der ERN-Amplitude nach neutralem Feedback.

Vorliegen und Morphologie der ERN- und FRN-Potentiale im Experiment bestätigen die Befunde zum Fehlermonitoring aus der bisherigen Literatur. Die Abnahme der positiven wie negativen Stimmung führen wir auf eine sich langsam entwickelnde Indifferenz gegenüber der Aufgabe zurück (task disengagement). Die Präsentation von traurigen statt missbilligenden Gesichtern als negative Feedbackstimuli könnte eine Erklärung für das Ausbleiben des Effekts von sozialem Feedback bei der ERN darstellen. Offensichtlich hat wertender, normativer Einfluss mit deutlicher negativer Konnotation mehr Wirkung auf ERN-Amplituden als informativer. Bei der FRN

hingegen rief soziales Feedback auch ohne die Suggestion sozialer Zurückweisung deutlich höhere Amplituden hervor als neutrales. Dies geschieht eventuell durch den engeren zeitlichen Zusammenhang zwischen der Präsentation des Feedbacks und dem ERP. Dass dieses Feedback am besten entsprechend den Persönlichkeitseigenschaften eines Individuums präsentiert werden sollte, zeigte sich durch die Interaktion zwischen *Verträglichkeit* und *Feedback* in den Varianzanalysen für beide ERPs: Feedback mit sozialer Komponente hatte bei Probanden mit hoher Ausprägung einer sozialen Persönlichkeitseigenschaft mehr Wirkung auf das Fehlermonitoring. Bei Neurotizismus und hohen BIS-Werten, zwei Eigenschaften, die die hoch miteinander korrelieren und sich weniger auf soziales Verhalten beziehen als *Verträglichkeit*, trat dieser Effekt nicht auf. Insgesamt zeigte sich im Experiment, dass so wie kognitive auch soziale Fehler Fehlermonitoring in Gang setzen können und dass dies durch die Ausprägung bestimmter Persönlichkeitseigenschaften moduliert wird. Ob die höheren Amplituden der ERPs durch individuelles Feedback Ausdruck eines besseren Lerneffekts sind oder zu diesem führen, muss durch Experimente mit individuell zu den Persönlichkeitseigenschaften der Probanden passendem Feedback weiter erforscht werden.

## 8. Literatur

- Aarts, K., Pourtois, G. (2010). Anxiety not only increases, but also alters early error-monitoring functions. *Cognitive, Affective & Behavioural Neuroscience*, 10: 479–492.
- Alain, C., McNeely, H. E., He, Y., Christensen, B. K. & West, R. (2002). Neurophysiological evidence of error-monitoring deficits in patients with schizophrenia. *Cerebral Cortex*, 12, 840–846.
- Amelang, M. & Bartussek, D. (2001). *Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*. Stuttgart: Kohlhammer
- Amelang, M., Bartussek, D., Stemmler, G. & Hagemann, D. (2006). *Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*. (6. Auflage). Stuttgart: Kohlhammer.
- Anisi, J., Majdiyan, M., Joshanloo, M., Ghoharikamel, Z. (2011). Validity and reliability of NEO Five-Factor Inventory (NEO-FFI) on university students. *Journal of behavioural sciences*, 5(4): 17-18.
- Arbel, Y., & Donchin, E. (2009). Parsing the Componential Structure of Post Error ERPs: A Principal Component Analysis of ERPs following errors. *Psychophysiology*, 46(6), 1288-1298.
- Arbel, Y., Donchin, E. (2011). How large the sin? A study of the event related potentials elicited by errors of varying magnitude. *Psychophysiology*, 48 (2011), 1611–1620.
- Aviezer, H., Hassin, R., Bentin, S. & Trope, Y. (2008). *Putting facial expressions back in context*. New York: Guilford Press, 255-288.
- 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, 1454-63.
- Beck, A. T., Ward, C. H., Mendelson, M., Mock, J. & Erbaugh, J. (1961). "An inventory for measuring depression". *Archives of General Psychiatry*, 4 (6): 561–71.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E. & McCarthy G (1996). Electrophysiological studies of face perception in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 8:551-565.
- Bernstein, P. S., Scheffers, M. K., Coles, M. G. H. (1995). "Where Did I Go Wrong?" A Psychophysiological Analysis of Error Detection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 21, No. 6; 1312-1322.

