

4 Diskussion

4.1 Hauptergebnisse

Zunächst gelang es bei der Analyse der evozierten Potentiale, für die Amplitude des Peaks P350 an der Elektrode Fz einen Einfluss der Belohnungswertigkeit nachzuweisen. Die Amplitude war geringer bei Belohnung und Bestrafung im Vergleich zu neutraler Bewertung. Anhand der LORETA-Quellenanalyse konnte für das Intervall 302-450 ms post Stimulus sowohl nach Belohnung als auch nach Bestrafung eine signifikant erhöhte orbitofrontale Aktivität im Vergleich zur Baseline nachgewiesen werden. Im statistischen Gruppenvergleich zwischen Belohnung und neutral zeigte sich nach Belohnung eine signifikante Minderaktivität im OFC.

4.2 Diskussion der Methode

4.2.1 Artefakte im EEG

Bei der Frage nach orbitofrontaler Aktivität ist eine Kontrolle von Augenartefakten wichtig, da diese in der LORETA orbitofrontale Aktivität vortäuschen können. Deshalb wurde ein Elektrookulogramm (EOG) mitregistriert und die Segmente mit hohen Amplituden in der EOG-Elektrode von der Mittelung ausgeschlossen. Sollten Augenartefakte geringerer Amplitude von diesem Filter nicht erfasst worden sein, so besteht ein weiterer Aspekt der Kontrolle: Es ist davon auszugehen, dass Augenbewegungen im gesamten Testablauf auftreten. Mögliche Augenartefakte müssten daher in jeweils beiden verglichenen Gruppen vorhanden sein und nach dem statistischen Vergleich in der Differenz der Gruppen nicht mehr erscheinen.

Aus diesen Gründen kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Studie eine ausreichende Kontrolle möglicher Augenartefakte erfolgte und die Ergebnisse dadurch nicht beeinflusst wurden.

4.2.2 Übereinstimmung von GA-Kurven und Analyse des Peaks P350

Bei der Analyse der evozierten Potentiale fällt auf, dass aus den Grand-Average-Kurven bei P350 an Fz der Eindruck entsteht, die Amplitude bei neutraler Rückmeldung sei wesentlich höher als diejenige bei Belohnung und Bestrafung, wohingegen der Unterschied zwischen Belohnung und Bestrafung geringer ausfalle. In der deskriptiven Statistik des Peaks P350 zeigt sich jedoch ein größerer Unterschied zwischen Belohnung und Bestrafung als zwischen

Bestrafung und neutraler Rückmeldung. Hierbei muss beachtet werden, dass die Kurven des Grand Average lediglich zur Veranschaulichung dienen und zur Festlegung der Zeitbereiche für die einzelnen Peaks. Eine direkte Angabe der Varianzen lässt sich dem Grand Average jedoch nicht entnehmen, denn bei den einzelnen Probanden wurde die Amplitude des Peaks nicht zu dem Zeitpunkt bestimmt, in dem sich im Grand Average maximale Amplituden zeigten, sondern zu dem Zeitpunkt, in dem die Amplitude des Peaks bei der jeweiligen Person maximale Werte aufwies, also zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Latenzen) innerhalb des definierten Zeitbereichs. Die Ergebnisse der statistischen Analyse des Peaks tragen demnach den interindividuellen Latenzunterschieden Rechnung und können sich aus diesem Grund von der Darstellung des Grand Average unterscheiden.

4.2.3 Festlegung des Zeitfensters für die LORETA-Quellenanalyse

Die Festlegung des Zeitfensters für die LORETA-Quellenanalyse deckt sich nicht völlig mit dem Zeitbereich, für den der Peak P350 definiert wurde. Dies geschah aus folgenden Überlegungen heraus: Im Gegensatz zur Analyse des Peaks, bei dem die höchste Amplitude des jeweiligen Zeitbereichs für die statistischen Berechnungen herangezogen wird, wird beim LORETA-t-Test die Aktivität des gesamten Zeitbereichs analysiert. Daher kann der Zeitbereich für den Peak relativ groß gewählt werden. Um bei der LORETA-Analyse ein statistisch signifikantes Ergebnis zu erzielen, darf das Zeitfenster jedoch nicht zu groß gewählt werden und sollte trotzdem mit hoher Wahrscheinlichkeit den Peak umfassen. Die untere Grenze (302 ms) wurde daher so gewählt, dass sie ausreichend Abstand zum vorherigen Peak gewährte, die Obergrenze wurde bei 450 ms festgelegt, da danach die interindividuelle Variabilität sehr stark zunahm.

4.2.4 Konsistenz der Hauptergebnisse

Der Peak P350 wies eine positive Polarität auf, was sich in der LORETA-Quellenanalyse als Mehraktivität im Zeitfenster 302-450 ms im Vergleich zur Baseline ausdrückte. Weiterhin zeigte P350 bei Belohnung eine signifikant niedrigere Amplitude verglichen mit neutraler Rückmeldung. Da sich dieser Einfluss der Belohnungswertigkeit an der Elektrode Fz manifestierte, konnte ein frontaler Generator vermutet werden. In der Tat fand sich für Belohnung im Vergleich zu neutraler Rückmeldung eine orbitofrontale Minderaktivität in der LORETA-Quellenanalyse für den Zeitbereich 302-450 ms. Damit stimmen für Belohnung versus neutra-

le Rückmeldung die Ergebnisse der Analyse der evozierten Potentiale überein mit denjenigen der LORETA-Quellenanalyse, sowohl hinsichtlich des Ortes als auch hinsichtlich des Zeitbereichs.

4.2.5 LORETA-Quellenanalyse und Statistik

Die Arbeitsgruppe von Pascual-Marqui (Pascual-Marqui et al., 1994; Pascual-Marqui, 1999) konnte zeigen, dass mit Hilfe der LORETA eine etwas unscharfe aber korrekte Quellenlokalisierung möglich ist. Aufgrund der oben genannten Nachteile anderer Verfahren war diese Methode für die vorliegende Studie die am besten geeignete. Die Verwendung der in der LORETA-Software enthaltenen nonparametrischen voxelweisen t-Test Statistik wurde bereits von Holmes et al. (1996) empfohlen und in zahlreichen weiteren Arbeiten erfolgreich verwendet (z.B. Mulert et al., 2001; Winterer et al., 2001; Gallinat et al., 2002), nicht zuletzt auch von den größten Kritikern der Methode (Michel et al., 2001).

Eine fehlerhafte Lokalisation der Minderaktivität bei Belohnung versus neutral ist dennoch denkbar. Im Zeitfenster 302-450 ms fällt neben der Minderaktivität des OFC eine Minderaktivität des dorsolateralen Präfrontalcortex (DLPFC) auf. Als eine Funktion des DLPFC wird das Arbeitsgedächtnis (working memory) angesehen, insbesondere fand sich stärkere Aktivität im DLPFC, wenn in stärkerem Maß nötig war, dieses Arbeitsgedächtnis auf den neuesten Stand zu bringen (updating, manipulation) (Fletcher und Henson, 2001). Nun ist beim pORT leicht nachzuvollziehen, dass nach der neutralen Rückmeldung (0 Punkte) in stärkerem Maß ein „update“ des Arbeitsgedächtnisses nötig ist als bei der Rückmeldung 40 Punkte, da in letzterem Fall der Proband sich offenbar auf der richtigen Fährte befindet und Konzept und Vorgehensweise nicht verändert werden müssen. Somit ist die relative Minderaktivität im DLPFC gut erklärbar. Weiterhin ist bekannt, dass LORETA ein unscharfes Bild erzeugt und der orbitofrontale Cortex direkt an den dorsolateralen Präfrontalcortex angrenzt. Die Vermutung, LORETA könnte fälschlicherweise den OFC neben dem DLPFC als zweite Quelle erkennen, die Minderaktivität also teilweise unzutreffend nicht in den DLPFC, sondern in den OFC lokalisieren, ist jedoch nicht haltbar:

Es wurden in der vorliegenden Studie zwei Voxel mit Aktivitätsminima nur dann zwei verschiedenen Quellen zugeordnet, wenn sie mindestens 31 mm Abstand hatten. Als Orientierung diente dabei die räumliche Auflösung, die Pascual-Marqui et al. (1994) mit der Originalversion der LORETA nachweisen konnten. Mit Integration des Talairach-Atlas wie in der

hier verwendeten Version der LORETA dürfte sich die Genauigkeit noch verbessert haben (Pascual-Marqui et al., 1999). Die Distanz zwischen dem Aktivitätsminimum im OFC und im DLPFC liegt mit 53 mm weit über der räumlichen Auflösung der LORETA. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der OFC eine eigenständige Quelle relativer Minderaktivität bei Belohnung darstellt.

Nicht möglich ist dagegen angesichts einer gesicherten Genauigkeit von 31 mm eine zweifelsfreie Lokalisation innerhalb des orbitofrontalen Cortex. So konnte diese Studie keine weitere Klärung verschaffen zur einleitend erwähnten Diskussion über unterschiedliche Aktivierung des medialen und lateralen OFC. Eine weitere Verbesserung der räumlichen Auflösung könnte mit der Kombination von individuellen MRT-Aufnahmen und LORETA erreicht werden (Gevins et al., 1995). Da mit dieser Studie Anhaltspunkte zur Verfügung stehen, in welchem Zeitbereich post Stimulus die orbitofrontale Aktivitätsänderung erwartet werden kann, sind bei einer Reproduktion der Daten Aufwand und Kosten für eine Integration individueller MRT-Aufnahmen eher zu rechtfertigen als bisher.

4.2.6 Erfassung des Belohnungswertes

Es stellt sich die Frage, inwieweit eine Belohnung von 20 Punkten für die Probanden tatsächlich einen Belohnungswert hatte und ob eine neutrale Rückmeldung von 0 Punkten wirklich als solche betrachtet wurde. Vorstellbar ist eine Relativierung des Belohnungswertes, so dass beispielsweise nach einer Serie von 40 Punkten eine Rückmeldung von 20 Punkten nicht als (absolute) Belohnung, sondern als relative Bestrafung angesehen wurde. Genauso könnte es sich bei der Rückmeldung 0 Punkte je nach Kontext um eine relative Belohnung oder Bestrafung handeln. Das Zusammenfassen von 20 und 40 Punkten als Belohnung, bzw. das Betrachten von 0 Punkten als neutrale Rückmeldung lässt sich dennoch rechtfertigen als sinnvoller Kompromiss:

Eine separate Auswertung von 40 und 20 Punkten hätte zum Ausschluss von weiteren Probanden wegen zu wenigen Mittelungen pro Bedingung geführt. Die Untersuchung zusätzlicher Probanden als Ausgleich dafür wurde verworfen, um eine Selektion der Probanden zu vermeiden. Eine Erweiterung des pORT um zusätzliche Wahlversuche war nicht möglich, da dieser Test in weiteren Studien auch bei Patienten mit psychiatrischen Erkrankungen verwendet werden soll. Diese haben jedoch häufig Schwierigkeiten, sich längere Zeit zu konzentrie-

ren, daher sollte der Zeitaufwand für den Test nicht über die ca. 20 min der verwendeten Version ausgedehnt werden.

Die gemeinsame Auswertung von 20 und 40 Punkten als Belohnung birgt in der Tat das Risiko, dass Unterschiede zwischen den Bedingungen sich verwischen könnten. Da jedoch signifikante Unterschiede für Belohnung versus neutral ermittelt werden konnten, kann man davon ausgehen, dass 20 Punkte genügend Belohnungswert darstellten und 0 Punkte ausreichend neutral waren für die hier durchgeführte Auswertung.