- Boksem, M. A. S., Tops, M., Wester, A. E., Meijman, T. F. & Lorist, M. M. (2006). Error related ERP components and individual differences in punishment and reward sensitivity. *Brain Research* 1101, 92–101.
- Boksem, M. A. S., Tops, M., Kostermans, E. & De Cremer, D. (2008). Sensitivity to punishment and reward omission: Evidence from error-related ERP components. *Biological Psychology*, 79, 185-192.
- Boksem, M.A.S., Ruys, K.I., Aarts, H. (2011) Facing disapproval: Performance monitoring in a social context. *Social Neuroscience*, 6(4), 360-368.
- Borkenau, P. & Ostendorf, F. (1993). *NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI) nach Costa und McCrae* (S. 5-10, 27-28). Göttingen: Hogrefe.
- 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.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D. & Carter, C. S. (2004) Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12):539-46.
- Bush, G., Luu, P. & Posner, M. I. (2000) Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Science*; 4:215 – 22.
- 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.
- Carter, C. S., MacDonald, A. W., Ross, L. L. & Stenger, V. A. (2001). Anterior cingulate cortex activity and impaired self-monitoring of performance in patients with schizophrenia: an event-related fMRI study. *American Journal of Psychiatry*, 158: 1423±8.
- Carter, C. & Van Veen, V. (2007). Anterior cingulate cortex and conflict detection: An update of theory and data. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 7 (4), 367-379.
- Carver, C. S. & White, T. L. (1994). Behavioral inhibition, behavioral activation, and affective responses to impending reward and punishment: the BIS/BAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*. 67 (2), 319–333.
- Cavanagh, J. F., & Allen, J. J. B. (2008). Multiple aspects of the stress response to social evaluative threat: An electrophysiological investigation. *Psychoneuroendocrinology*, 33, 41-53.
- Chiu, P. H., & Deldin, P. J. (2007). Neural evidence for enhanced error detection in major depressive disorder. *American Journal of Psychiatry*, 164(4), 608–616.
- Coles, M. G. H. (1988). Modern mind-brain reading: psychophysiology, physiology and cognition. *Psychophysiology*, 26: 251-269.

- Coles, M. G. H., Scheffers, M. K. & Fournier, L. R. (1995). Where did you go wrong? *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.
- Compton, R. J., Dainer-Best, J., Fineman, S. L., Freedman, G., Mutso, A., & Rohwer, J. (2010). Anxiety and expectancy violations: Neural response to false feedback is exaggerated in worriers. *Cognition & Emotion*, 24(3), 465-479.
- Costa, P. T. & McCrae, R. R. (1992). Revised NEO Personality Inventory (NEO PI-R) and NEO Five Factor Inventory. *Professional Manual*. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.
- Costa, P. T. & McCrae, R. R. (2008). The revised NEO personality inventory (NEO-PI-R). In G. J. Doyle, G. Matthews & D. H. Saklofske (Eds.), *The Sage handbook of personality theory and assessment. Vol. 2: Personality measurement and testing* (pp. 508-528). Los Angeles: Sage.
- Critchley, H. D., Tang, J., Glaser, D., Butterworth, B. & Dolan, R. J. (2005). Anterior cingulate activity during error and autonomic response. *Neuroimage*;27:885–895.
- De Bruijn, E. R. A., Hulstijn, W., Verkes, R. J., Ruigt, G. S. F. & Sabbe, B. G. C. (2004). Drug induced stimulation and suppression of action monitoring in healthy volunteers. *Psychopharmacology* 177: 151–160.
- De Bruijn, E. R. A., Sabbe, B. G. C., Hulstijn, W., Ruigt, G. S. F. & Verkes, R. J. (2006). Effects of antipsychotic and antidepressant drugs on action monitoring in healthy volunteers. *Brain Research* 1105: 122–129.
- Dehaene, S., Posner, M. I. & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303–305.
- Derogatis, L. R., Lipman, R. S., Rickels, K., Uhlenhuth, E. H., & Covi, L. (1974). The Hopkins Symptom Checklist. In P. Pichot (Ed.), *Psychological Measurements in Psychopharmacology* (pp. 79-110). Karger: Basel.
- Devinsky, O., Morrell, M. J. & Vogt, B. A. (1995). Contributions of anterior cingulate cortex to behavior. *Brain* 118:279–306.
- Dickerson, S. S. & Kemeny, M. E. (2004). Acute Stressors and Cortisol Responses: A Theoretical Integration and Synthesis of Laboratory Research. *Psychological Bulletin*, Vol. 130, No. 3, 355–391.
- Dickerson, S. S., Gruenewald, T. L., & Kemeny, M. E. (2004). When the social self is threatened: Shame, physiology, and health. *Journal of Personality*, 72, 1191–1216.