4.2.7 Verfälschung des Ergebnisses durch Drittvariablen

Möglicherweise bestand neben der Belohnungswertigkeit zwischen den Bedingungen (Belohnung, Bestrafung, neutral) auch ein Unterschied hinsichtlich der Lernphase, in der sich der Proband befand. Wenn der Proband beispielsweise 40 Punkte erhielt, kann in der Mehrzahl der Fälle davon ausgegangen werden, dass er gelernt hatte, welcher Buchstabe zu dem Zeitpunkt den „besten“ Buchstaben darstellte. Im Gegensatz dazu kann man die Phase, in welcher der „beste“ Buchstabe noch nicht erkannt wurde und weiterhin durch Versuch und Irrtum herauszufinden war, als Suchphase bezeichnen. Erhielt der Proband 0 Punkte, befand er sich offenbar in einer solchen Suchphase.

Nun könnte argumentiert werden, die relative orbitofrontale Mehraktivität bei neutraler Rückmeldung (0 Punkte) im Vergleich zu Belohnung sei Ausdruck dieser Suchphase, anstatt die relative Minderaktivität des OFC Ausdruck der Belohnung. Dieser Sichtweise steht jedoch entgegen, dass die Bedingung Belohnung nicht nur Segmente mit 40 Punkten einschließt, sondern ebenfalls solche mit 20 Punkten, was bedeutet, dass auch Segmente eingeschlossen sind, bei denen nicht der „beste“ Buchstabe gewählt wurde. Demnach kann für die Bedingung Belohnung höchstens postuliert werden, es sei eine Mischung aus gelernter Phase und Suchphase. Noch schwerer wiegt folgendes Argument: Handelte es sich bei neutraler Rückmeldung um eine Suchphase, so müsste dies in noch stärkerem Maß für Bestrafung angenommen und für Bestrafung eine Aktivierung erwartet werden, welche sich genauso stark oder stärker von Belohnung unterscheidet wie diejenige bei neutraler Rückmeldung. Dies ist jedoch nicht der Fall: In der Analyse des Peaks P350 zeigte sich bei Bestrafung eine Amplitude, deren Höhe zwischen derjenigen bei Belohnung und bei neutraler Rückmeldung lag. Dies kann mit dem Modell einer Suchphase nicht erklärt werden.

Im pORT sind sicherlich verschiedenste Arten der Informationsverarbeitung, Konzeptbildung und Handlungsplanung gleichzeitig gefordert. Die kognitive Komponente wurde dabei bewusst reduziert mit Hilfe des probabilistischen Designs und der Information, es handle sich nicht um ein Rechenspiel. Dennoch ist weiterhin davon auszugehen, dass die Probanden bestimmte Konzepte im Laufe des Tests entwickelten und wieder verwarfen. Die räumlich ausgedehnte Aktivierung, die sich sowohl bei Belohnung als auch bei Bestrafung im Vergleich post Stimulus versus Baseline zeigte, spiegelt dies wider. Aufgrund der Tatsache, dass bei Belohnung und neutraler Bewertung der Großteil dieser Testanforderungen identisch sind, sollten diese im statistischen Vergleich beider Bedingungen keine Rolle mehr spielen und sich die Unterschiede zwischen beiden Gruppen auf die Belohnungsverarbeitung reduzieren. Der emotionale Aspekt der Belohnung wurde sichergestellt, indem nur Probanden in die Studie eingeschlossen wurden, die angaben, sich über 40 Punkte gefreut zu haben. Zudem ergibt sich aus der Methode des EEGs im Vergleich zu fMRT-Studien folgender Vorteil: Da die Unterschiede zwischen den Bedingungen sehr zeitnah ($<450\text{ms}$) zum Stimulus ermittelt werden konnten, wurden später auftretende kognitive Komponenten nicht mehr erfasst, genauso wenig wie eventuell auftretende Aktivität aufgrund der Erwartung einer Belohnung vor Präsentation des Stimulus zum Zeitpunkt 0 ms.

Dennoch lässt sich letztlich nicht völlig ausschließen, dass neben der Repräsentation des Belohnungswertes auch andere Faktoren verantwortlich waren für unterschiedliche Aktivierungsmuster entsprechend dem Belohnungswert. Die Repräsentation des Belohnungswertes im OFC ist jedoch überzeugend belegt, wie einleitend dargestellt. Erst kürzlich konnten O'Doherty et al. (2003) mithilfe eines besonderen Testdesigns die Repräsentation von Belohnung und Bestrafung in einem Teilbereich des OFC nachweisen, welche unabhängig war von der Tatsache, ob der Testablauf eine Wahl des Probanden erforderte oder nicht. So erfolgte eine Differenzierung zwischen Belohnungswert der Rückmeldung und Handlungsplanung, wobei in beiden Fällen orbitofrontale Aktivität nachgewiesen wurde.

4.3 Diskussion der Hauptergebnisse

4.3.1 Aktivitätsunterschiede weiterer Hirnbereiche

Im Vergleich Belohnung versus neutral zeigte sich im orbitofrontalen Cortex ein signifikanter Aktivitätsunterschied. Allerdings galt dies auch für andere Regionen, unter anderem für fron-

tale Gebiete inklusive das anteriore Cingulum. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass mehrere präfrontale Regionen an der Belohnungsverarbeitung beteiligt sind, wofür es in der Literatur auch Hinweise gibt (O'Doherty et al., 2001 und 2003; Bush et al., 2002; Martin-Soelch et al., 2003). Jedoch lassen die Resultate von Läsionsstudien darauf schließen, dass nicht andere (frontale) Gebiete, sondern der OFC wesentlich ist für die Bewältigung eines Tests, der wie der pORT auf Lernen und Umlernen anhand von Feedback beruht (Meunier et al., 1997; Dias et al., 1996). Weiterhin betonen Einzelzell-Ableitungen bei Primaten die Bedeutsamkeit von Neuronen insbesondere des OFC bei der Reaktion auf Belohnung und Bestrafung (Rolls et al., 1996; Rolls, 2000; Tremblay und Schultz, 1999).

4.3.2 Interpretation der Hauptergebnisse

Wie oben erörtert, besteht hinreichend Grund zur Annahme, dass bei Belohnung im Vergleich mit neutraler Bewertung im orbitofrontalen Cortex eine Minderaktivität besteht, welche aus der unterschiedlichen Belohnungswertigkeit resultiert. Dies kann auf mehrere Arten interpretiert werden:

1. Es besteht eine orbitofrontale Quelle, welche bei Belohnung im Vergleich zu neutraler Rückmeldung weniger aktiv ist.
2. Es besteht mehr als eine orbitofrontale Quelle. Diese Quellen sind so angeordnet, dass sie bei zeitgleicher Aktivitätssteigerung nicht zu einer Erhöhung des messbaren Potentials auf der Kopfhaut führen, sondern vielmehr zu einer Auslöschung bzw. Verminderung dieses Potentials.

Die Möglichkeit einer einzigen orbitofrontalen Quelle, welche bei Belohnung weniger aktiv ist, wäre die naheliegendste Annahme, wenn die Ergebnisse dieser Studie ohne Zuhilfenahme der bisher bekannten Daten interpretiert werden müssten.