- Dien, J., Spencer, K. M. & Donchin, E. (2003). Localization of the event related potential novelty response as defined by principal components analysis. *Cognitive Brain Research*, 17:637–650.
- Dikman, Z. V. & Allen, J. B. (2000). Error monitoring during reward and avoidance learning in high- and low-socialized individuals. *Psychophysiology*, 37, 43–54.
- Doñamayor, N., Marco-Pallarés, J., Heldmann, M., Schoenfeld, M. A. & Münte, T. F. (2011). Temporal Dynamics of Reward Processing Revealed by Magnetoencephalography. *Human Brain Mapping*, 32:2228–2240.
- Drevets, W. C. & Raichle, M. E. (1998). Reciprocal suppression of regional cerebral blood flow during emotional versus higher cognitive processes: implications for interactions between emotion and cognition. *Cognition & Emotion*; 12: 353±85.
- Ehlis, A.-C., Herrmann, M. J., Bernhard, A. & Fallgatter, A.J. (2005). Monitoring of internal and external error signals. *Journal of Psychophysiology*. Vol. 19 (4), 2005, 263-269.
- Ehlis, A.-C., Herrmann, M. J., Pauli, P., Stoeber, G., Pfuhlmann, B. & Fallgatter, A. J. (2007). Improvement of prefrontal brain function in endogenous psychoses under atypical antipsychotic treatment. *Neuropsychopharmacology*, 32, 1669-1677.
- Ekman, P. & Friesen, W. V. (1971) Constants Across Cultures In The Face And Emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, 17, 124-129.
- Elliott, R., Sahakian, B. J., Michael, A., Paykel, E. S., & Dolan, R. J. (1998). Abnormal neural response to feedback on planning and guessing tasks in patients with unipolar depression. *Psychological Medicine*, 28(3), 559–571.
- Endrass, T., Klawohn, J., Gruetzmann, R., Ischebeck, M., & Kathmann, N. (2012). Response-related negativities following correct and incorrect responses: Evidence from a temporospatial principal component analysis. *Psychophysiology*, 49 (6), 733-743.
- Eriksen, B. A. & Eriksen, C. W. (1974). "Effects of noise letters upon identification of a target letter in a non- search task". *Perception and Psychophysics*, 16: 143–149
- Eysenck, H. J., & Eysenck, S. B. G. (1975). *Manual of the Eysenck Personality Questionnaire*. Sevenoaks, Kent: Hodder and Stoughton.
- Eysenck, S. B. G, Garcia-Sevilla, L., Torrubia, R., Ávila, C. & Ortet, G. (1992) Versió catalana de l'EPQ per a adults: un instrument per a la mesura de la personalitat (Catalan version of the EPQ for adults: a tool for the measurement of personality).
- 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:

- Brunia, C. H. M., Gaillard, A. W. K., Kok, A. (Eds.), *Psychophysiological Brain Research* (pp. 192–195). Tilburg University Press, Tilburg.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J. & Hoormann, J. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components: II. Error processing in choice reaction time tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78, 447–455.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J. & Hoormann, J. (1995). Event-related potentials correlates of errors in reaction tasks. In: Karmos, G., Molnar, M., Csepe, V., Czigler, I., Desmedt, J.E. (Eds.), *Perspectives of Event-Related Potentials Research* (pp. 287–296). Amsterdam: Elsevier.
- 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 Research* (pp. 579–585). Amsterdam: Elsevier.
- 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., Christ, S. & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology* 51 (2000) 87–107.
- Falkenstein, M., Hielscher, H., Dziobek, I., Schwarzenau, P., Hoormann, J., Sundermann, B. & Hohnsbein, J. (2001). Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: an ERP study. *NeuroReport*, 12, 157-161.
- Falkenstein, M., Hoormann, J. & Hohnsbein, J. (2001). Changes of error-related ERPs with age. *Experimental Brain Research*, 138:258-62.
- Falkenstein, M., Willemsen, R., Hohnsbein, J. & Hielscher, H. (2005). Error processing in Parkinson's disease. The error positivity (Pe). *Journal of Psychophysiology*, 19(4), 305-310.
- Farah, M. J., Wilson, K. D., Drain, M. & Tanaka, J. N. (1998). What is "special" about face perception? *Psychological Review*, Vol 105 (3), Jul 1998, 482-498.
- Foti, D., Weinberg, A., Dien, J. & Hajcak, G. (2011). Event-Related Potential Activity in the Basal Ganglia Differentiates Rewards from Nonrewards: Temporospatial Principal Components Analysis and Source Localization of the Feedback Negativity. *Human Brain Mapping* 32:2207–2216.
- 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.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385–390.

- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1995). A brain potential manifestation of error-related processing. In G. Karmos, M. Molnar, V. Csepe, I. Czigler, & J. E. Desmedt (Eds.), *Perspectives of event-related potentials research* (EEG Suppl. 44) (pp. 261–272). Amsterdam: North-Holland/Elsevier Science.
- Gehring, W. J., Himle, J., & Nisenson, L. G. (2000). Action-monitoring dysfunction in obsessive–compulsive disorder. *Psychological Science*, 11(1), 1–6.
- Gehring, W. J. & Knight, R. T. (2000). Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*. 2000 May;3(5):421-3.
- Gehring, W. J. & Fencsik, D. E. (2001). Functions of the medial frontal cortex in the processing of conflict and errors. *Journal of Neuroscience*, 21, 9430–9437.
- Gehring, W. J. & Willoughby, A. R. (2002). The Medial Frontal Cortex and the Rapid Processing of Monetary Gains and Losses. *Science*, Vol. 295, No. 5563. (22 March 2002), pp. 2279-2282.
- Gilbert, P. (1997). The evolution of social attractiveness and its role in shame, humiliation, guilt and therapy. *British Journal of Medical Psychology*, 70, 113–147.
- Gough, H. G. 1957. *Manual for the California Psychological Inventory*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Goyer, J. P., Woldorff, M. G., & Huettel, S. A. (2008). Rapid electrophysiological brain responses are influenced by both valence and magnitude of monetary rewards. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 2058–2069).
- Gratton, G., Coles, M. G. H. (1989). Generalization and evaluation of eye-movement correction procedures. *Journal of Psychophysiology*, 3. 1–50.
- Gray, J. A. (1981). A critique of Eysenck's theory of personality. H.J Eysenck (Ed.). *A model for personality*, New York: Springer, pp. 246–276.
- Gray, J.A., 1987. The neuropsychology of emotion and personality. In: Stahl, S.M., Iverson, S.D., Goodman, E.C. (Eds.). *Cognitive Neurochemistry*. Oxford: Oxford Univ. Press, pp. 171–190.
- Gray, J.A., 1989. Fundamental systems of emotion in the mammalian brain. In: Palermo, D.S. (Ed.). *Coping with Uncertainty: Behavioral and Developmental Perspectives*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, pp. 173–195.
- Hajcak, G., & Simons, R. F. (2002). Error-related brain activity in obsessive–compulsive undergraduates. *Psychiatry Research*, 110(1), 63–72.
- Hajcak, G., McDonald, N. & Simons, R. F. (2003). Anxiety and error-related brain activity. *Biological Psychology*, 64(1–2), 77–90.

- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. F. (2004). Error-related psychophysiology and negative affect. *Brain and Cognition*, 56, 189–197.
- Hajcak, G., Holroyd, C. B., Moser, J. S., & Simons, R. F. (2005a). Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes. *Psychophysiology*, 42, 161–170.
- Hajcak, M., Moser, J. S., Yeung, N. & Simons, R. F. (2005b). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, 42 (2005), 151–160.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biological Psychology*, 71, 48–154.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B. & Simons, R. F. (2007). It's worse than you thought: The feedback negativity and violations of reward prediction in gambling tasks. *Psychophysiology*, 44 (2007), 905–912.
- Hajcak, G., Franklin, M. E., Foa, E. B., Simons, R. F. (2008). Increased error-related brain activity in pediatric obsessive-compulsive disorder before and after treatment. *American Journal of Psychiatry*, 165, 116–123.
- Hassin, R., Aviezer, H., Bentin, S. (2013). Inherently ambiguous: Facial expressions of emotions, in context. *Emotion Review* 5 (1), 60-65.
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A. & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 223 – 233.
- Henning, J. (2005). Neurotizismus. In H. Weber & T. Rammsayer (Hrsg.), *Handbuch der Persönlichkeitspsychologie und Differentiellen Psychologie*. (S. 251–256). Göttingen: Hogrefe.
- Herrmann, M. J., Römmler, 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*, Vol 20, 2, 294-299.
- Hewig, J., Coles, M. G., Trippe, R. H., Hecht, H. & Miltner, W. H. (2011). Dissociation of Pe and ERN/Ne in the conscious recognition of an error. *Psychophysiology* 48, 1390–1396.
- Hochman, E. Y., Eviatar, Z., Breznitz, Z. Nevat, M. & Shaul, S. (2009). Source localization of error negativity: Additional source for corrected errors. *NeuroReport*, 20(13): p. 1144-1148.
- Hoffman, E. & Haxby, J. (2000): Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception. *Nature Neuroscience*, 3:8 –84.
- Holmes, A. J., & Pizzagalli, D. A. (2007). Task feedback effects on conflict monitoring and executive control: Relationship to subclinical measures of depression. *Emotion*, 7(1), 68–76.

- Holroyd, C. B., Dien, J. & Coles, M. G. H. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movement: evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letters*, 242, 65-68.
- 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., Nieuwenhuis, S., Yeung, N. & Cohen, J. D. (2003): Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *Neuroreport* 14:2481–2484.
- Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Mars, R. & Coles, M. G. H. (2004). Anterior cingulate cortex, selection for action, and error processing. In: Posner, M. (Ed.), *Cognitive Neuroscience of Attention*. New York: Guilford Publishing Inc., pp. 219–242.
- Holroyd, C. B., Hajcak, G. & Larsen, J. T. (2006). The good, the bad and the neutral: electrophysiological responses to feedback stimuli. *Brain Research* 1105:93–101.
- Hoyer, J. & Margraf, J. (Hrsg.) (2004). *Angstdiagnostik*. Berlin: Springer.
- Hughes, G., Yeung, N. (2011) Dissociable correlates of response conflict and error awareness in error-related brain activity. *Neuropsychologia* 49 (405–415).
- Ishai, A. (2007). Sex, beauty and the orbitofrontal cortex. *International Journal of Psychophysiology*. 63:181–185.
- Ishii, R., Canuet, L., Herdman, A., Gunji, A., Iwase, M., Takahashi, H., Nakahachi, T., Hirata, M., Robinson, S.E., Pantev, C. & Takeda, M. (2009) Cortical oscillatory power changes during auditory oddball task revealed by spatially filtered magnetoencephalography. *Clinical Neurophysiology* 8.
- Jasper, H. H. (1958). Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 10: p. 370-375.
- Johnson, T. M., Otten, L. J., Boeck, K., & Coles, M. G. H. (1997). Am I too late? The neural consequences of missing a deadline. *Psychophysiology*, 34, S48.
- 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.
- Kanwisher, N., McDermott, J., Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience* 1997 Jun 1;17(11):4302-11.