Gestützt wird diese Interpretation von Ergebnissen aus der Vorauswertung einer fMRT-Studie, die den pORT bei gesunden Probanden einsetzte. Bei der Auswertung der Daten mittels einer Software namens „Brain Voyager“ zeigte sich bei Belohnung eine stärkere Aktivität im lateralen OFC und eine Minderaktivität im medialen OFC (Mell, 2003). Die Aussagekraft dieser Daten wird jedoch durch eine sehr kleine Fallzahl eingeschränkt, weiterhin findet der Vergleich statt zwischen 40 Punkten im pORT und einem Kontrolltest, wohingegen in der vorliegenden Studie Belohnung (40 und 20 Punkte) mit neutraler Rückmeldung (0 Punkte)

verglichen wurde. Bei der Auswertung derselben Daten mit einem anderen Programm zeigte sich zudem keine orbitofrontale Minderaktivität.

Eine Parallele zu den Daten der Arbeitsgruppe um Elliott (2003) fällt auf: in dieser Studie zeigte sich die höchste orbitofrontale Aktivität bei 0 Pfund und dem höchsten Gewinn von 1 Pfund. Die dazwischen liegenden Gewinnsummen erzeugten geringere Aktivität im OFC. Nun könnte man argumentieren, in der vorliegenden pORT-Studie zeigte sich ebenfalls höchste orbitofrontale Aktivität bei 0 Punkten, wohingegen sich die geringere Aktivität bei Belohnung dadurch erklären ließe, dass hierbei die maximale Belohnung und eine mittelhohe Belohnung gemeinsam ausgewertet wurden. Jedoch unterscheiden sich die beiden Versuchsbedingungen dadurch, dass in der vorliegenden Studie sowohl Gewinne als auch Verluste als Rückmeldung möglich waren, wohingegen Elliott et al. (2003) eine Gewinnspanne verwendeten mit 0 Pfund als Untergrenze. Demnach müssten für die vorliegende Studie 0 Punkte als mittlerer Gewinn eingestuft und eine geringere orbitofrontale Aktivität erwartet werden.

Insgesamt liefert die zahlreich vorhandene Literatur gewichtige Argumente dafür, dass im orbitofrontalen Cortex bei Belohnung eine Aktivitätszunahme stattfindet. Dies konnte sowohl bei Primaten in Einzelzelleableitungen gezeigt werden (Rolls et al., 1996; Rolls, 2000; Tremblay und Schultz, 1999) als auch in fMRT-Studien mittels abstrakter Belohnung (Elliott et al., 2000; Breiter et al., 2001; O'Doherty, 2001 und 2003; Knutson, 2003).

Somit ist die wahrscheinlichste Interpretation die Annahme, dass die orbitofrontale Minderaktivität bei Belohnung im Vergleich zur neutralen Bewertung dadurch zustande kommt, dass mehr als eine orbitofrontale Quelle aktiviert wird und diese Quellen so angeordnet sind, dass es zu einer Verminderung des Potentials auf der Kopfhaut kommt.

Hierbei ist zu beachten, dass bei Belohnung post Stimulus sehr wohl erhöhte orbitofrontale Aktivität nachgewiesen werden konnte im Vergleich zur Baseline, genauso wie sich auch in vielen anderen Regionen des Cortex erhöhte Aktivität zeigte. Diese breite Aktivitätserhöhung kann beim verwendeten Test pORT jedoch nicht ohne weiteres allein dem Faktor Belohnung zugeschrieben werden, vielmehr ist davon auszugehen, dass weitere unspezifische Faktoren mitbeteiligt sind. Die Spezifität bezogen auf die Repräsentation des Belohnungswertes wurde dadurch erreicht, die Aktivität bei Belohnung statistisch zu vergleichen mit der Aktivität bei neutraler Bewertung. Da sich in beiden Fällen die allgemeinen Testanforderungen nicht unterscheiden, kann bei der Differenz von einer belohnungsspezifischen Reaktion ausgegangen werden. Diese Differenz könnte im vorliegenden Fall verursacht worden sein durch die Akti-

vierung einer zweiten orbitofrontalen Quelle, welche den Belohnungswert der Rückmeldung repräsentiert und deren Anordnung zur ersten zu einer Potentialverminderung auf der Kopfhaut führt.

Diese Annahme lässt sich gut in Einklang bringen mit Hinweisen aus der neueren Literatur für das Vorhandensein mehrerer Gebiete innerhalb des OFC, die bei unterschiedlichen Teilaspekten der Belohnungsverarbeitung aktiviert werden. So sprechen die Ergebnisse von O'Doherty et al. (2003) dafür, dass eine funktionelle Heterogenität des OFC besteht, mit den Aufgaben, Belohnung zu repräsentieren, Veränderungen in der Belohnungszuordnung zu signalisieren und Verhalten zu kontrollieren.

4.3.3 Bestrafung

Im Gruppenvergleich zwischen Bestrafung und neutral gelang es nicht, eine statistisch signifikante Minderaktivität nachzuweisen, wie aufgrund der Peakanalyse vermutet werden konnte. Hinweise dafür ließen sich zwar in der zeitlich detaillierteren Analyse in Abschnitten von 16 ms finden, diese sind aufgrund der multiplen Testung jedoch nicht signifikant. Eine gleichsinnige Aktivitätsänderung bei Bestrafung wie bei Belohnung stünde auch im Einklang mit Ergebnissen früherer Untersuchungen, in denen gezeigt werden konnte, dass der orbitofrontale Cortex auf Belohnung und Bestrafung gleichsinnig reagiert, z.B. mit einer stärkeren Aktivierung im fMRT (O'Doherty, 2001; Breiter, 2001). Dass dies in der vorliegenden Studie nicht gelang, könnte in relativ geringen Unterschieden der Aktivität begründet liegen. Auf einen relativ geringen Aktivitätsunterschied zwischen Bestrafung und neutral weist auch ein signifikanter, aber vergleichsweise geringer Unterschied der Amplitude der P350 hin. Möglicherweise hätten mit einer größeren Fallzahl signifikante Aussagen gelingen können. Dies gilt auch für den Vergleich Belohnung versus Bestrafung und sollte bei Folgestudien beachtet werden.

4.3.4 Lateralisation

In der vorliegenden Studie fiel auf, dass die orbitofrontale Minderaktivität bei Belohnung überwiegend in der rechten Hemisphäre lokalisiert war, wohingegen Hinweise auf orbitofrontale Minderaktivität bei Bestrafung in der linken Hemisphäre zu beobachten waren. Aus der vorhandenen Literatur zu dieser Frage ergibt sich kein einheitliches Bild: So fanden

O'Doherty et al. (2001) Aktivitätsunterschiede bei Belohnung tendenziell links, bei Bestrafung eher rechts. Insgesamt ließ sich jedoch weniger eine unterschiedliche Seitenlokalisation ausmachen als vielmehr eine Unterteilung in medial (Belohnung) und lateral (Bestrafung). Im Gegensatz dazu beobachteten Zald et al. (2001), Anderson et al. (2003) und Berridge (2003) die Tendenz, dass bei unangenehmem Geruch (bzw. Geschmack) eine Aktivitätssteigerung im OFC links stärker ausgeprägt war, wohingegen sie bei angenehmem Geruch (bzw. Geschmack) rechts stärker auftrat. Inwieweit dies jedoch spezifische Befunde für die Sinnesmodalitäten Geschmack und Geruch darstellen, oder ob sie Anhaltspunkte liefern für die allgemeine Repräsentation von Belohnung und Bestrafung, lässt sich nicht eindeutig beantworten