- Keil, J., Weisz, N., Paul-Jordanov, I., Wienbruch, C. (2010). Localization of the magnetic equivalent of the ERN and induced oscillatory brain activity. *Neuroimage*; 51:404-411.
- 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.
- Kim, B.-R., Liss, A., Rao, M., Singer, Z. & Compton, R. J. (2012). Social deviance activates the brain's error-monitoring system. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 12 (1), 65-73.
- Knutson, B., Westdorp, A., Kaiser, E. & Hommer, D. (2000). fMRI visualization of brain activity during a monetary incentive delay task. *NeuroImage* 12, 20–27.
- Kobza, S., Thoma, P., Daum, I., & Bellebaum, C. (2011). The feedback-related negativity is modulated by feedback probability in observational learning. *Behavioral Brain Research*, 225(2), 396-404.
- Kreussel, L., Hewig, J., Kretschmer, N., Hecht, H., Coles, M. G. H. & Miltner, W. H. R. (2011). The influence of the magnitude, probability, and valence of potential wins and losses on the amplitude of the feedback negativity. *Psychophysiology* 49 (2), 207-219.
- Krohne, H. W., Egloff, B., Kohlmann, C.-W., & Tausch, A. (1996). Untersuchung mit einer deutschen Form der Positive and Negative Affect Schedule (PANAS). *Diagnostica*, 42, 139-156.
- Krueger, R. F., Markon, K. E., Patrick, C. J., Benning, S. D., & Kramer, M. D. (2007). Linking antisocial behavior, substance use, and personality: An integrative quantitative model of the adult externalizing spectrum. *Journal of Abnormal Psychology*, 116(4), 645–666.
- Lang, P. J., Bradley, M. M. & Cuthbert, B. N. (1995): International Affective Picture System (IAPS): Instruction manual and affective ratings. Technical report A-4. *The Center for Research in Psychophysiology*, University of Florida
- Larson, M. J., Perlstein, W. M., Stigge Kaufman, D., Kelly, K. G., & Dotson, V. M. (2006). Affective context-induced modulation of the error-related negativity. *Neuroreport*, 17, 329–333.
- Larson, M., J. Fair, J. E., Good, D. A. & Baldwin, S. A (2009). Empathy and error processing. *Psychophysiology*, (2009), 1–10. *Psychophysiology* Volume 47, Issue 3, pages 415–424, May 2010
- Larson, M. J., Good, D. A., & Fair, J. E. (2010). The relationship between performance monitoring, satisfaction with life, and positive personality traits. *Biological Psychology*, 83, 222-228.
- Lazarus, R. S. (1999). *Stress and emotion: A new synthesis*. New York: Springer.

- Lehrl, S.: Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest MWT-B. Balingen: Spitta Verlag, 2005, 5. unveränderte Auflage.
- Leuthold, H., & Sommer, W. (1999). ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, 110, 342–357.
- Lundqvist, D., Flykt, A., & Ohman, A. (1998) Karolinska Directed Emotional Faces [Database of standardized facial images]. Psychology Section, Department of Clinical Neuroscience, Karolinska Hospital, S-171 76 Stockholm, Sweden.
- Luu, P., Flaisch, T., & Tucker, D. M. (2000a). Medial frontal cortex in action monitoring. *Journal of Neuroscience*, 20, 464–469.
- Luu, P., Collins, P. & Tucker, D. M. (2000b). Mood, Personality, and Self-Monitoring: Negative Affect and Emotionality in Relation to Frontal Lobe Mechanism of Error Monitoring. *Journal of Experimental Psychology: General* 2000, 129, 1, 43-60.
- 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.
- Mason, J. W., Wang, S., Yehuda, R., Riney, S., Charney, D. S. & Southwick, S. M. (2001). Psychogenic lowering of urinary cortisol levels linked to increased emotional numbing and a shame-depressive syndrome in combat-related posttraumatic stress disorder. *Psychosomatic Medicine*, 63 (3), 387–401.
- Masuda, T., Ellsworth, P. C., Mesquita, B., Leu, J., Tanida, S., Van de Veerdonk, E. (2008). Placing the face in context: cultural differences in the perception of facial emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, 94, 365-381.
- Mathalon, D. H., Fedor, M., Faustman, W. O., Gray, M., Askari, N., & Ford, J. M. (2002). Response-monitoring dysfunction in schizophrenia: An event-related potential study. *Journal of Abnormal Psychology*, 111, 22–41.
- Mazaheri, A., Nieuwenhuis, I., Van Dijk, H., Jensen, O., 2009. Prestimulus alpha and muscle activity predicts failure to inhibit motor responses. *Human Brain Mapping*, 30 (6), 1791–1800.
- McCarthy, G., Puce, A., Belger, A. & Allison, T. (1999) Electrophysiological studies of human face perception. II: Response properties of face specific potentials generated in occipitotemporal cortex. *Cerebral Cortex* 9:431–444.
- Meck, W. H. (2006). Neuroanatomical localization of an internal clock: a functional link between mesolimbic, nigrostriatal, and mesocortical dopaminergic systems. *Brain Research*, 1109, 93–107.
- Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 12(3), 131-143.

- Metzler, P. & Schmidt, K.-H. (1992). RASCH-Skalierung des Mehrfachwahl-Wortschatztests (MWT). *Diagnostica*, 38, 31-51.
- Miller, E. K., Cohen, J. D. (2001) An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*; 24:167-202.
- Miltner, W. H. R., Braun, C. H., & Coles, M. G. H. (1997). Event-related 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.
- 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.
- Morris, S. E., Yee, C. M., & Nuechterlein, K. H. (2006). Electrophysiological analysis of error monitoring in schizophrenia. *Journal of Abnormal Psychology*, 115(2), 239–250.
- Morris, J. S., Frith, C. D., Perrett, D. I., Rowland, D., Young, A. W. & Calder, A. J.(1996). A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions. *Nature* 1996; 383: 812–5.
- Moser, J. S., Hajcak, G., & Simons, R. F. (2005). The effects of fear on performance monitoring and attentional allocation. *Psychophysiology*, 42(3), 261–268.
- Mozer, M. C., & Sitton, M. (1998). Computational modeling of spatial attention. In H. Pashler (Ed.), *Attention* (pp. 341–393). London: UCL Press.
- Nakamura, M., Buck, R., Kenny, D. A. (1990) Relative contributions of expressive behavior and contextual information to the judgment of the emotional state of another. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1990 Nov;59(5):1032-9.
- Newman, J. P., Schmitt, W. A, (1998). Passive avoidance in psychopathic offenders: a replication and extension. *Journal of Abnormal Psychology*, 107 (1998) 527–532.
- Niedenthal, P. M. (2007) Embodying emotion. *Science* 316: 1002–1005.
- 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.

- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Holroyd, C.B., Schurger, A., & Cohen, J.D. (2004). Sensitivity of electrophysiological activity from medial frontal cortex to utilitarian and performance feedback. *Cerebral Cortex*, 14, 741-747.
- Nieuwenhuis, S., Heslenfeld, D.J., von Geusau, N.J., Mars, R.B., Holroyd, C.B. & Yeung, N. (2005): Activity in human reward-sensitive brain areas is strongly context dependent. *Neuroimage* 25:1302–1309.
- O'Doherty, J., Winston, J., Critchley, H. D., Perrett, D., Burt, D. M., & Dolan, R. J. (2003). Beauty in a smile: the role of medial orbitofrontal cortex in facial attractiveness. *Neuropsychologia* 41, 147–155.
- Olvet, D. M., & Hajcak, G. (2008). The error-related negativity (ERN) and psychopathology: Toward an endophenotype. *Clinical Psychology Review*, 28, 1343–1354.
- Oswald, W. D. & Roth, E. (1987) Der Zahlen-Verbindungs-Test (2. überarbeitete und erweiterte Auflage). Göttingen: Hogrefe.
- Pailing, P. E., Segalowitz, S. J. (2004). The error-related negativity as a state and trait measure: motivation, personality, and ERPs in response to errors. *Psychophysiology*, 41, 84–95.
- Pailing, P. E., Segalowitz, S. J., & Davies, P. L. (2000). Speed of responding and the likelihood of error-like activity in correct trial ERPs. *Psychophysiology*, 37, S76.
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M., Lehmann, D. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology*, 18:49-65.
- Paulus, M. P., Feinstein, J. S., Simmons, A., & Stein, M. B. (2004). Anterior cingulate activation in high trait anxious subjects is related to altered error processing during decision making. *Biological Psychiatry*, 55(12), 1179–1187.
- Pfabigan, D. M., Alexopoulos, J., Bauer, H. Lamm, C. & Sailer, U.(2011). All about the money—External performance monitoring is affected by monetary, but not by socially conveyed feedback cues in more antisocial individuals. *Frontiers in human neuroscience* 5.
- Quintana, S. M. & Maxwell, S. E. (1994). A comparison of six estimates of epsilon in repeated measures designs with small samples sizes. *Journal of Educational Statistics*, 19, 57-71.
- Rammsayer, T. H. & Stahl, J. (2007). Identification of sensorimotor components accounting for individual variability in Zahlen-Verbindungs-Test (ZVT) performance. *Intelligence*, 35, 623-630.
- Richler, J. J., Cheung, O. S., Gauthier, I. (2011). Holistic Processing Predicts Face Recognition. *Psychological Science*, 22(4) 464–471.