4.3.5 Der Zeitbereich orbitofrontaler Aktivitätsunterschiede

Die von der Belohnungswertigkeit modulierte orbitofrontale Aktivität konnte im Zeitbereich von 302-450 ms nachgewiesen werden. Ausgewählt wurde dieser Zeitabschnitt aufgrund der Tatsache, dass sich die Amplitude des Peaks P350 von der Belohnungswertigkeit abhängig zeigte, nicht jedoch die Amplitude des zweiten Peaks (P150). Demnach ist anhand dieser Ergebnisse orbitofrontale Aktivität außerhalb des Zeitfensters von 302-450 ms nicht auszuschließen. Ebenso wenig bedeutet die statistisch signifikante Minderaktivität bei Belohnung in diesem Zeitfenster eine Minderaktivität über die gesamte Zeit von 302 bis 450 ms post Stimulus. Vielmehr ist von einer Minderaktivität bei Belohnung auszugehen, die bei unbekannter zeitlicher Ausdehnung zumindest zum Teil innerhalb des Zeitfensters 302-450 ms liegt und sich so stark von der Aktivität bei neutraler Bewertung unterscheidet, dass beim statistischen Vergleich des gesamten Zeitfensters ein signifikantes Ergebnis resultiert. Einen Hinweis darauf, wann genau dieser Aktivitätsunterschied auftritt, liefern die multiplen Analysen der kleineren Zeitfenster von 16 ms im gleichen Zeitbereich: Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass die Aktivitätsänderung bei Belohnung im Zeitbereich nach 378 ms post Stimulus stattfindet, wohingegen eine mögliche Aktivitätsänderung bei Bestrafung in künftigen Studien im Bereich vor 378 ms zu suchen wäre.

Da die Ergebnisse dieser zeitlich detaillierteren explorativen Analyse nicht statistisch signifikant sind, ist es wünschenswert, sie als Grundlage weiterer Studien zu verwenden, in denen dann gezielt in den entsprechenden Zeitfenstern nach orbitofrontalen Aktivitätsänderungen gesucht werden kann.

4.4 Schlussfolgerung

Als wichtigstes Ergebnis dieser Studie lässt sich festhalten, dass folgende eingangs aufgestellte Hypothese positiv beantwortet werden kann:

1. Hypothese: Der Belohnungswert eines abstrakten Stimulus (Belohnung, Bestrafung, neutral) moduliert die orbitofrontale hirnelektrische Aktivität dargestellt von LORETA.

Mithilfe der LORETA konnte erstmalig nach abstrakten Stimuli mit dem Belohnungswert Belohnung, Bestrafung, neutral eine signifikante hirnelektrische Mehraktivität im OFC nachgewiesen werden, welche durch die Belohnungswertigkeit moduliert wird.

Weiterhin konnten wertvolle Erkenntnisse zur Beantwortung der sich anschließenden Fragestellung gewonnen werden:

2. Frage: In welchem Zeitbereich (in ms) nach dem Stimulus ist die vermutete (von der Belohnungswertigkeit modulierte) orbitofrontale Aktivität nachzuweisen?

Erstmals gelang es zu zeigen, dass diese Aktivität im OFC im Zeitbereich 302-450 ms nach Präsentation des Stimulus auftritt.

Eine Bestätigung der Daten sollte in unabhängigen weiteren Untersuchungen angestrebt werden, wobei für die Interpretation eine gesonderte Auswertung nach Punktzahlen wünschenswert wäre. Hierzu müsste allerdings eine neue Version des pORT mit insgesamt mehr Wahlversuchen verwendet werden. Weiterhin wäre eine größere Fallzahl nötig, um die vermutlich geringeren Unterschiede orbitofrontaler Aktivität identifizieren zu können.

Ebenso sollte ein Vergleich der Daten der gesunden Probanden mit psychiatrischen Patienten erfolgen. Studien mit dementen und depressiven Patienten wurden in der Arbeitsgruppe bereits durchgeführt, eine Studie mit zwangskranken Patienten ist in Vorbereitung. Interessant wären weiterhin Vergleiche mit Suchtkranken sowie mit Schizophrenen. Für alle diese vergleichenden Studien liefert die vorliegende Arbeit hilfreiche Vorinformationen.