- Ridderinkhof, K. R., Band, G. P., & Logan, D. (1999). "A study of adaptive behavior: effects of age and irrelevant information on the ability to inhibit one's actions". *Acta psychologica* 101: 315–337.
- Righart, R. & de Gelder, B. (2008). Rapid influence of emotional scenes on encoding of facial expressions. An ERP study. *SCAN*, 3, 270-278.
- Ruchow, M., Gron, 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(4), 298–304.
- Roger C., Benar C. G., Vidal F., Hasbroucq T. & Burle B. (2010). Rostral Cingulate Zone and correct response monitoring: ICA and source localization evidences for the unicity of correct- and error-negativities. *Neuroimage*, 51, 391–403.
- Sato, A., Yasuda, A., Ohira, H., Miyawaki, K., Nishikawa, M., Kumano, H. & Kuboki, T. (2005). Effects of value and reward magnitude on feedback negativity and P300. *NeuroReport*, 2005;16:407–41.
- Satzger, W., Fessmann, H. & Engel, R. R. (2002) Liefern HAWIE-R, WST und MWT-B vergleichbare IQ-Werte? The Equivalence of Three German Vocabulary Tests and the German Version of the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised (HAWIE-R) *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 23 (2), 159–170.
- Scheffers, M. K., Coles, M. G., Bernstein, P., Gehring, W. J., & Donchin, E. (1996). Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli. *Psychophysiology*, 33 (1), 42–53.
- Scheffers, M. K. & Coles, M. G. H. (2000). Performance monitoring in a confusing world: Error-related brain activity, judgements of response accuracy, and types of errors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 141–151.
- Scherg, M. (1990). Fundamentals of dipole source potential analysis. In: Auditory evoked magnetic fields and electric potentials (eds. F. Grandori, M. Hoke and G.L. Romani). *Advances in Audiology*, Vol. 6. Basel: Karger, pp 40-69.
- Schreiner, T. (2009). *Facial cues affect the feedback negativity to offers in the Ultimatum Game. An EEG investigation.* Diplomarbeit Uni Wien.
- Segalowitz, S., Santesso, D., Murphy, T., Homan, D., Chantzianoniou, D., & Khan, S. (2010). Retest reliability of medial frontal negativities during performance monitoring. *Psychophysiology*, 47, 260–270.
- Seifert, S., von Cramon, Y., Imperati, D., Tittgemeyer, M. & Ullsperger, M. (2011). Thalamocingulate Interactions In Performance Monitoring. *The Journal of Neuroscience*, 31(9): 3375-3383.
- Seisdedos, N. (1982). Cuestionario de Ansiedad Estado-Rasgo (State-Trait Anxiety Inventory). Madrid: TEA Ediciones.

- Selye, H. (1956). *The stress of life*. New York: McGraw-Hill.
- Spencer, K. M., Dien, J. & Donchin, E. (2001): Spatiotemporal analysis of the late ERP responses to deviant stimuli. *Psychophysiology* 38:343–358.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L. & Lushene, R. E. (1970). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory*. Palo Alto, Ca.: Consulting Psychologists Press.
- Stemmer, B., Vihla, M., Salmelin, R. (2004). Activation of the human sensorimotor cortex during error-related processing: a magnetoencephalography study. *Neuroscience Letters*, 362 (1), 44–47.
- Strobel, A., Beauducel, A., Debener, S., Brocke, B. (2001) Eine deutschsprachige Version des BIS/BAS-Fragebogens von Carver und White. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, Volume: 22, Issue: 3, Pages: 216-227.
- Stroud, L. R., Tanofsky-Kraff, M., Wilfley, D. E. & Salovey, P. (2000). The Yale Interpersonal Stressor (YIPS): Affective, physiological, and behavioral responses to a novel interpersonal rejection paradigm. *Annals of Behavioral Medicine*, 22, 204–213.
- Stürmer, B., Nigbur, R., Schacht, A., Sommer, W. (2011). Reward and Punishment Effects on Error Processing and Conflict Control. *Frontiers in Psychology*, 2011 Nov, 16;2:335.
- Suárez-Pellicioni, M., Núñez-Peña, M. I. & Colomé, À. (2013). Abnormal Error Monitoring in Math-Anxious Individuals: Evidence from Error-Related Brain Potentials. *PLoS ONE* 8(11): e81143. doi:10.1371/journal.pone.0081143).
- Suchan, B., Zoppelt, D., Daum, I. (2003). Frontocentral negativity in electroencephalogram reflects motor response evaluation in humans on correct trials. *Neuroscience Letters*, 350(2):101-4.
- Talmi, D., Atkinson, R. & El-Deredy, W. (2013). The Feedback-Related Negativity Signals Salience Prediction Errors, Not Reward Prediction Errors. *The Journal of Neuroscience*, 33(19):8264–8269.
- Tewes, U. (1994). HAWIE-R: Hamburg Wechsler Test für Erwachsene, Revision 1991. Bern: Huber.
- Themanson, J. R., Hillman, C. H., McAuley, E., Buck, S. M., Doerksen, S. E., Morris, K. S. & Pontifex, M. B. (2008). Self-efficacy effects on neuroelectric and behavioral indices of action monitoring in older adults. *Neurobiology of Aging* 29 (1111–1122).
- Themanson, J. R., Rosen, P.J., Pontifex, M.B., Hillman, C.H. & McAuley, E. (2012) Alterations in error-related brain activity and post-error behavior over time *Brain and Cognition* 80 (2012) 257–265.

- Tieges, Z., Ridderinkhof, R., Snel, J., Kok, A. (2004) Caffeine strengthens action monitoring: evidence from the error-related negativity *Cogn Brain Res.* 2004 Sep;21(1):87-93.
- Tops, M., Boksem, M. A. S., Wester, A. E., Lorist, M. M., & Meijman, T. F. (2006). Task engagement and the relationships between the error-related negativity, agreeableness, behavioral shame proneness and cortisol. *Psychoneuroendocrinology*, 31(7), 847-858.
- Torrubia, R. & Tobena, A. (1984). A scale for the assessment of "susceptibility to punishment" as a measure of anxiety: preliminary results. *Personality and Individual Differences*, 5(3), 371-375.
- Torrubia, R., Avila, C., Molto, J. & Caseras, X. (2001). The Sensitivity to Punishment and Sensitivity to Reward Questionnaire (SPSRQ) as a measure of Gray's anxiety and impulsivity dimensions. *Personality and Individual Differences*, 31, 837-862.
- Toyomaki, A. & Murohashi, H. (2005). Discrepancy between feedback negativity and subjective evaluation in gambling. *Neuroreport*, 2005 Nov 7;16(16):1865-8.
- Tucker, D. M., Hartry-Speiser, A., McDougal, L., Luu, P. & deGrandpre, D. (1999). Mood and spatial memory: emotion and right hemisphere contribution to spatial cognition. *Biological Psychology*, 50, 103–125.
- Ullsperger, M. & von Cramon, D. Y. (2006). How does error correction differ from error signaling? An event-related potential. *Brain Research*, 1105, 102-109.
- Ursu, S., Stenger, V. A., Shear, M. K., Jones, M. R. & Carter, C. S. (2003). Overactive action monitoring in obsessive-compulsive disorder: Evidence from functional magnetic resonance imaging. *Psychological Science*, 14(4), 347–353.
- 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. (2002a). The Timing of Action-Monitoring Processes in the Anterior Cingulate Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593-602.
- Van Veen, V. & Carter, C.S. (2002b). The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies. *Physiology & Behavior* 77 (2002) 477– 482.
- Vlamings, P. H., Jonkman, L. M., Hoeksma, M. R., van Engeland, H. & Kemner, C. (2008). Reduced error monitoring in children with autism spectrum disorder: an ERP study. *European Journal of Neuroscience*, 28(2):399-406.
- Veiel, H. O. (1997): A preliminary profile of neuropsychological deficits associated with major depression. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 19: 587-603.

- Vernon, P.A. (1993). Der Zahlen-Verbindungs-Test and other Trail-Making correlates of general Intelligence. *Personality and individual Differences.*, 14 (1), 35-40.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., Bonnet, M., 2000. Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological Psychology*, 51, 109–128.
- Vidal, F., Burle, B., Bonnet, M., Grapperon, J., Hasbroucq, T. (2003). Error negativity on correct trials: a reexamination of available data. *Biological Psychology*, 64(3): 265—82.
- Vuilleumier, P., Richardson, M. P., Armony, J. L., Driver, J. & Dolan, R. J. (2004). Distant influences of amygdala lesion on visual cortical activation during emotional face processing. *Nature Neuroscience*, 7(11), 1271-1278.
- Vuilleumier, V. & Pourtois, G. (2007). Distributed and interactive brain mechanisms during emotion face perception: Evidence from functional neuroimaging *Neuropsychologia* 45 (2007) 174–194.
- Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063-1070.
- Weinberg, A., & Hajcak, G. (2011). Longer term test–retest reliability of error-related brain activity. *Psychophysiology*, 48, 1420–1425.
- Weiner, H. (1992). *Perturbing the organism: The biology of stressful experience*. Chicago: University of Chicago Press.
- Wiswede, D., Münte, D.F., Goschke, T. & Rüsseler, J. (2009a). Modulation of the error-related negativity by induction of short-term negative affect. *Neuropsychologia* 47 83–90.
- Wiswede, D., Münte, D. F., Krämer, U. M. & Rüsseler, J. (2009b). Embodied Emotion Modulates Neural Signature of Performance Monitoring. *PLoS ONE*, 4, e5754.
- Wiswede, D., Münte, D.F. & Rüsseler, J. (2009c). Negative affect induced by derogatory verbal feedback modulates the neural signature of error detection. *SCAN*, 4, 227–237.
- Wu, Y. & Zhou, X. (2009). The P300 and reward valence, magnitude, and expectancy in outcome evaluation. *Brain Research*, 1286:114–122.
- Yasuda, A., Sato, A., Miyawaki, K., Kumano, H. & Kuboki, T. (2004). Error-related negativity reflects detection of negative reward prediction error. *Neuroreport*. 2004;15(16):2561–5.
- Yeung, N., Sanfey, A.G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 24:6258–6264.

- Yeung, N., Botvinick, M. M. & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error-detection: Conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological Review*, 111,931-959.
- Yeung, N., Holroyd, C.B., Cohen, J. D. (2005). ERP correlates of feedback and reward processing in the presence and absence of response choice. *Cerebral Cortex*,15:535-44.
- Zeiler, M. (2012). *The impact of different positive and negative feedback stimuli on the FRN and P300: A synopsis of three event-related potential studies*. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Universität Wien, Österreich.
- Zhang, Y., Li, X., Qian, X & Zhou, X. (2012). Brain responses in evaluating feedback stimuli with a social dimension *Frontiers in Human Neuroscience* 6:29-29
- Zheng, X., Mondloch, C.J., & Segalowitz, S.J. (2012). The timing of individual face recognition in the brain. *Neuropsychologia*, 50(7), 1451-1461.



## **Danksagung**

## Lebenslauf